



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**MODELACIÓN NUMÉRICA DEL DESGASTE ABRASIVO POR
ARENA UTILIZANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS
DISCRETOS (MED)**

DANIEL REIMUNDO LOBOS RIQUELME

TESIS DE GRADO PARA OPTAR AL GRADO DE
Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mecánica

Y AL TÍTULO DE
Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía
Franco Perazzo Maggi

ABRIL, 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título ☒ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: MODELACIÓN NUMÉRICA DEL DESGASTE ABRASIVO POR ARENA UTILIZANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS (MED)

Nombre del candidato(a): DANIEL REIMUNDO LOBOS RIQUELME

Carrera / Grado: INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA / MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA

Campus: CASA CENTRAL

Departamento: INGENIERÍA MECÁNICA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Franco Perazzo M., en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

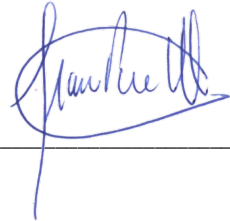
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 06/05/2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 5/05/2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

Sin duda, el trabajar en esta tesis ha sido lo más difícil que he realizado en la universidad hasta hoy, pero, pese a todo, cada momento dedicado a trabajar en la creación de este documento lo agradezco completamente, y al entregar este escrito en su versión final, puedo decir con toda seguridad de que no me arrepiento de haber realizado este magíster.

Ahora, haciendo referencias particulares, primero quiero agradecer a mi familia, por aguantarme durante todos estos años; por darme la libertad y el apoyo no importara lo que estudiase, por confiar en que terminaría esto, por su paciencia y por estar ahí cuando les he necesitado durante estos largos años de estudio.

No puedo dejar de lado el agradecer a mis profesores, de todos de alguna forma se logró aprender y sé que jugaron un rol en mi formación como profesional. En particular, le quiero dar las gracias al profesor Franco, por el tiempo que me ha dedicado, por su paciencia y apoyo a lo largo de los años en los cuales he podido trabajar junto a él, ya sea en esta tesis o en las ayudantías de sus ramos; siempre ha sido un agrado.

Por último, agradecer a todas las amistades que he hecho a lo largo de estos años, al Gabo, Leo y Martín, quienes hicieron de los días de pregrado algo memorable, ya fuera por estudiar para un certamen o simplemente para hacer la hora; a Cata, Tomás, Juan y, en particular, a Andrés, por hacer de los días pasados trabajando en el magíster mucho más amenos. Además, no quiero dejar de lado a Debate, a Álvaro, Javier (Chacón), Paloma, Diego, Scarlett, Mauricio (Valderrama), a las Camis (Sarmiento y Mora), Fran, Joaco, Francisco, Vani y Blas, por darme un lugar al cual siempre poder volver en esta universidad. Agradezco a cada uno y a muchos más por los montones de recuerdos que siempre llevaré conmigo.

Sin nada más que decir, quiero dedicar este trabajo a todas estas personas, como un agradecimiento por todo lo que me han dado a lo largo de todos estos años.

Glosario

H_{esp} Dureza específica para la simulación.

T_{ex} Tasa de desgaste ensayo laboratorio.

T_{sim} Tasa de desgaste simulación.

ASTM American Society for Testing and Materials.

CITRAM Centro de Investigación en Transporte de Materiales.

DIMEC Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

DSRW Dry Sand/Rubber Wheel.

EJ Exajulio.

ft pies.

HPGR High Pressure Grinding Rolls.

KPa Kilopascascales.

lb Libras.

m metros.

MED Método de Elementos Discretos.

N Newton.

rpm Revoluciones por minuto.

Resumen

El desgaste es un fenómeno que está presente en todas las industrias y que siempre debe ser considerado en cualquier situación donde dos superficies puedan estar en contacto. Para analizarlo en materiales, se han realizado diferentes ensayos y pruebas, y también se han adaptado distintos programas para incluir modelos que puedan representar este fenómeno de forma fidedigna a la realidad. Pero, pese a la existencia de una gran cantidad de herramientas, los estudios sobre lo que implica una buena representación del desgaste son escasos.

En el presente trabajo, se estudia la representación del desgaste de partículas de arena, obtenida al utilizar el modelo creado en el DIMEC (Knop, 2015), para simular ensayos de desgaste. En particular, se trabajó para obtener huellas que fueran resultado de una remoción de material adecuada, en base a sus tasa de desgaste y que presentaran una forma comparable a los patrones de desgaste vistos en experimentos previamente realizados. Para conseguir esto, se modificó el algoritmo utilizado, con tal de representar el desgaste de la arena. En particular, las modificaciones realizadas en este trabajo, se pueden resumir en: la implementación de un nuevo ensayo antes no simulado con este modelo, el cual corresponde a la rueda ASTM; modificaciones en las rutinas de movimiento de la placa desgastada; las condiciones para detectar contactos en los bordes de los elementos de malla, y la entrada de partículas, con tal de mejorar los resultados obtenidos de las huellas y tasas de desgaste simuladas.

Los resultados obtenidos se contrastaron con dos ensayos de desgaste, donde se deja caer material particulado sobre una probeta metálica, que se presiona contra una rueda de goma, la cual gira a una determinada velocidad, dejando una huella de desgaste en el metal. El primer ensayo fue con la rueda CITRAM, que sirvió para estudiar el comportamiento del modelo ante variaciones en las velocidades de giro de la rueda y en la fuerza de presión de la placa sobre las partículas. En trabajos previos, las tasas de desgaste obtenidas para este ensayo, presentaban un error de 27 % respecto a uno solo de los casos que se ensayaron en laboratorio (Mascaró, 2017). Con las modificaciones realizadas al modelo, estos errores se redujeron bajo el 5 % al comparar las tasas de desgaste simuladas con las experimentales, para todos los casos posibles en este ensayo.

Por otro lado, el segundo ensayo corresponde al de la norma ASTM-G65, que se utilizó para estudiar el crecimiento de la huella en simulaciones de duración prolongada, con el fin de estudiar los límites del código actual. En este caso, se logró simular tiempos nunca antes conseguidos con este modelo, obteniendo información sobre el modelo, la huella, y el comportamiento de la tasa de desgaste en simulaciones de diez segundos, siendo estos tiempos nunca antes analizados con el modelo de desgaste utilizado en trabajo previos. (Knop, 2015; Mascaró, 2017; Rodríguez, 2023)

Junto con lo anterior, con el fin de poder estudiar en mayor detalle la representación de la huella obtenida, se desarrollan nuevas formas para postprocesar los patrones obtenidos en las simulaciones

realizadas, así obteniendo un mayor detalle en relación con cómo se comporta el modelo ante diferentes situaciones. Además, estos nuevos postprocesos permiten clarificar la importancia de este al momento de analizar la representación del desgaste en ambos ensayos simulados, dejando en claro que este es un fenómeno que, para ser bien representado, debe considerar los aspectos numéricos, como también las formas de las huellas obtenidas.

Palabras Clave: MED, Representación Huella de Desgaste, Postproceso

Abstract

Wear is a phenomenon that is present in all industries and must always be considered in any situation where two surfaces may come into contact. To analyze it in materials, different tests and trials have been carried out, and different softwares have also been adapted to include models that can represent this phenomenon in a way that is faithful to reality. However, despite the existence of a large number of tools, studies on what constitutes a good representation of wear are scarce.

The present work studies the representation of sand particle wear obtained using the model created in DIMEC (Knop, 2015) to model wear tests. In particular, the work is focused on simulating wear marks that were the result of adequate material removal and that had a shape similar to the wear patterns seen in previous experiments. To achieve this, the algorithm used was modified to account for sand wear. Specifically, the modifications made in this work can be summarized as follows: the implementation of a new test not previously simulated with this model, based on the ASTM DSRW apparatus; modifications to the movement routines of the worn plate; the conditions for detecting contacts at the edges of the mesh elements; and the particle input, in order to improve the results obtained for the simulated footprints and wear rates.

The results obtained were compared with two wear tests, in which particulate material was dropped onto a metal test piece, which was pressed against a rubber wheel rotating at a certain speed, leaving a wear mark on the metal. The first test was with the CITRAM wheel, which was used to study the behavior of the model in response to variations in the wheel's rotation speed and the pressure force of the test piece on the particles. In previous studies, the wear rates obtained for this test showed an error of 27 % compared to just one of the cases tested in the laboratory (Mascaró, 2017). With the modifications made to the model, these errors were reduced to less than 5 % when comparing the simulated wear rates with the experimental ones, for all possible cases in this test. The second test corresponds to the ASTM-G65 standard, which was used to study the growth of the mark in prolonged simulations in order to study the limits of the current code. In this case, the model achieved simulation times never reached before, yielding information about the model, the footprint, and wear rate behavior for a 10-second-long simulation, time that had never been analyzed using the wear model employed in previous studies. (Knop, 2015; Mascaró, 2017; Rodríguez, 2023)

In addition to the above, in order to study the representation of the obtained footprint in greater detail, new ways of post-processing the patterns obtained in the simulations are developed, thus obtaining greater detail in relation to how the model behaves in different situations. Furthermore, these new post-processes clarify the importance of it when analyzing the representation of wear.

Keywords: DEM, Wear footprint representation, Post-processing

Índice general

Agradecimientos	I
Glosario	I
Resumen	III
Abstract	IV
1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo General	3
2.2. Objetivos Específicos	3
3. Estado del Arte	4
4. Metodología	6
4.1. Desgaste	6
4.1.1. Desgate Abrasivo	6
4.1.2. Desgaste abrasivo dada la interacción de dos cuerpos	6
4.1.3. Desgaste abrasivo dada la interacción de tres cuerpos	7
4.2. Desgaste Acelerado	7
4.2.1. Ensayo de la rueda de desgaste	8
4.3. Modelación Numérica del Desgaste	10
4.3.1. Tipos de Partícula	11
4.3.2. Modelo de Contacto	11
4.3.3. Modelo Elástico Lineal	12
4.3.4. Modelo de Hertz	12
4.3.5. Modelos de Desgaste	14
4.4. Algoritmo Método de Elementos Discretos	17
4.4.1. Paralelización	18
4.4.2. Algoritmos de búsqueda espacial	19
4.4.3. Descripción del funcionamiento del modelo numérico	21
4.4.4. Diagrama de Flujo	22
4.4.5. Representación del desgaste en MED	24
4.4.6. Inyección de partículas	26
4.4.7. Paso temporal	27

4.5.	Implementación de los experimentos en el modelo numérico	28
4.5.1.	Rueda CITRAM	28
4.5.2.	Rueda ASTM-G65	30
4.6.	Actualización del modelo para modelación de las partículas de arena	33
4.6.1.	Simplificación de la geometría para el ensayo	35
4.6.2.	Limitación del movimiento de la placa de desgaste	36
4.6.3.	Detección de contactos en el borde	40
4.7.	Caracterización y calibración del solido a granel	42
4.7.1.	Distribución de partículas	42
4.7.2.	Inyección de Partículas	45
5.	Representación del desgaste	48
5.1.	Especificaciones Técnicas Servidores	48
5.1.1.	Servidores DIMEC	48
5.1.2.	Servidores George Mason	49
5.2.	Softwares para Postproceso de resultados	49
5.2.1.	Paraview	49
5.2.2.	Matlab	51
6.	Análisis de Resultados	55
6.1.	Rueda CITRAM	55
6.2.	Rueda ASTM	63
7.	Conclusiones	69
8.	Trabajos futuros	73
	Bibliografía	76
A.	Parámetros de Entrada	79
A.1.	Configuración del Ensayo	79
A.2.	Inserción de partículas	80
A.3.	Volumen de Control	81
A.4.	Tiempo	82
A.5.	Propiedades asociadas a la malla	83
A.5.1.	Propiedades placa de desgaste	83
A.5.2.	Propiedades de la dinámica de la rueda	84
A.5.3.	Propiedades del Solido a Granel	84
A.6.	Propiedades de calibración del ensayo	85
A.6.1.	Coefficiente de rebote	85
A.6.2.	Coefficiente de roce	85
A.6.3.	Módulos elásticos	86
A.7.	Otros	86
B.	Mallado de geometrías	87
B.1.	Generación de Mallas	87
B.2.	Diferencias mallados	89

C. Generación del Postproceso	92
C.1. Paraview	92
C.1.1. Agregar la geometría	92
C.1.2. Configuraciones para la visualización	92
C.1.3. Arreglos finales	94
C.2. Matlab	96

Capítulo 1

Introducción

El desgaste es un proceso que está presente en todo tipo de rubros, que pueden ir desde la agricultura a la minería, entre otros. Es un fenómeno inevitable sin importar la escala a la que se produzca fricción entre cuerpos, el cual termina por deteriorar equipos y elementos de máquinas clave en las industrias, y por ello, el estudio y entendimiento del desgaste son clave. Para poner en contexto, la industria minera global se estima que consume alrededor del 6.2 % de la energía global, y en donde alrededor de un 40 % de esta energía es utilizada para superar la fricción. Eso sin contar los 2 [EJ] usados para remanufacturar y reemplazar las partes desgastadas y reservar y guardar el equipamiento necesario para las fallas debido al desgaste, según lo presentado por Holmberg et al., 2017. Estos números muestran que encontrar soluciones relacionadas a reducir el desgaste de equipos y maquinaria tiene impactos significativos en los usos de energía en las operaciones requeridas.

Para abordar este problema, es necesario contar con herramientas computacionales que permitan predecir de forma correcta cómo se produce el desgaste, con el fin de diseñar elementos de máquinas, equipos y otros componentes que puedan soportar las múltiples solicitudes de esfuerzos a los cuales están sometidos, y los cambios de estas en el tiempo. Estas herramientas juegan un rol igualmente clave en la generación de planes de mantenimiento, con el fin de evitar que el desgaste termine afectando la producción de forma catastrófica.

Dentro de las herramientas existentes hoy en día, el Método de Elementos Discretos (MED) o Discrete Element Method (DEM), se ha consolidado como el más utilizado en la actualidad. Esto debido a que a través del cálculo de ecuaciones de balance de fuerzas y momentos sobre las partículas involucradas permite describir el movimiento de un gran número de elementos que circulan en un dominio de control determinado, así como los efectos sobre este. Este método tiene la flexibilidad para poder determinar interacciones entre partículas; entre partículas y sólidos; como también entre partículas y fluidos.

La popularidad de este método ha hecho que se creen múltiples softwares basados en este, como Rocky, ESyS Particle, LIGGGHTS, EDEM, entre otros, los cuales entregan resultados para modelar el desgaste mediante resultados numéricos, presentados como datos útiles para el diseño, así como diversas representaciones visuales de las huellas y patrones de desgaste modelados. A su vez, también se han creado programas particulares para realizar análisis respecto a la modelación del desgaste; en particular, en este trabajo se utilizará el modelo creado por Frederick Knop (Knop, 2015), el cual ha mostrado buenos resultados en la modelación del desgaste producido por mineral de cobre (Knop, 2015; Mascaró, 2017; Perazzo et al., 2019), y que pese a que el modelo entrega la

posibilidad de modelar el desgaste partículas de arena, no ha logrado entregar valores satisfactorios, como se muestra en el trabajo de Patricio Mascaró (Mascaró, 2017), donde para partículas de arena se presentan errores del 27 % en la tasa de desgaste, al compararla con la tasa del ensayo realizado en la rueda CITRAM.

Ante lo anterior, queda la pregunta sobre si el algoritmo creado por Frederick Knop (Knop, 2015) y posteriormente optimizado por Patricio Mascaró (Mascaró, 2017) y Nicolás Rodríguez (Rodríguez, 2023), puede entregar una representación correcta del desgaste con partículas de arena a simular los ensayos de las ruedas de desgaste ASTM y CITRAM. Ante esta disyuntiva, se propone que el modelo sí puede modelar partículas de arena, pese a sus diámetros pequeños. Para probar esto, se trabajará en ajustar el modelo para que pueda simular ensayos de desgaste con arena, como la rueda ASTM, para validar los resultados obtenidos con experimentos reales. A la vez, se presentarán nuevas formas para postprocesar los resultados obtenidos, con el fin de obtener un análisis más profundo respecto a cómo el programa representa el desgaste, y si los patrones obtenidos mediante este código se condicen con los vistos en los experimentos.

Capítulo 2

Objetivos

Trabajos de investigación, realizados en el Departamento de Ingeniería Mecánica (DIMEC), han permitido desarrollar y optimizar un código basado en el método de elementos discretos MED para modelar el desgaste abrasivo, permitiendo obtener resultados comparables a ensayos de laboratorio para mineral de cobre de diferentes granulometrías (Knop, 2015; Mascaró, 2017; Perazzo et al., 2019; Rodríguez, 2023). Considerando el desgaste como un proceso complejo que afecta la vida útil y el rendimiento de diversos equipos y sus componentes mecánicos, producido por diversos agentes, y siendo la arena un material abrasivo común, esta se convierte en un interesante foco de análisis para su estudio. En la presente investigación, se trabajará con el código MED desarrollado en el DIMEC, para modelar la arena en distintas condiciones, comparando los resultados con ensayos realizados, para estudiar la representación del desgaste del modelo propuesto cuando se modelan granulometrías pequeñas.

2.1. Objetivo General

Modificar rutinas del algoritmo para la modelación del desgaste creado en el DIMEC, para simular la abrasión por arena y caracterizar la huella de desgaste, comparando los resultados con ensayos experimentales.

2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Validar el modelo numérico en base a pruebas experimentales de los ensayos de las ruedas de desgaste CITRAM y ASTM–G65.
- Estudiar el efecto de diferentes parámetros, como la dureza específica, tamaño de partículas de arena y la velocidad de impacto, en la tasa de desgaste y la forma de la huella de desgaste.
- Desarrollar nuevas formas para postprocesar la representación del desgaste .

Capítulo 3

Estado del Arte

El Método de Elementos Discretos (MED) (Cundall, 1988; Cundall & Strack, 1979) es un método numérico usado para describir el movimiento de grandes cantidades de partículas de distintos tamaños y formas, en el cual la interacción entre partículas y el medio es representada por un modelo de contacto. En gran parte de las simulaciones en las que se utiliza MED, se considera que partículas con dimensiones del orden milimétrico y cantidades que rondan los pocos miles de partículas, permiten obtener resultados en tiempos razonables de cálculo (Marigo & Stitt, 2015). A pesar de ello, en ciertas aplicaciones industriales es necesario realizar simulaciones de millones de partículas para poder representar un proceso. Con los avances en la potencia de procesamiento de los computadores actuales y la optimización de algoritmos, es posible simular millones de partículas, aprovechando las tarjetas gráficas y la programación en paralelo, como en los trabajos de Dosta y Skorych, 2020; Govender et al., 2016. A la fecha, MED ha sido utilizado como una forma efectiva para abordar problemas de ingeniería relacionados con la modelación del comportamiento de materiales granulares y discontinuos, como el concreto (Huang et al., 2022; Mechtcherine & Shyshko, 2015), arena (Song et al., 2024), cerámicas (Chen et al., 2025) y rocas (Wang & Cai, 2025), entre otros. Múltiples procesos en ingeniería involucran la carga, transporte, molienda, fundición y abrasión de materiales que, a la escala de interés para la ingeniería, deben ser considerados discontinuos. En minería, MED ha sido utilizado principalmente para predecir las trayectorias de los materiales en el interior de equipos de molienda y en tolvas para transferencia de materiales (Cleary et al., 2020; Govender et al., 2015; Lai et al., 2023; Mittal et al., 2024). Entre las aplicaciones de interés en esta área, se encuentra la modelación del desgaste. Esto se debe a que el desgaste reduce la vida útil de los equipos, afectando tanto la productividad como los costos de operación. El uso de algoritmos para predecir el desgaste permite reducir los costos de prototipos experimentales cuando se trata de maximizar la vida útil de los elementos de máquinas.

Una manera simple de estimar la tasa de desgaste abrasivo-erosivo, utilizando los valores de fuerzas y velocidades de las partículas que son obtenidas a través del código MED, es usando las ecuaciones de (Archard, 1953) o (Finnie, 1960). Además, con los avances en la tecnología computacional, ha sido posible incluir en distintos software la posibilidad de modelar el desgaste en base a estas fórmulas, para poder ser utilizado en diferentes áreas. Uno de los usos de estos programas viene relacionado con el estudio de los patrones y la evolución de la huella de desgaste que se produce en diferentes situaciones. Así es el caso de Schramm et al., 2020, donde se utilizó MED para modelar la pérdida de material en herramientas de arado, y así estudiar tanto cambios en la geometría de estas como también las variaciones en las cargas sobre la herramienta producidas por estos cambios en la forma del material. Estos estudios no solo se reducen al campo de la agricultura, sino que en

minería, Zou et al., 2023 realizó análisis de la evolución del desgaste y su efecto en la operación de un molino HPGR, con el fin de determinar cuáles son los efectos de este en el rendimiento del molino y la rotura de partículas. Aun así, el estudio de la huella de desgaste en equipos de gran envergadura o sistemas donde hay múltiples variables involucradas, complica la tarea de aislar las razones por las cuales el modelo se comporta de una manera u otra. Ante esto, se han realizado ensayos estandarizados, como el experimento Pin-On-Disc (Yan et al., 2022), o el experimento de la rueda de desgaste ASTM-G65 (Grasser et al., 2024), entre otros, en los cuales se puede estudiar en mucho mejor detalle el desprendimiento de material en diferentes condiciones, con el objetivo de validar los modelos utilizados basándose en resultados experimentales obtenidos previamente.

Entendiendo lo importante que es tener un modelo que pueda representar de forma correcta el desgaste, y donde se pueda controlar con precisión diferentes aspectos de la modelación, en el DIMEC, se desarrolla un código para modelar y contrastar los resultados del experimento de la rueda de desgaste CITRAM usando MED (Knop, 2015). En este trabajo, se crea un modelo de desgaste el cual, mediante la calibración de diferentes valores de entrada, permite modelar el experimento estudiado para mineral de cobre y arena, representando la huella de desgaste mediante la deformación de un enmallado superficial. Con base en este trabajo se propuso una metodología de calibración para la constante de dureza específica de la probeta, requerida por el modelo de Archard, para así poder realizar una comparación directa entre la tasa de desgaste efectiva del ensayo y la simulación. Además, con el fin de reducir los tiempos globales de cómputo, se implementaron marcadores de tiempo en subrutinas; se analizó el tiempo demandado por el software en una simulación base y la utilización de memoria (Mascaró, 2017). Aun así, pese a estos esfuerzos, las simulaciones MED continúan utilizando una gran cantidad de recursos computacionales y teniendo una duración extendida, como se aprecia en el trabajo de (Fuentealba, 2021), donde, al utilizar Rocky para hacer las simulaciones y modelar el desgaste de una probeta de acero (producido por partículas de arena con un Módulo de Young de 50.000 [MPa]), se obtenían tiempos de cálculo de 20 horas para simular 0,3 segundos de ensayo. Al observar estos elevados tiempos de cálculo al utilizar un programa altamente optimizado como lo es Rocky, se pensó en utilizar programación paralela con el objetivo de mejorar los tiempos de cálculo obtenidos en el código creado en el DIMEC. Para ello Rodríguez, 2023, estudió cada subrutina del código con el fin de poder paralelizar las rutinas que más tiempo consumían a lo largo de la modelación. Junto con ello, se implementó una técnica de búsqueda de partículas mediante bins para poder hacer más fluido el proceso de encontrar partículas vecinas y sus interacciones, obteniendo un código más rápido, que da los mismos resultados, confirmados en las tesis anteriores.

La presente investigación se centra en el estudio de la representación de la huella de desgaste que se obtiene a través de la utilización del modelo creado en el DIMEC. En particular, se busca modelar de forma correcta partículas de arena de diferentes granulometrías y contrastar los resultados obtenidos con experimentos de laboratorio, realizados para dos variaciones del experimento de la rueda de desgaste. El fin es poder mostrar que el modelo utilizado puede modelar de manera correcta partículas de tamaños pequeños, las cuales representan un desafío al momento de calibrarlas, así como en la simulación debido a los pequeños pasos temporales necesarios para poder obtener resultados. Junto con ello, también se buscarán nuevas formas de poder presentar los resultados obtenidos a fin de poder analizar los perfiles de desgaste en simulaciones de mayor extensión en comparación con trabajos previos, y poder observar la evolución de las huellas de desgaste obtenidas, procurando obtener resultados para las tasas de desgaste de los diferentes materiales simulados, en línea con los medidos en pruebas de laboratorio.

Capítulo 4

Metodología

En el presente capítulo, se presentarán los elementos principales para poder comprender el funcionamiento del algoritmo utilizado en esta tesis, partiendo de los conceptos más generales, y cerrando con detalles particulares sobre el modelo utilizado, haciendo énfasis en las modificaciones realizadas al programa con el fin de cumplir los objetivos propuestos en esta tesis.

4.1. Desgaste

El desgaste consiste en el arranque de material de un cuerpo producto del contacto con otro. Este fenómeno produce como consecuencias en el elemento desgastado: debilitamientos, pérdida de tolerancias e integridad de este, lo cual tiene como efecto la reducción de su vida útil, e incluso puede llevar a la generación de fallas catastróficas. El origen puede ser por adhesión, erosión, abrasión, etc.

4.1.1. Desgaste Abrasivo

El desgaste abrasivo corresponde a la remoción de material en una superficie mediante la acción de un material más duro que se desplaza sobre ella aplicando una fuerza. La tasa de desgaste producida por el material abrasivo depende de su geometría, dureza y la carga con la que este se desplace o impacte en la superficie. Este desgaste se puede presentar de dos formas.

4.1.2. Desgaste abrasivo dada la interacción de dos cuerpos

El estudio realizado por (Bowden & Tabor, 1950) propone que el desgaste entre dos cuerpos ocurre a niveles microscópicos, donde las asperezas y anomalías en la superficie entran en contacto, produciendo el desgaste de la superficie menos dura. Estas interacciones se pueden describir en tres etapas, que se presentan en la figura 4.1:

1. La primera etapa considera la formación de contacto. Se producen choques y penetraciones en las distintas asperezas de los cuerpos, generando torceduras y quebraduras de estas, lo cual produce surcos debido a la deformación plástica y elástica de la interacción de entre cuerpos.
2. En la segunda etapa resulta del enlace de los átomos de ambos cuerpos, produciendo una soldadura o junta adhesiva.

3. La tercera etapa corresponde a la separación de ambos cuerpos debido a la falla de la junta adhesiva producto del movimiento de ambas superficies.

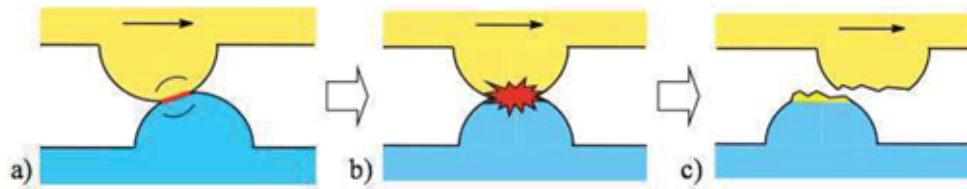


Figura 4.1: Etapas del desgaste por abrasión de dos cuerpos. (Denape, 2014)

4.1.3. Desgaste abrasivo dada la interacción de tres cuerpos

(Godet, 1984), introdujo el concepto del tercer cuerpo como el equivalente seco de la lubricación, es decir, una interfaz de partículas sólidas se sitúa entre dos cuerpos, los cuales interactúan entre sí sin entrar en contacto. Al igual que para dos cuerpos, estas interacciones se pueden describir en tres etapas, tal como se ve en la figura 4.2:

1. La primera considera el atrapamiento de partículas, es decir, partículas removidas de las superficies o externas quedan agarradas entre los cuerpos sometidos a desgaste.
2. La segunda etapa corresponde a la propagación de las partículas entre superficies. El desplazamiento de los cuerpos produce cargas sobre las partículas, permitiendo así su movimiento entre ambos cuerpos y generando de esta forma el desgaste de las superficies.
3. La tercera etapa consiste en la expulsión de las partículas de la zona de desgaste, permitiendo que ambos cuerpos entren en contacto.

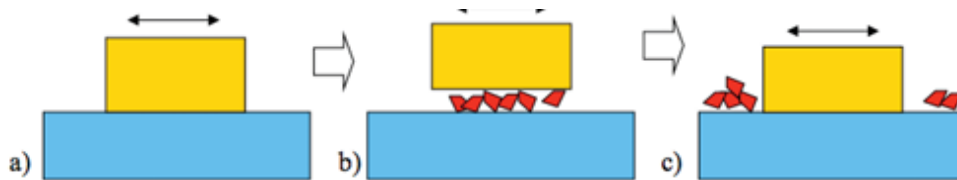


Figura 4.2: Etapas del desgaste por abrasión de tres cuerpos. (Denape, 2014)

4.2. Desgaste Acelerado

El desgaste es un fenómeno que se desarrolla de forma lenta en términos de operación, donde los ensayos y simulaciones de carácter real deben considerar periodos de tiempo muy largos, que pueden extenderse por meses e incluso años para obtener resultados. Debido a esto, es imperativo utilizar ensayos de desgaste acelerado, en los cuales se reducen considerablemente los tiempos de experimentación y simulación a escalas de minutos e inclusive segundos.

4.2.1. Ensayo de la rueda de desgaste

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

El ensayo consiste en una rueda de goma que debe girar a una velocidad constante durante el ensayo y un porta probetas en el cual se posiciona la placa a ensayar tangencial a la rueda. Se aplica una masa en el aparato de ensayo, con tal de generar un momento que hace que la probeta ensayada se acerque a la rueda de caucho. El sólido a granel es alimentado por un chute, donde el flujo de material se ve forzado a pasar entre la rueda y la placa, produciendo así el mecanismo de desgaste a tres cuerpos (Figura 4.2).

Norma ASTM G65

La norma ASTM G65 corresponde a una prueba de laboratorio realizada bajo estándares que permite determinar la resistencia al desgaste abrasivo de materiales metálicos mediante la prueba de Arena Seca/Rueda de Goma (DSRW). Esto se logra descargando un flujo estacionario de arena sobre una placa que es a su vez presionada contra una rueda de goma giratoria con una fuerza constante. El objetivo principal de este ensayo es entregar información que permita clasificar la resistencia de metales a la abrasión en seco bajo condiciones específicas de operación. Los resultados son registrados como pérdida de volumen en milímetros cúbicos [mm^3]. (ASTM, 2021)

Existen cinco variantes en cuanto a condiciones de operación, las cuales son presentadas en la tabla 4.1:

Procedimiento especificado	Fuerza aplicada por la probeta, [N] (lb)	Revoluciones de la rueda, [rpm]	Distancia desgastada [m] (ft)
A	130 (30)	6.000	4.309 (14.138)
B	130 (30)	2.000	1.436 (4.711)
C	130 (30)	100	71,8 (236)
D	45 (10,1)	6.000	4.309 (14.138)
E	130 (30)	1.000	718 (2.360)

Tabla 4.1: Tabla de ensayos posibles según norma ASTM–G65

Es importante destacar que la distancia desgastada, se mide según el número de vueltas completadas por la rueda, girando a la velocidad correspondiente al procedimiento que se esté midiendo.

De acuerdo con la norma, el dispositivo consta de 7 componentes: una tolva que almacena material abrasivo, una boquilla dosificadora, un brazo que sostiene el peso que permite imprimir la fuerza contra la rueda de acero recubierta con caucho, la cual establece un punto de contacto con la probeta a desgastar, y una fuente de poder, tal como se aprecia en la Figura 4.3.

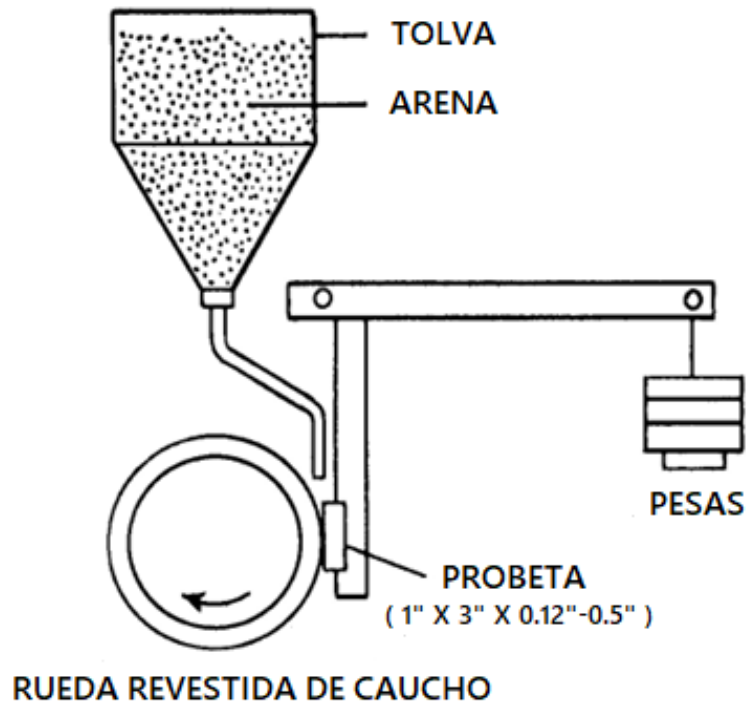


Figura 4.3: Arreglo Norma ASTM-G65

Respecto al funcionamiento del dispositivo, la norma indica que la boquilla debe estar sobre la junta probeta-rueda e inyectar un flujo laminar constante, y la rotación debe tener el mismo sentido que el flujo de arena.

Rueda CITRAM

Con el fin de estudiar el comportamiento de la arena respecto a otras variables no consideradas dentro del ensayo de la norma ASTM-G65, se utiliza la máquina de desgaste para silos y tolvas de flujo másico, desarrollada por (Calvo, 2011) y posteriormente modificada por (Erazo, 2013). Este ensayo fue utilizado para analizar el desgaste de mineral chancado de cobre de diferentes tamaños, como también arena de 1.6 mm de diámetro.

El experimento consiste en hacer que sólidos a granel pasen entre la rueda recubierta con caucho y la placa sometida a desgaste. La velocidad del material abrasivo sobre la probeta se controla con la velocidad de giro de la rueda. Mientras, la presión se controla variando la posición de la carga en el brazo del portaprobetas (ver Figura 4.4).

Uno de los aspectos diferenciadores entre este ensayo y el presentado en la norma ASTM-G65, es la posibilidad de variar la velocidad de giro y presión de la placa desgastada, obteniendo diferentes ensayos posibles para poder estudiar la representación de la huella de desgaste. En la tabla 4.2, se resumen las nueve combinaciones posibles de velocidad y presión utilizadas al ensayar arena con esta máquina.

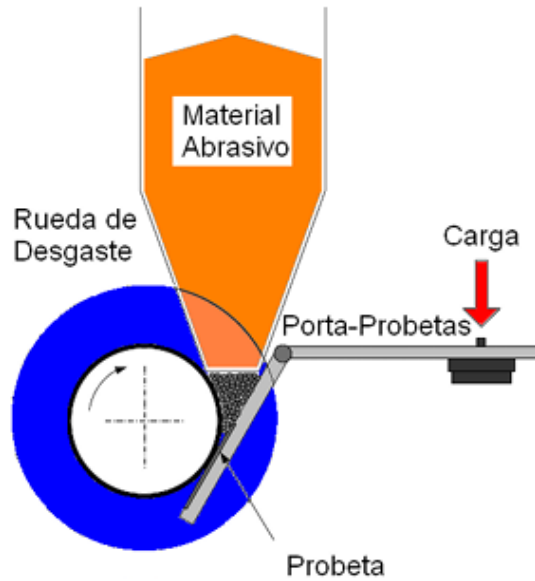


Figura 4.4: Arreglo ensayo Rueda CITRAM. (Knop, 2015)

Ensayo	Presión aplicada por la Placa, [KPa]	Revoluciones de la rueda, [rpm]	Flujo Másico [kg/min]
1	3	455	31
2	5	455	29
3	7	455	31
4	3	1040	28
5	5	1040	27
6	7	1040	26
7	3	710	29
8	5	710	29
9	7	710	28

Tabla 4.2: Tabla de ensayos realizados Rueda CITRAM

4.3. Modelación Numérica del Desgaste

Habiendo presentado el concepto de desgaste, así como ciertos ensayos enfocados en la medición de la remoción de material, los cuales serán centrales en el posterior estudio de las huellas y patrones de desgaste abrasivo, es necesario introducir el modelo con el cual se harán los ensayos correspondientes. Pero antes de ello, es necesario comprender los conceptos básicos sobre el MED en general, los que son explicados en las siguientes secciones.

4.3.1. Tipos de Partícula

En los programas comerciales, generalmente se presentan diversas maneras de representar el sólido que desgastará las superficies, tal como se presenta en la figura 4.5, donde se pueden apreciar distintos ejemplos.

Cabe destacar que el programa desarrollado en el DIMEC solo puede trabajar, a la fecha de entrega de este trabajo, con partículas esféricas, entregando la posibilidad de generar macropartículas combinando, mediante fuerzas de cohesión, un determinado número de estas.

Partícula Esférica

Es el primer tipo de partícula implementado por (Cundall & Strack, 1979). Permite la simulación grandes cantidades de partículas con un bajo costo computacional, producto de la simplicidad en la programación de la detección y cálculo de contactos. Es necesario considerar un coeficiente de resistencia a la rodadura al utilizar este tipo de partículas, para simular las irregularidades del material real (Luding, 2008).

Partícula Poliédrica

Permite la obtención de mejores aproximaciones del comportamiento mecánico de minerales y rocas, pero su implementación conlleva elevados costos computacionales en la detección y búsqueda de contactos (Nezami et al., 2004; Zhao et al., 2006), lo cual limita su uso en simulaciones extensas. (Figura 4.5)

Partícula de Superficie Curvada Cerrada

Mediante este método, se pueden simular geometrías no esféricas mediante elementos formados a partir de funciones que generan superficies curvas cerradas, donde se destaca la generación de elipsoides como una de las formas más comunes para generar superficies cerradas. Al utilizar elipsoides de diferentes proporciones en cada octante, los cuales deben tener continuidad al momento de unirse a los planos principales, es posible generar elipsoides asimétricos (Peters et al., 2009). Asimismo, es plausible construir partículas basadas en funciones continuas de potencia (Wellmann et al., 2008). Mediante estas técnicas es factible generar partículas asimétricas con una superficie continua y cerrada, aumentando las posibilidades de forma de las partículas. (Figura 4.5)

Simular partículas poliédricas conlleva un costo computacional de detección de contactos mayor al de la partícula esférica, limitando la capacidad de modelar un elevado número de partículas.

En el presente trabajo, se utilizarán partículas esféricas para la modelación de la arena. Esta elección se debe a la necesidad de bajos tiempos de cómputo, para un gran número de partículas que estarán dentro de la simulación en cada paso de tiempo.

4.3.2. Modelo de Contacto

Los modelos de contacto en MED emplean información de la interferencia δ , que se genera en el contacto, y la velocidad relativa $\dot{\delta}$, para calcular la fuerza de contacto normal $\mathbf{F}_n$, tanto para contactos entre partículas, como para contactos con las paredes, tal como se aprecia en la figura 4.6

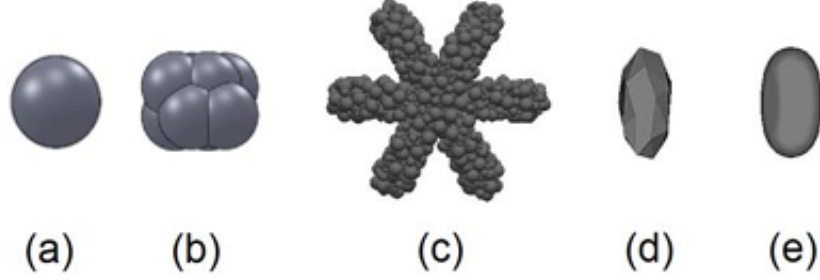


Figura 4.5: Tipos de partículas en MED. (a) Partícula esférica. (b), (c) Partículas Compuestas. (d) Partícula Poliédrica. (e) Partícula de superficie curvada cerrada. (Knop, 2015). El modelo con el cual se trabajó solo permite modelar con partículas esféricas y compuestas

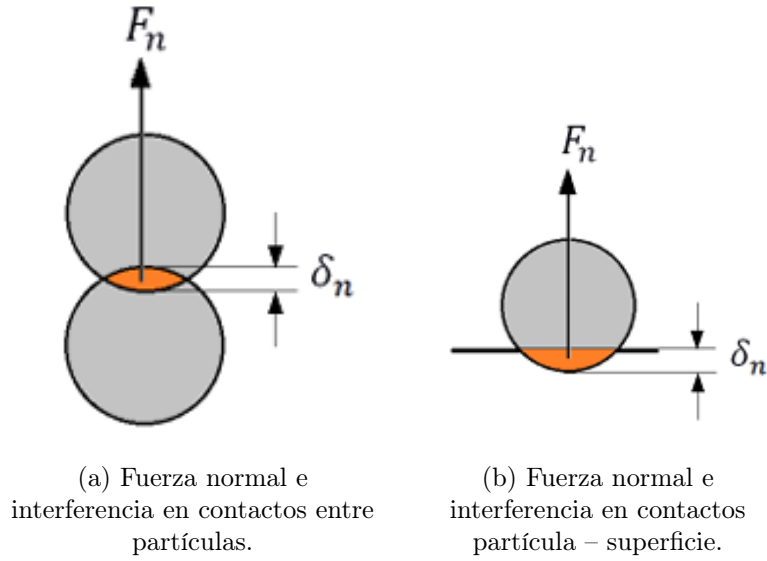


Figura 4.6: Interferencia para diferentes tipos de contacto entre partículas. (Knop, 2015)

En forma análoga al contacto normal, los modelos de contacto se pueden aplicar para el cálculo de las fuerzas de contacto tangenciales.

4.3.3. Modelo Elástico Lineal

En el modelo de contacto lineal propuesto por (Cundall & Strack, 1979), la fuerza de contacto elástica es proporcional a la interferencia δ de las partículas y a la fuerza viscosa, que a su vez es proporcional a la velocidad de acercamiento de los elementos. A pesar de su simplicidad, se obtiene un comportamiento macroscópico que se asemeja al del material real en simulaciones MED.

4.3.4. Modelo de Hertz

El modelo de contacto no lineal de Hertz (Hu et al., 2011), considera el efecto del aumento del área de contacto de las partículas en el cálculo de las fuerzas viscosas y elásticas, teniendo una

aproximación más cercana a la realidad de las fuerzas generadas durante el contacto.

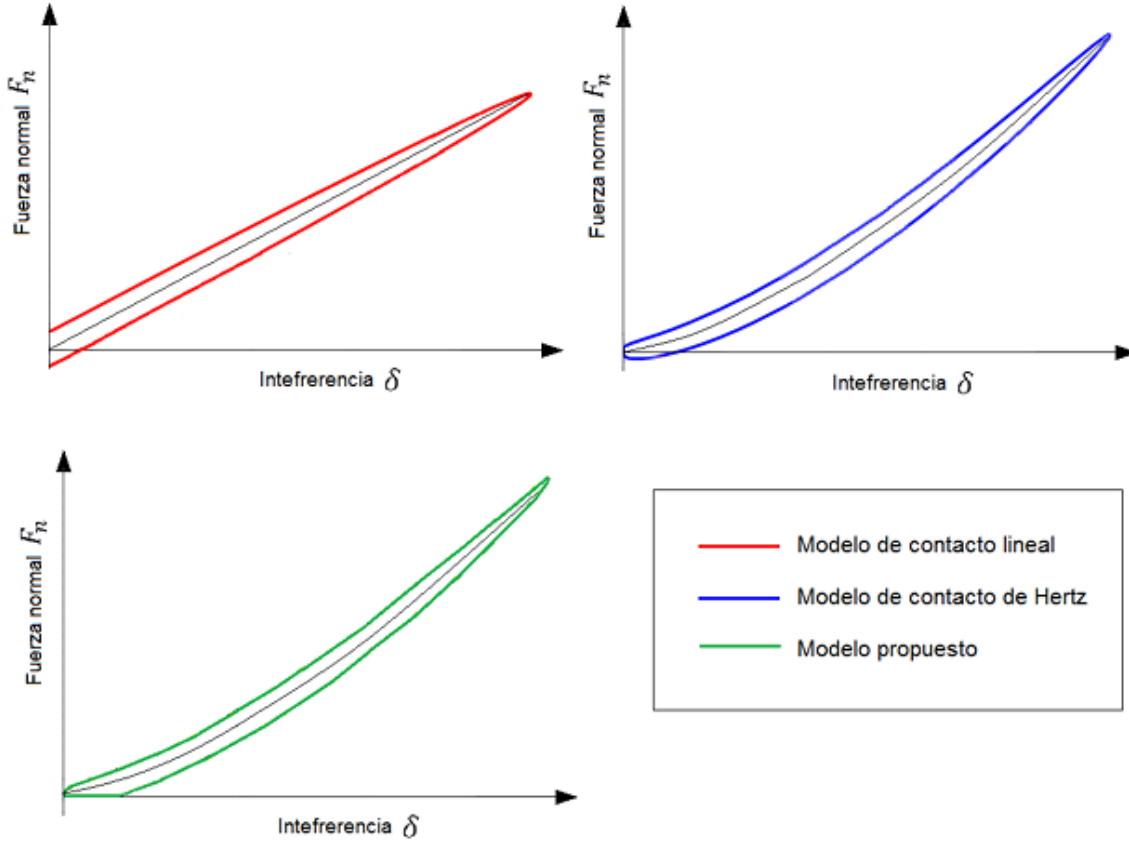


Figura 4.7: Comportamiento de la fuerza normal de una partícula al rebotar sobre una superficie horizontal, utilizando distintos modelos de contacto. (Knop, 2015)

En la figura 4.7, se presenta el comportamiento de la fuerza normal de una partícula al rebotar sobre una superficie horizontal. Se aprecia que, en el modelo de contacto lineal, la componente elástica (graficada con una línea negra), forma una recta, mientras que en los modelos no lineales la componente elástica es una curva, junto con lo cual, se observa que en el modelo no lineal la fuerza normal es siempre positiva, lo cual elimina las fuerzas de adhesión en el contacto.

En los tres modelos de contacto mostrados, se distingue el efecto de la fuerza viscosa que se opone al movimiento relativo durante el contacto, generando un distanciamiento entre la curva de carga y descarga.

El código se basa en el modelo de contacto no lineal de Hertz, pero le hace una modificación que considera solo la parte positiva de la fuerza normal de contacto, eliminando de esta forma las fuerzas cohesivas. El uso de este modelo modificado, según lo presentado en el trabajo de Frederick Knop (Knop, 2015), tiene el fin de simplificar el modelo programado, al evitarse el cálculo de la adhesión entre partículas, lo cual podría llevar a la generación de macropartículas durante la simulación, aumentando tiempos de cálculo. Además, la adhesión implica que el material tenga cierto grado

de humedad, pero según los datos entregados en el trabajo de Rodrigo Solis (Solis, 2022), la arena utilizada para los ensayos estaba seca; por lo tanto, el uso de este modelo que no considera fuerzas adhesivas es correcto.

4.3.5. Modelos de Desgaste

Con el fin de calcular el desgaste mediante algoritmos basados en MED, se han creado diferentes modelos. A continuación, se presentan algunos ejemplos.

Modelo de desgaste de Archard

(Archard, 1953), presentó un modelo de desgaste para superficies que rozan (figura 4.8), donde primeramente planteó que, según parámetros mecánicos de los materiales en contacto, es posible conocer el área de contacto real y la conductancia, lo que se presenta en la ecuación (4.1) para deformaciones elásticas y en la ecuación (4.2) para deformaciones plásticas.

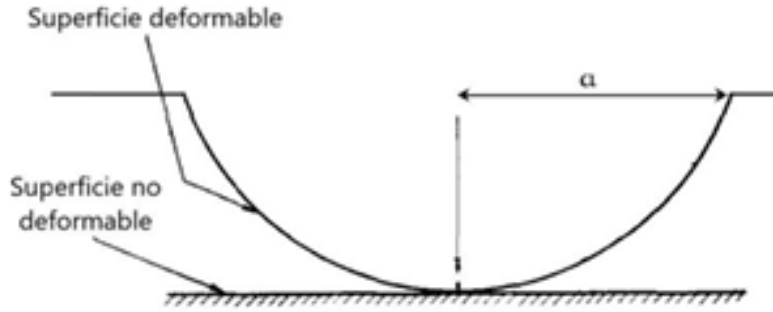


Figura 4.8: Representación Modelo de desgaste de Archard (Archard, 1953)

$$a = \frac{1}{2}PR \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

$$a = \left(\frac{P}{\pi H} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

Donde a , R , P , E_1 , E_2 y H representan, respectivamente, el radio del área circular de contacto, el radio de la partícula, la carga aplicada a la partícula, los módulos de Young de los materiales en contacto y la dureza del material.

En la segunda parte de la investigación realizada por Archard, se presenta un método para determinar el desgaste basado en el trabajo de (Holm, 1946), donde se postula que el desgaste ocurre a nivel atómico. Este modelo realiza las siguientes suposiciones:

1. Los contactos se dan todos por separado y a distintos niveles de altura. El volumen total desgastado corresponde a la suma de todos los pequeños desgastes.
2. Todos los contactos permanecen constantes en el tiempo, es decir, cuando uno termina, inmediatamente otro comienza.

3. Las partículas de desgaste poseen una geometría semiesférica, que puede generar un desgaste mediante remoción de película o remoción de asperezas.
4. Se utiliza un factor de probabilidad, que indica si un determinado contacto produce desgaste.

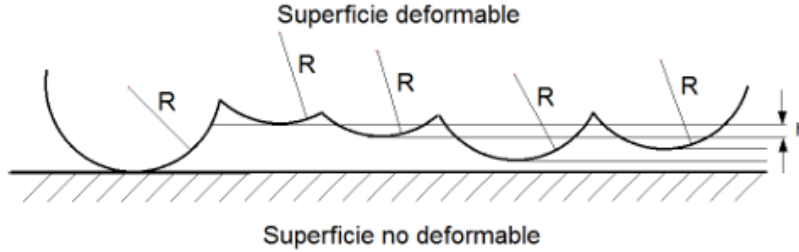


Figura 4.9: Modelo con múltiples áreas de contacto

Con el fin de verificar su modelo, Archard consideró dos superficies rugosas, representando ambas como un conjunto de esferas, tal como se aprecia en la figura 4.9. Considerando la distancia de desgaste como dos veces el radio de contacto r de la aspereza (ver figura 4.10). Posteriormente, se identificaron los mecanismos de arranque de material:

- **Remoción de película:** Se considera la profundidad del material removido β constante e independiente de la carga o del radio del área de contacto a , como se muestra en la ecuación (4.3).

$$\Delta V = \beta r^3 \quad (4.3)$$

- **Remoción de aspereza:** Se considera la profundidad a la que se remueve el material como proporcional al cubo del radio del área de contacto r . Además, γ es una constante en la ecuación (4.4)

$$\Delta V = \gamma r^3 \quad (4.4)$$

Los resultados experimentales demostraron que el modelo de remoción de asperezas representa mejor el desgaste, siendo este proporcional a la fuerza normal F_n . Teniendo en cuenta los supuestos y resultados experimentales, la pérdida total de material por unidad de longitud W está dada por la ecuación (4.5).

$$W = \frac{KF_n}{3r} \quad (4.5)$$

Donde K corresponde a la proporción de los contactos que producen desgaste.

Considerando que la tasa de desgaste lineal W es proporcional a la carga F_n , es posible simplificar la ecuación (4.5) como:

$$W = kF_n \quad (4.6)$$

Donde k es la tasa de desgaste específica, que corresponde a un parámetro empírico.

Considerando estas premisas, Archard concluyó que durante el deslizamiento de una unidad de longitud:

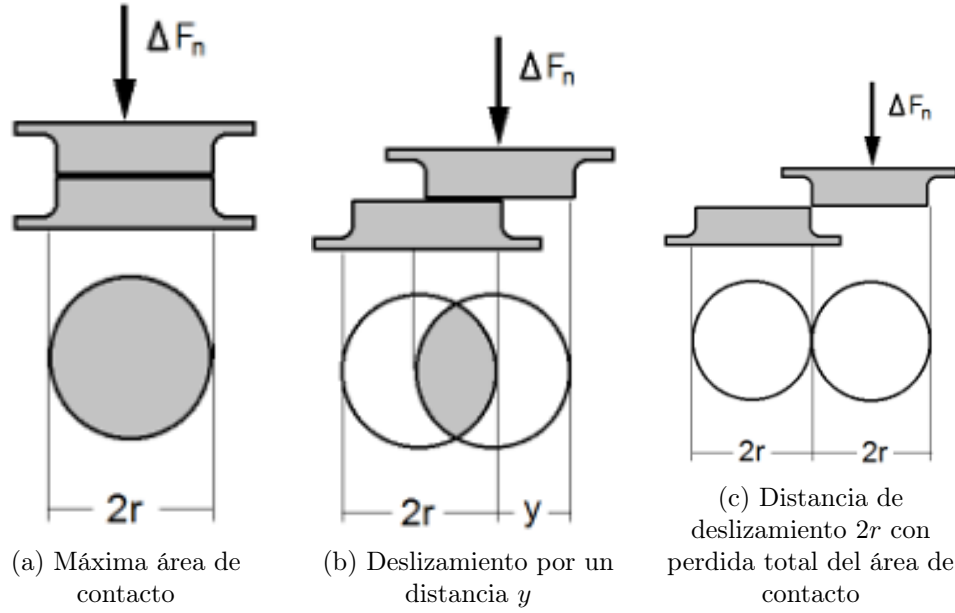


Figura 4.10: Representacion de un contacto idealizado de dos superficies deslizantes

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

(Shen et al., 2010) presentaron una modificación de la ecuación de Archard para una aplicación práctica, que se presenta en la ecuación (4.7)

$$V = \frac{F_n K \delta_t}{H} \quad (4.7)$$

Siendo, V el volumen removido por el contacto, F_n la fuerza normal, δ_t el desplazamiento tangencial de la partícula, y H la dureza del material desgastado.

Modelo de Rabinowicz

El modelo de Rabinowicz plantea que la huella de desgaste sobre el material tiene forma cónica, debido al impacto del material abrasivo con un ángulo de ataque θ con respecto a la superficie impactada, tal como se aprecia en la figura 4.11 (Rabinowicz & Mutis, 1965). Para ello, Rabinowicz relacionó el área desgastada con la fuerza normal F_n y la dureza H de la superficie blanda, como se expone en la ecuación (4.8).

$$F_n = H\pi r^2 \quad (4.8)$$

Donde r es el radio de la base del cono que penetra en la superficie.

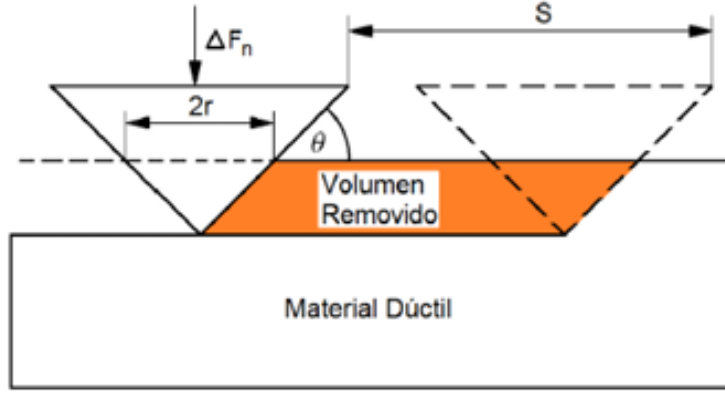


Figura 4.11: Modelo de desgaste de Rabinowicz

El volumen removido V por las partículas, al desplazarse una distancia S , viene dado por la ecuación (4.9).

$$V = \frac{F_n S \tan(\theta)}{\pi H} \quad (4.9)$$

El modelo de Rabinowicz requiere de un mayor número de parámetros en comparación con el modelo de Archard, como el ángulo de ataque θ , la distancia de desplazamiento S y la dureza del material más blando H , lo que implica un mayor costo computacional.

Modelo de Finnie

El modelo de desgaste propuesto por (Finnie, 1960), contempla el choque de una partícula sobre una superficie con un ángulo de impacto, la cual remueve material cortando la zona de colisión, como se presenta en la figura 4.12. Finnie incluye en su modelo el ángulo de impacto α , el esfuerzo de fluencia del material dúctil σ y la energía cinética de la partícula, definiendo casos para los distintos ángulos de encuentro, como se muestra en la ecuación 4.10

$$V = \begin{cases} \frac{mv^2}{8\sigma} [\sin(2\alpha) - 3\sin^2(\alpha)] & \alpha \leq 18.5^\circ \\ \frac{mv^2}{24\sigma} \cos^2(\alpha) & \alpha > 18.5^\circ \end{cases} \quad (4.10)$$

Donde m y v son la masa y la velocidad de la partícula, respectivamente.

4.4. Algoritmo Método de Elementos Discretos

Una vez presentadas las generalidades relacionadas con la modelación utilizando MED, se procederá a exponer en mayor detalle el algoritmo utilizado, sus rutinas, funciones y limitaciones existentes, previas al trabajo realizado en esta tesis de grado. Pero antes de ello, es necesario comprender los conceptos de paralelización y de algoritmos de búsqueda espacial, para tener mayor claridad de como funciona el modelo utilizado.

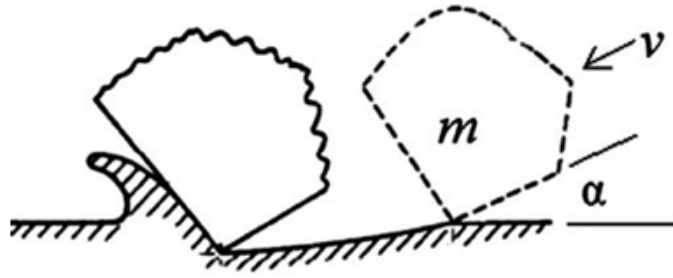


Figura 4.12: Partícula abrasiva impactando una superficie y removiendo material. (Finnie, 1960)

4.4.1. Paralelización

La paralelización de algoritmos permite la optimización de rendimientos, haciendo uso de variadas técnicas empleadas para dividir o subdividir una tarea, ciclo o proceso en distintos hilos de trabajo, que son ejecutados en simultáneo por la computadora, haciendo uso de los distintos procesadores y núcleos que la máquina tenga disponibles. El uso de este tipo de técnicas permite disminuir en gran medida los tiempos de trabajo del equipo, mejorando el rendimiento y aumentando la velocidad de ejecución de las distintas tareas.

La paralelización permite mejorar los tiempos de cálculo al usar más recursos computacionales. Aunque, hay partes del algoritmo que de manera obligatoria deben ejecutarse secuencialmente, lo que limitará la velocidad de ejecución de la tarea (Amdahl, 1967). Con base en la Ley de Amdahl, se propone como medida de la optimización el rendimiento *speedup*, el cual tiene por ecuación:

$$speedup = \frac{t(1)}{t(N)} \quad (4.11)$$

Donde $t(1)$ es el tiempo empleado para ejecutar el proceso de manera secuencial y $t(N)$ corresponde al tiempo empleado para ejecutar el proceso en un sistema paralelo de N procesadores.

Hay diferentes niveles de paralelismo, los cuales se diferencian por la cantidad de procesadores, la organización y coordinación entre estos (Gajski & Peir, 1985). Los niveles referidos son los siguientes:

- **Nivel de Instrucción:** Todas las unidades comparten una misma instrucción y la ejecutan al mismo tiempo de manera independiente.
- **Nivel de Hilo:** Distintas unidades pueden ejecutar en paralelo diferentes partes del algoritmo o programa.
- **Nivel de Datos:** Refiere a la ejecución simultánea de instrucciones idénticas que afectan a distintos grupos de datos, conocida también como vectorización.
- **Nivel de Transacciones:** Corresponde a la ejecución simultánea de múltiples hilos o procesos de diferentes transacciones.

Dentro de las operaciones paralelas existen distintos tipos de paralelismo, los cuales pueden ser implícito, donde se usa un solo procesador para la realización de tareas; y explícito, el cual hace uso de múltiples procesadores, a los cuales el software les asigna qué instrucción deben ejecutar.

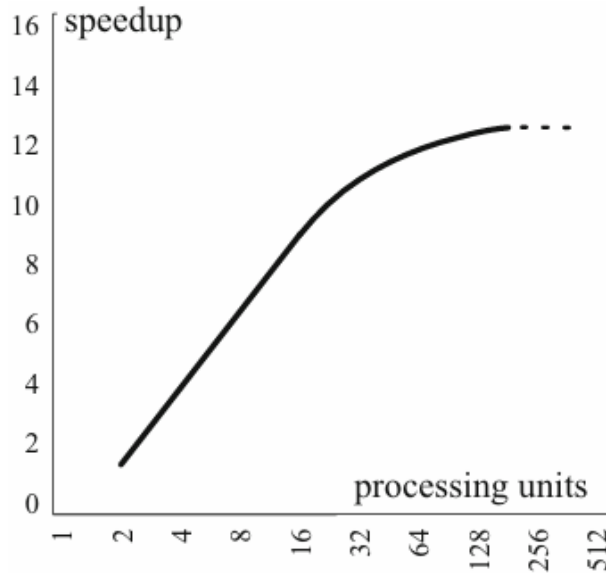


Figura 4.13: Speedup en función del número de procesadores (Trobec et al., 2018)

4.4.2. Algoritmos de búsqueda espacial

En programas MED, gran parte del tiempo es utilizado en la búsqueda de vecinos y contactos, debido al considerable número de datos que deben ser analizados de manera iterativa. Con el fin de optimizar los tiempos de ejecución se han diseñado diversos algoritmos.

La utilización de Bounding Box Algorithm se basa en distribuir los elementos en múltiples *cajas* con el objetivo de reducir las iteraciones necesarias para la búsqueda de contactos. También conocido como *Spatial Search Algorithm*, es usado en análisis de imágenes, videojuegos, etc. La implementación de estos algoritmos se puede realizar mediante distintas técnicas, como el árbol binario y el mapeo directo, las cuales son presentadas de forma resumida a continuación.

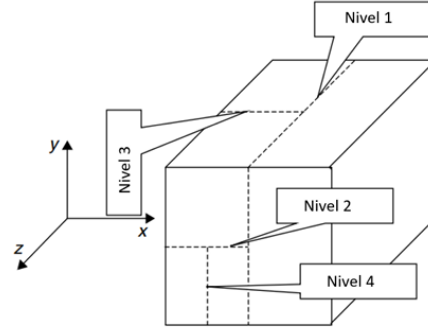
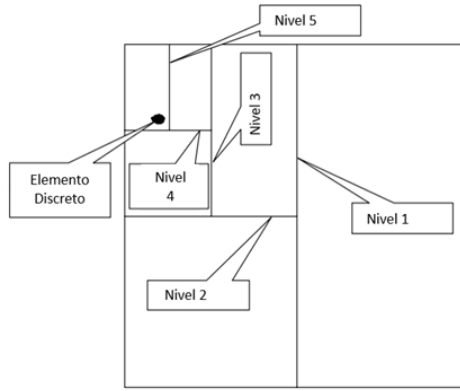
Algoritmo de detección de contactos basado en el árbol binario

La búsqueda basada en el árbol binario es un algoritmo de búsqueda espacial que divide jerárquicamente el volumen de control en celdas de diferentes tamaños. La celda de menor dimensión es tan grande como para contener el elemento discreto más grande presente en el volumen, lo que permite una búsqueda más eficiente y precisa (Munjiza, 2004).

La implementación de este método se basa en la división del volumen de control en mitades, es decir, en el nivel 1 el volumen se divide en dos partes iguales del mismo tamaño. En el nivel 2, una de las mitades se divide nuevamente por la mitad, y así sucesivamente, como se muestra en la figura 4.14a para la representación 2D y en la figura 4.14b para la representación 3D.

Para este modelo la detección de contactos consta de tres etapas:

1. **Etapla 1:** Todos los elementos discretos son mapeados en celdas.
2. **Etapla 2:** El mapeo es representado por el árbol binario, como se aprecia en la figura 4.15



(a) Subdivisiones del Espacio en 2D

(b) Subdivisiones del Espacio en 3D

Figura 4.14: Subdivisiones del espacio Árbol binario, en distintas dimensiones (Munjiza, 2004)

3. **Etapas 3:** Se realiza la detección de contactos.

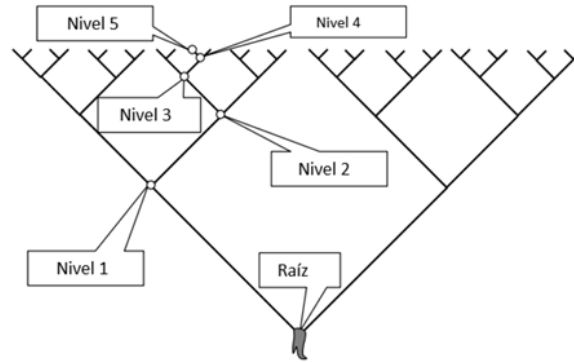


Figura 4.15: Árbol binario en 2D (Munjiza, 2004)

Algoritmo de Mapeo directo

El enfoque de mapeo directo consiste en dividir el espacio en celdas de tamaño uniforme, tal como se aprecia en la figura 4.16a para el caso 2D y en la figura 4.17 para el caso 3D. El tamaño de las celdas se selecciona de manera que el elemento discreto más grande pueda caber en una sola celda.

La detección de contactos se realiza en dos etapas:

1. **Etapas 1:** Los elementos discretos se asignan a celdas según la posición de su centroide, de forma que a cada elemento se le asigne una celda.
2. **Etapas 2:** La búsqueda de vecinos se efectúa a través de las coordenadas de las celdas, evaluando si existe contacto solamente con los elementos de las celdas vecinas, tal como se aprecia en la figura 4.16.

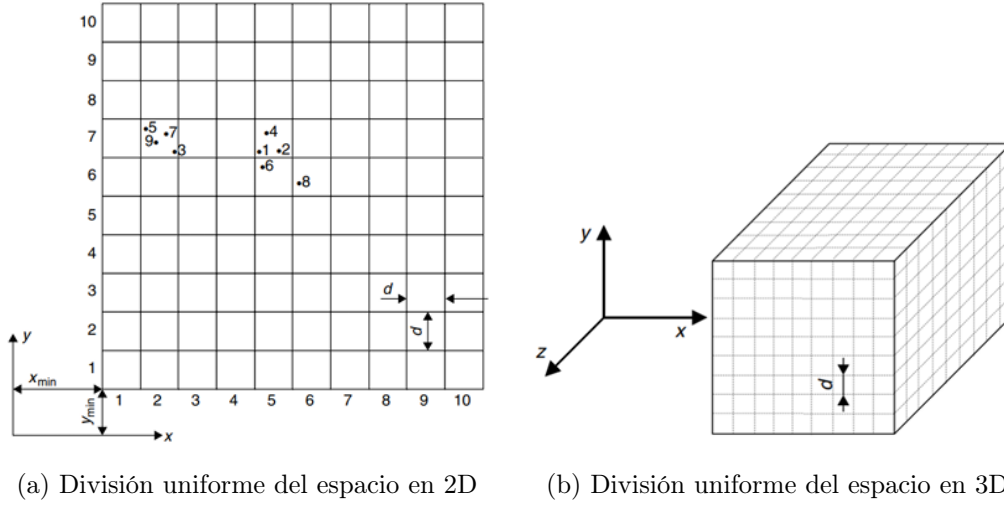


Figura 4.16: Subdivisiones del espacio mapeo directo, en distintas dimensiones (Munjiza, 2004)

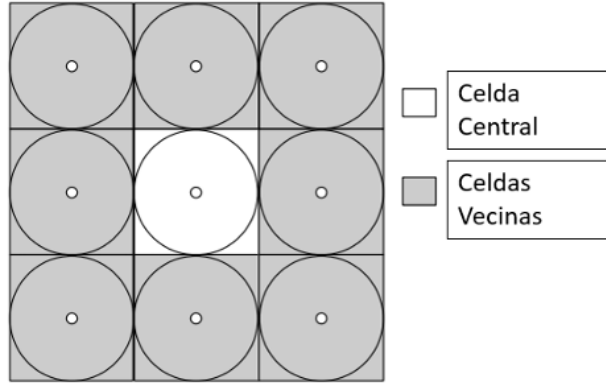


Figura 4.17: Celdas vecinas de la celda central (Munjiza, 2004)

4.4.3. Descripción del funcionamiento del modelo numérico

Para simular el desgaste abrasivo producido por la arena, se utilizó el código MED diseñado por (Knop, 2015), posteriormente optimizado por Patricio Mascaró y Nicolás Rodríguez (Mascaró, 2017; Rodríguez, 2023). Este algoritmo permite simular ensayos para medir la resistencia de materiales al desgaste abrasivo. En los trabajos anteriormente citados, se realizaron cálculos para el ensayo de rueda CITRAM, pero igualmente este código puede calcular el desgaste del ensayo presente en la norma ASTM-G65.

El algoritmo desarrollado calcula el desgaste abrasivo de la placa del ensayo por medio de la aplicación de las leyes de movimiento, leyes de fuerza-desplazamiento e integración de la posición respecto al tiempo de todas las partículas presentes en el volumen de control. Posteriormente, mediante el modelo de contacto, se obtienen las fuerzas existentes sobre cada partícula, lo que hace posible obtener su velocidad y nueva posición.

De la misma manera, se determinan los desplazamientos, rotaciones y deformaciones de los

elementos de malla de las superficies, aplicando el modelo de contacto para identificar las partículas y los elementos de malla que entran en contacto en la cara o en el borde.

4.4.4. Diagrama de Flujo

El diagrama de flujo del programa utilizado para simular el desgaste abrasivo se presenta a continuación.

1. **Seteo de Variables:** El programa establece e inicializa las variables necesarias para los cálculos.
 - **Lectura de Parámetros:** Lectura del archivo de texto con la configuración del respectivo ensayo a realizar.
2. **Lectura de malla:** Lectura de los archivos *.stl*, que contienen la información de la malla correspondiente al ensayo. En esta etapa se homologan los puntos correspondientes al mismo vértice entre dos elementos de malla, además del marcado de caras con las propiedades correspondientes.
3. **Ciclos:** Se realizan los cálculos cíclicos para cada partícula en cada paso de tiempo.
 - a) **Desplazamiento de malla:** Cálculos referentes a los desplazamientos de malla, para los componentes en movimiento del ensayo.
 - b) **Inserción de partículas:** Verificación de la existencia de partículas disponibles para la inyección, y posterior cálculo de la posición del inlet de partículas en el espacio de trabajo.
 - c) **Determinación de zonas de contacto:** Se determina una zona de la malla donde cada partícula podría impactar, generando una lista de bordes y superficies cercanas que posiblemente estén en contacto con la *i-ésima* partícula evaluada. Al ser un algoritmo de alto costo computacional, se realiza cada ciertas iteraciones, lo cual se indica en la figura 4.18 con línea discontinua. Con el fin de optimizar el rendimiento del programa se utilizó un algoritmo de búsqueda espacial, basado en bins, el cual se explica a continuación.
 - 1) **Creación de Bins:** El volumen de control establecido en los parámetros de entrada, es subdividido en secciones de un tamaño adecuado, considerando que estas no sean más pequeñas que el menor de los elementos de malla.
 - 2) **Almacenamiento de los elementos de malla en los Bins:** Se guardan los elementos de malla en los bins creados en la etapa anterior, mediante el uso de dos vectores. El primero contiene los elementos de malla en las posiciones de los bins y el segundo las posiciones de los elementos de malla del primer vector.
 - 3) **División del número de partículas en grupos para trabajo en paralelo:** Se reparte un cierto número de partículas a cada procesador, para hacer el cálculo más eficiente.
 - 4) **Generación de lista de elementos cercanos a la *i-ésima* partícula:** Se guardan en una lista los elementos dentro de las bounding box de la partícula *i-ésima*, considerando como referencia el centroide de estas, más un factor de seguridad.
 - 5) **Eliminación de elementos repetidos:** La diferencia en los tamaños de los bins produce múltiple almacenamiento de los elementos de malla en los bins. Ante esto, se deben eliminar los elementos repetidos para obtener una lista de elementos cercanos con la cual se alcancen resultados correctos.

- 6) **Generación de lista de contactos en cara y borde:** Se itera sobre la lista de elementos cercanos de cada partícula, para determinar si hay contacto con alguna cara, al estar esta a una distancia menor que el radio de la partícula respecto a su centroide.
- d) **Búsqueda de vecinos:** Se determina si la i -ésima partícula es vecina de la j -ésima a través de la verificación del criterio de búsqueda, que viene dado por la ecuación 4.12. Este algoritmo genera una lista de vecinos entre partículas. Esta, por temas de memoria, almacena hasta 120 vecinos por partícula.

$$radio_i + radio_j + \Delta_{bsqueda} > ||x||_i - ||x||_j \quad (4.12)$$

Con el fin de optimizar el rendimiento del programa se utilizó un algoritmo de búsqueda espacial, basado en el uso de bins.

- 1) **Creación de bins:** El volumen de control establecido en los parámetros de entrada, es subdividido en secciones de tamaño homogéneo y distribuidas de manera uniforme en todo el volumen de control.
- 2) **Almacenamiento de las partículas en los bins:** Se utiliza el mismo principio que para las zonas de contacto, con la salvedad de que en este caso el proceso es más simple debido a que los bins son de un solo nivel.
- 3) **División del número de partículas en grupos para trabajo en paralelo:** Se reparte un cierto número de partículas a cada procesador, para hacer el cálculo más eficiente.
- 4) **Generación de lista de partículas vecinas:** Se compara la distancia entre partículas, con un radio de búsqueda, para identificar si son vecinas o no. Solo se comparan partículas cuyos bins estén dentro de una zona de búsqueda de la i -ésima partícula.
- e) **Cálculos sobre partículas:** En esta etapa se hacen los cálculos de fuerzas y momentos sobre cada una de las partículas y por reacción sobre los elementos de malla, utilizando la lista de contactos y vecinos de las etapas anteriores.
 - 1) **Cálculos de fuerzas entre partícula y partícula:** Se calculan las fuerzas y momentos entre la i -ésima y la j -ésima partícula, basados en el modelo de contacto
 - 2) **Cálculos de fuerzas entre cara y partículas:** Se calculan las fuerzas y momentos entre la i -ésima y la q -ésima cara evaluada, basados en el modelo de contacto.
 - **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:** Se calculan las fuerzas y momentos entre la partícula i -ésima y el n -ésimo borde evaluado, basados en el modelo de contacto.
 - **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 de la cara impactada y los elementos de malla, provocando la deformación de esta.

- 4) **Homologación de giros:** Una vez deformada la malla debido a las diversas interacciones calculadas, se deben homologar los vértices en común que pertenecen a más de una cara o borde.
- 5) **Integración de la posición:** Utilizando la información de las fuerzas y momentos, se integran las velocidades y posiciones de las partículas y objetos.
- 6) **Eliminación de partículas:** Con la integración de la posición realizada, se evalúa la existencia de partículas fuera del volumen de control; en tal caso, dichas partículas son eliminadas y se marcan como posibles candidatos a reinyección.
- 7) **Cálculo del desgaste acumulado:** Se hace uso de los datos generados por la subrutina de desgaste de Archard para estimar la pérdida de masa y el volumen del sistema.
- 8) **Cálculo de energía del sistema:** Como parámetro de verificación se calcula la energía del sistema.
- 9) **Escritura de archivos:** Se escriben los archivos necesarios para la visualización y análisis de los resultados.

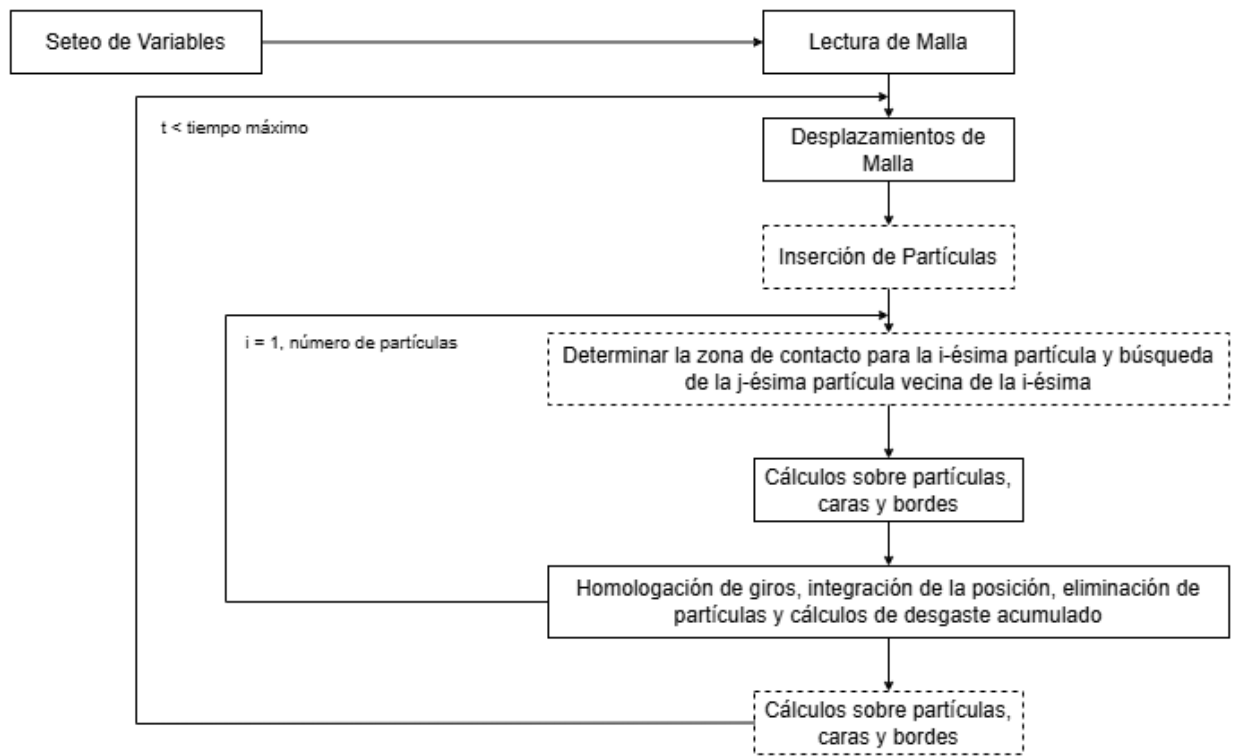


Figura 4.18: Diagrama de flujo general del código de desgaste abrasivo.

4.4.5. Representación del desgaste en MED

La representación del desgaste se realiza utilizando el modelo de desgaste de Archard (Archard, 1953), modificado por Shen (Shen et al., 2010), como se muestra en la ecuación (4.7), para obtener el

volumen removido por la acción de las partículas. Con ese fin, se utiliza en este trabajo la ecuación (4.13) con la cual es posible calcular la remoción de volumen en cada paso temporal h .

$$dV = \frac{K\|\mathbf{F}_n\|\|\mathbf{v}_t\|dt}{H} = k\|\mathbf{F}_n\|\|\mathbf{v}_t\|dt \quad (4.13)$$

Donde k , es la constante de desgaste específico del material, la corresponde a la constante de desgaste K , dividida por la dureza del material desgastado H .

La representación visual de la pérdida de volumen se obtiene al deformar la malla de la superficie afectada por el desgaste abrasivo, lo que viene dado para cada paso temporal h , por la ecuación (4.14).

$$\Delta V_i = \int_t^{t+h} DP|\delta_t|dt \approx DP|\delta_t|h \quad (4.14)$$

Siendo, ΔV_i el volumen removido en el i – *simo* elemento de malla. Adicionalmente, el desplazamiento Δd_i del i – *simo* elemento de malla, depende del área A_i y el volumen perdido ΔV_i , tal como se aprecia en la ecuación (4.15)

$$\Delta d_i = \frac{\Delta V_i}{A_i} \quad (4.15)$$

Por otra parte, el área del elemento se determina mediante la ecuación (4.16)

$$A_i = \frac{|(p_1 - p_2) \times (p_1 - p_3)|}{2} \quad (4.16)$$

Donde p_1, p_2 y p_3 son los nodos del elemento triangular. El desplazamiento del elemento d_i^{t+n} y la nueva posición de los nodos p_k^{t+n} para el tiempo $t + h$ se expresa en las ecuaciones (4.17) y (4.18) respectivamente.

$$d_i^{t+n} = d_i^t + \Delta d_i^t \cdot \widehat{\mathbf{n}}_i \quad (4.17)$$

$$p_k^{t+n} = p_k^t + \Delta d_i^t \cdot \widehat{\mathbf{n}}_i \quad (4.18)$$

Con $\widehat{\mathbf{n}}_i$ siendo el vector normal del elemento triangular de la malla. La suposición de que el elemento contactado se mueve en la dirección normal a este, la hizo Frederick Knop (Knop, 2015), considerando que en la ecuación 4.7, la fuerza que se considera para la remoción de material, es la fuerza normal. Finalmente, para suavizar la superficie deformada, se conectan los nodos adyacentes al elemento, permitiendo obtener una superficie continua y un patrón más realista del desgaste.

Al estar en movimiento la superficie mallada, es necesario determinar el nodo central P_{c_i} para calcular el desgaste acumulado sobre el i –ésimo elemento V_i , mediante la ecuación (4.19)

$$P_{c_i} = \frac{p_{1,i} + p_{2,i} + p_{3,i}}{3} \quad (4.19)$$

Seguidamente, las variaciones asociadas al desgaste se integran según la ecuación (4.20).

$$V_i = V_i + |P_{c_i}^{t+h} - P_{c_i}^t|A_i \quad (4.20)$$

Finalmente, la pérdida de volumen total V se determina como la sumatoria de los volúmenes perdidos en cada elemento de la malla V_i , mientras que la masa removida se calcula como la densidad

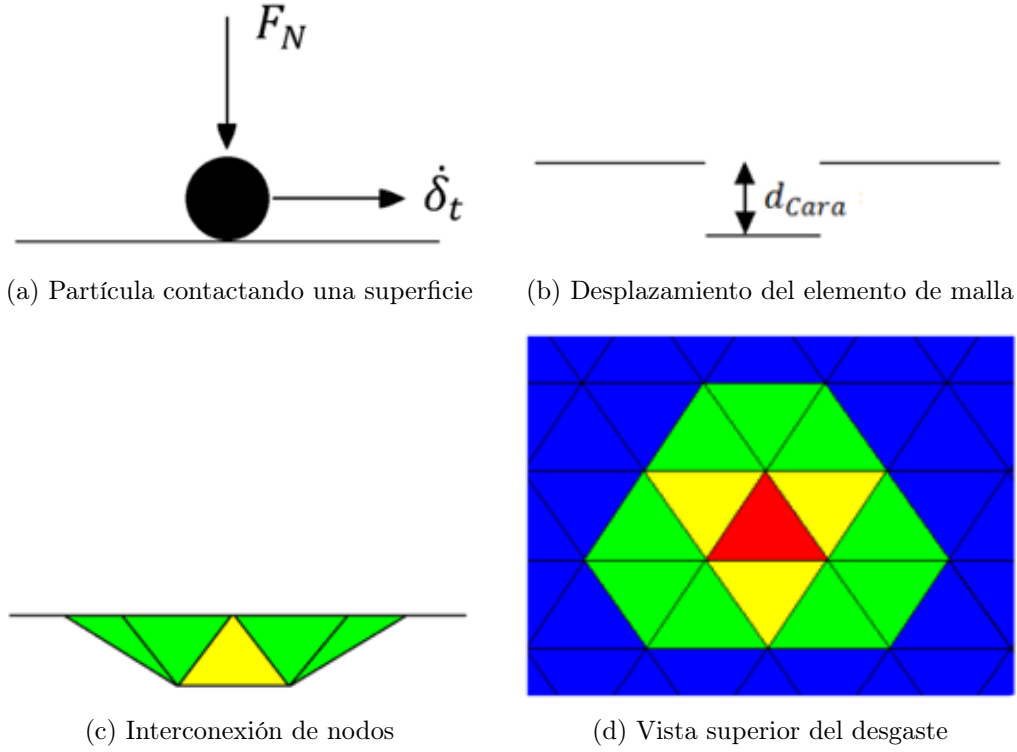


Figura 4.19: Deformación de malla (Knop, 2015)

ρ del cuerpo desgastado multiplicada por el volumen perdido V , tal como se aprecia en las ecuaciones (4.21) y (4.22).

$$V = \sum V_i \quad (4.21)$$

$$m_{removida} = V \cdot \rho_{material} \quad (4.22)$$

Se debe destacar la importancia de tener una malla con elementos de tamaño uniforme, en la zona desgastada, ya que, de existir discrepancias entre tamaños, se podrían producir errores en el cálculo de volumen y masa removida.

4.4.6. Inyección de partículas

La inyección de partículas del algoritmo MED fue optimizada por Patricio Mascaró, a través de la evaluación del instante de tiempo para la entrada de partículas, la búsqueda de partículas libres en la simulación y la inserción de partículas en el espacio de trabajo con las condiciones iniciales (Mascaró, 2017).

La evaluación del instante de tiempo para la inyección de partículas utiliza la velocidad de la matriz de partículas en la dirección $-z$, determinando la cantidad de iteraciones hasta que ocurra un desplazamiento de al menos dos radios más un delta, $2r + \delta$, como se muestra en la figura 4.20.

La búsqueda de partículas libres se realiza fuera del volumen de control, para llenar una matriz de $xcol \times ycol$ con partículas libres, las cuales posteriormente serán reinyectadas en la simulación.

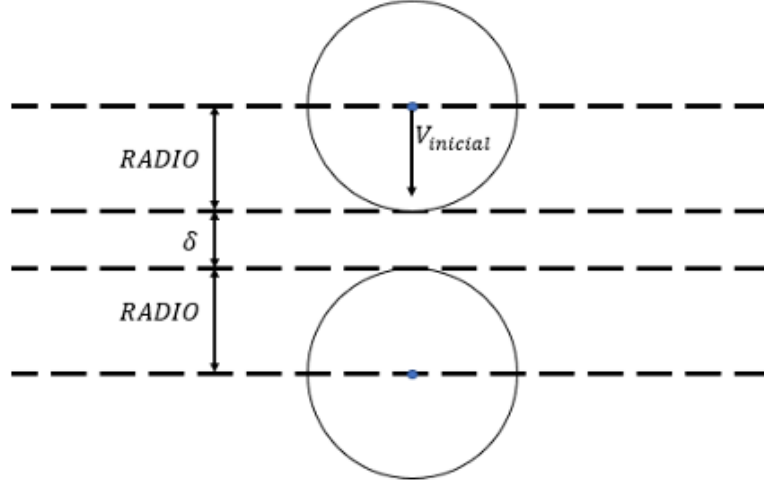


Figura 4.20: Modelo de inyección de partículas

La inserción de partículas puede ser variada según los parámetros de entrada que se entreguen, donde es posible modificar el tamaño del inlet modificando $xcol$ y/o $ycol$, la velocidad de entrada de las partículas, la distribución de tamaños, eligiendo alguna de las distribuciones preestablecidas en el programa, donde hay diferentes tipos de materiales (cobre grueso, cobre fino, arena), como también tipos de partículas (macropartículas o esferas simples).

4.4.7. Paso temporal

Seleccionar un paso temporal adecuado permite estabilizar las simulaciones y disminuir el tiempo de cómputo. En principio, el paso debe ser menor que el periodo de la frecuencia más alta en la simulación, la cual corresponde a la frecuencia de resonancia de la partícula más pequeña (Vedachalam, 2011). Con este criterio se evitan problemas de estabilidad y se asegura la convergencia en la simulación.

Con el fin de obtener un valor de referencia para la convergencia de la simulación, se utiliza el paso de tiempo crítico h_{Hertz} (Jensen et al., 2014), el cual se presenta en la ecuación (4.23)

$$h_{Hertz} = 2.87 \left[\frac{\rho_3^4 \pi r_{esfera}^3}{r_{esfera} E^2 V_{mx}} \right]^{0.2} \quad (4.23)$$

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

En el caso de tener partículas compuestas, se agrega un factor de seguridad del 20 % del paso temporal de Hertz (4.24). Frederick Knop (Knop, 2015) realizó mediciones con diferentes pasos de tiempo, hasta encontrar un factor de seguridad que entregara buenos valores de la tasa de desgaste, sin aumentar de manera excesiva el tiempo de cálculo.

$$h_{simulacin} = 0.2 h_{hertz} \quad (4.24)$$

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la búsqueda de vecinos en las cercanías de las partículas. $\Delta_{Busqueda}$ permite aumentar la eficiencia del algoritmo mediante listas de vecinos más grandes (Muth et al., 2007). Utilizando estas listas, se producen pasos sin evaluación de vecinos o zonas de contacto, es decir, "*pasos ciegos*".

$$pasos_{ciegos} = entero \left(\frac{\Delta_{Busqueda}}{h_{sim} \cdot V_{bus}} \right) \quad (4.25)$$

Siendo V_{bus} la velocidad de búsqueda de vecinos, la cual no debe ser superada para evitar interferencias entre partículas.

4.5. Implementación de los experimentos en el modelo numérico

Para poder implementar los ensayos de la rueda de desgaste en el código MED, se deben caracterizar las geometrías propuestas por Erazo, 2013 y ASTM, 2021. Así como también es necesario definir las propiedades del sólido a granel a utilizar para cada uno de estos ensayos.

4.5.1. Rueda CITRAM

Las geometrías requeridas por el programa, antes de las modificaciones realizadas en este trabajo, utilizadas para la modelación del desgaste abrasivo, se presentan en la figura 4.21

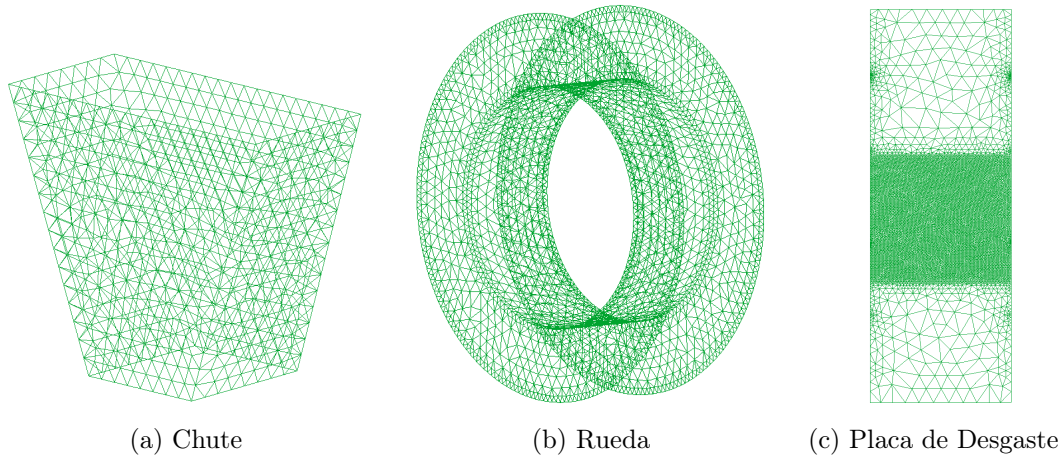


Figura 4.21: Geometrías modelo Rueda CITRAM

El número de elementos triangulares y nodos de cada una de estas geometrías se presenta a continuación, en la tabla 4.3:

Geometría	Elementos	Nodos
Chute	15089	45294
Rueda	5252	15756
Placa	18053	54159

Tabla 4.3: Mallado geometrías para ensayo Rueda CITRAM

Es importante destacar que el número de nodos y elementos triangulares corresponde a cada una de las imágenes presentadas en la figura 4.21. Cabe mencionar que estos valores para la *placa de desgaste*, pueden variar dependiendo del refinamiento que se utilice. En el caso presentado en la tabla 4.3, y en la figura 4.21c, corresponde a un refinamiento donde los elementos de menor tamaño son de 1 [mm] de borde en una configuración de malla no estructurada utilizando el programa GiD (GiD SIMULATION, 2024). Para más información respecto al mallado utilizado en las simulaciones, puede dirigirse al anexo B.

Ensayos experimentales

Erazo, 2013 realizó nueve pruebas para arena, las cuales se diferencian entre sí, por la velocidad a la cual gira la rueda de goma, como también la fuerza que aplica la placa sobre las partículas. En la figura 4.22, se logran apreciar las huellas de desgaste para cada uno de los ensayos.



(a) E1: 455 [rpm] / 3 [KPa]



(b) E2: 455 [rpm] / 5 [KPa]



(c) E3: 455 [rpm] / 7 [KPa]



(d) E4: 1040 [rpm] / 3 [KPa]



(e) E5: 1040 [rpm] / 5 [KPa]



(f) E6: 1040 [rpm] / 7 [KPa]



(g) E7: 710 [rpm] / 3 [KPa]



(h) E8: 710 [rpm] / 5 [KPa]



(i) E9: 710 [rpm] / 7 [KPa]

Figura 4.22: Huella de Desgaste de cada ensayo realizado en la Rueda CITRAM

Es posible apreciar en la figura 4.22 que la huella producida varía dependiendo de si hay más fuerza o velocidad de giro de la rueda. Por ejemplo, se logra apreciar que a mayor velocidad de giro, la huella tiende a extenderse más hacia los bordes de la placa, y en cambio, conforme se aumenta la fuerza que aplica la placa sobre las partículas, la huella tiende a alargarse en la dirección vertical. En las simulaciones se buscará acercarse a estas tendencias en los patrones de desgaste, para validar parte del modelo utilizado.

De la misma manera que se busca obtener figuras que puedan acercarse a las obtenidas en los ensayos, es necesario que el modelo sea preciso en cuanto a la cantidad de material que se está removiendo, y que esta esté en línea con el ensayo que se está simulando. Pero las escalas de tiempo presentan una dificultad a la hora de comparar este ensayo de forma directa, debido a que por un lado las pruebas en laboratorio toman varios minutos en ser completadas, mientras que las simulaciones solo alcanzan a modelar un par de segundos del experimento completo, debido al gran tiempo de cálculo asociado al MED. Por ello, para saber si la cantidad de material removida es la correcta, no se comparará respecto al total de material removido, sino la tasa a la cual este se remueve. Esto es gracias a la ecuación de Archard, la cual indica que el desgaste es una función lineal en el tiempo, por lo cual, la pérdida de masa por unidad de tiempo, para un mismo ensayo, debería mantenerse constante a lo largo del tiempo. Con esta información, es posible obtener un parámetro con el cual comparar si la remoción de material que muestra el modelo, corresponde o no con la del ensayo que se busca simular.

Ensayo	Material removido [g]	Tiempo de ensayo [s]	Tasa de desgaste [g/s]
1	1.11	586.8	$1.8916 \cdot 10^{-3}$
2	1.09	436.5	$2.4971 \cdot 10^{-3}$
3	1.27	410.4	$3.0945 \cdot 10^{-3}$
4	1.20	455.9	$2.6322 \cdot 10^{-3}$
5	1.59	469.5	$3.3866 \cdot 10^{-3}$
6	1.96	479.6	$4.0867 \cdot 10^{-3}$
7	0.92	428.1	$2.1490 \cdot 10^{-3}$
8	1.17	440.8	$2.6542 \cdot 10^{-3}$
9	1.44	451.0	$3.1929 \cdot 10^{-3}$

Tabla 4.4: Tabla de tasas de desgaste para ensayos Rueda CITRAM

En la tabla 4.4, se presentan de forma resumida los datos relacionados con la remoción de material de cada uno de los ensayos ya presentados.

4.5.2. Rueda ASTM–G65

Este ensayo originalmente no estaba incluido en los trabajos de investigación previos a esta tesis, por lo cual se crearon nuevas geometrías basadas en las medidas de los elementos del experimento de la rueda ASTM–G65. Las mallas utilizadas se presentan en la figura 4.23.

El número de elementos triangulares y nodos de cada una de estas geometrías se presenta a continuación, en la tabla 4.5:

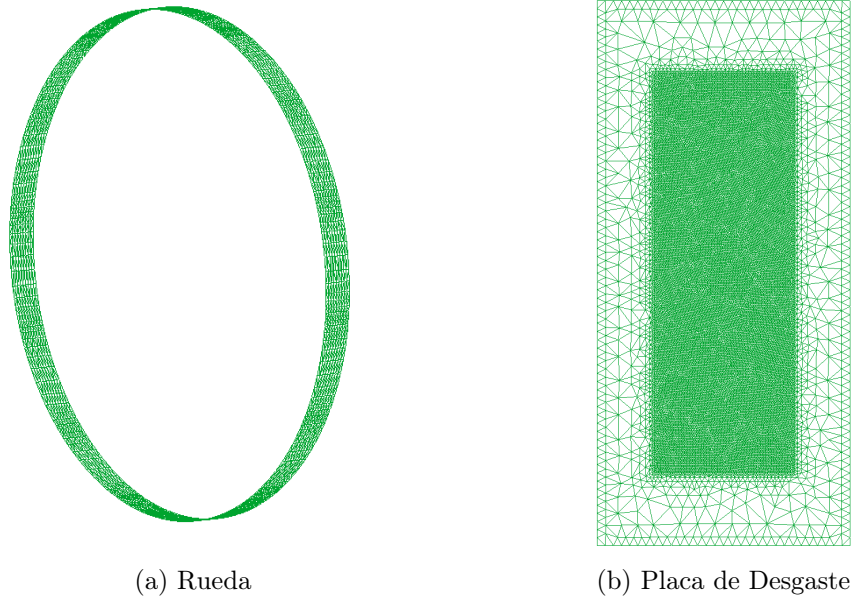


Figura 4.23: Geometrías modelo Rueda ASTM–G65 (ASTM, 2021)

Geometría	Elementos	Nodos
Rueda	3060	9180
Placa	41586	124758

Tabla 4.5: Mallado geometrías para ensayo Rueda ASTM

Al igual que con la placa de la rueda CITRAM, el número de elementos y nodos de la placa de desgaste para el modelo del ensayo ASTM–G65 puede variar según la refinación de la malla que se realice. En el caso de la figura 4.23b, corresponde a una malla con elementos triangulares de menor tamaño, de 0.17 mm de lado. Mayores detalles respecto a las diferentes refinaciones utilizadas se encuentran en el anexo B.

Ensayos experimentales

Rodrigo Solis, en su trabajo de título realizó diversas pruebas de desgaste de aceros TWIP, siguiendo la norma ASTM–G65 (Solis, 2022), para analizar el comportamiento de estos materiales a la abrasión por arena.

Las huellas de desgaste en este ensayo son todas similares, a diferencia de lo visto con la rueda CITRAM, como se puede apreciar en la figura 4.24. Esto se debe a que todos los ensayos se realizan con los mismos parámetros en cuanto a caudal de entrada, distancia de desgaste, entre otros, siendo solo el tipo de material lo que cambia entre experimentos.

A diferencia de las pruebas para la rueda CITRAM, donde se buscará simular los patrones de crecimiento de la rueda según el aumento de fuerzas aplicadas por la placa y velocidades de giro de la rueda; para las modelaciones con la rueda ASTM, se analizará la consistencia en la huella de desgaste, esperando apreciar que conforme se prolongue el tiempo simulado, la huella pueda producir

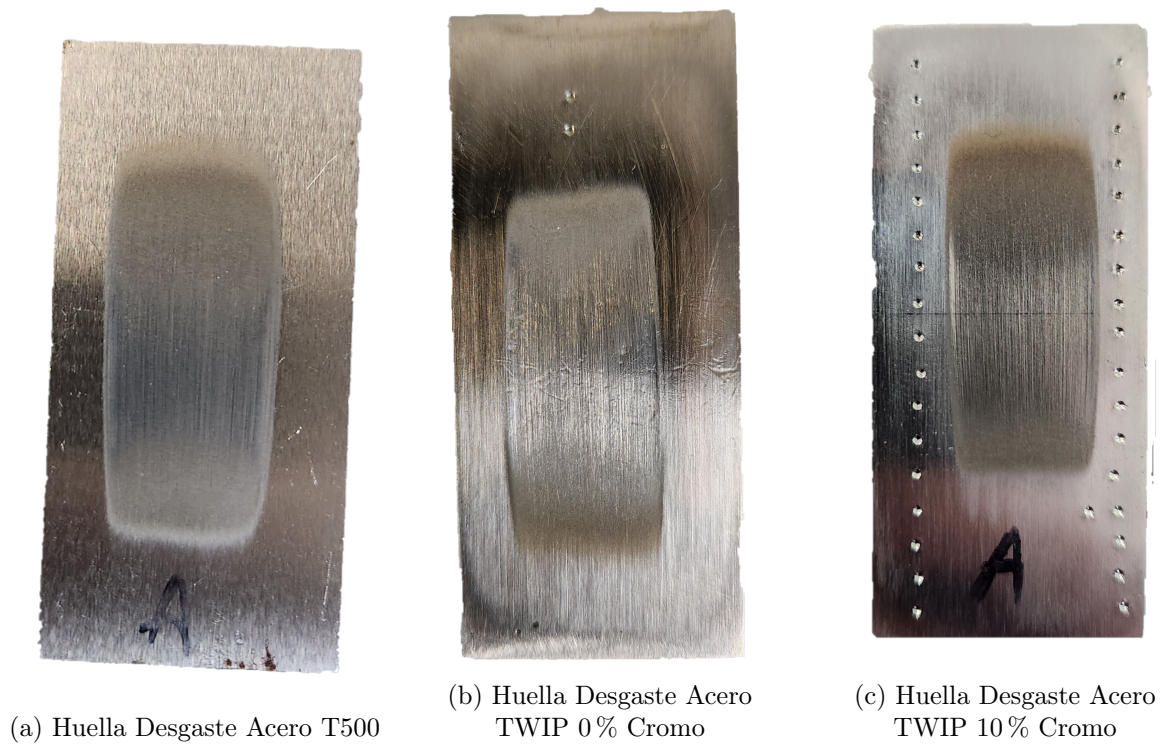


Figura 4.24: Huella de Desgaste para Ensayo ASTM-G65

la forma que se logra apreciar en la figura 4.24.

Junto con estudiar la forma de la huella, también es necesario considerar si la cantidad de material que está siendo removido corresponde con el ensayo que se está simulando, para ello, al igual que antes, se utilizarán las tasas de desgaste para determinar si el modelo logra aproximar de manera correcta estos parámetros. En cuanto a los datos obtenidos del trabajo de Solis, 2022, se tienen múltiples mediciones para cada uno de los materiales estudiados, por lo cual, las tasas de desgaste con las cuales se compararán los resultados obtenidos del modelo, serán las tasas de desgaste promedio para cada material.

Ensayo	Material removido [g]	Tiempo de ensayo [s]	Tasa de desgaste (T_{ex}) [g/s]
1	0.0779	784.4	$9.93 \cdot 10^{-5}$
2	0.0709	784.4	$9.04 \cdot 10^{-5}$
3	0.0644	784.4	$8.21 \cdot 10^{-5}$
4	0.0685	784.4	$8.73 \cdot 10^{-5}$
Promedio T-500: $8.98 \cdot 10^{-5}$			

Tabla 4.6: Tabla de tasas de desgaste para ensayo Acero T-500 Rueda ASTM

Ensayo	Material removido [g]	Tiempo de ensayo [s]	Tasa de desgaste (T_{ex}) [g/s]
1	0.0911	784.4	$1.16 \cdot 10^{-4}$
2	0.0865	784.4	$1.10 \cdot 10^{-4}$
Promedio Hadfield: $1.13 \cdot 10^{-4}$			

Tabla 4.7: Tabla de tasas de desgaste para ensayo Acero Hadfield Rueda ASTM

Ensayo	Material removido [g]	Tiempo de ensayo [s]	Tasa de desgaste (T_{ex}) [g/s]
1	0.1094	784.4	$1.39 \cdot 10^{-4}$
2	0.0892	784.4	$1.14 \cdot 10^{-4}$
3	0.1016	784.4	$1.295 \cdot 10^{-4}$
4	0.0927	784.4	$1.18 \cdot 10^{-4}$
Promedio TWIP 0%Cr: $1.25 \cdot 10^{-4}$			

Tabla 4.8: Tabla de tasas de desgaste para ensayo Acero TWIP 0%Cr Rueda ASTM

Ensayo	Material removido [g]	Tiempo de ensayo [s]	Tasa de desgaste (T_{ex}) [g/s]
1	0.0847	784.4	$1.08 \cdot 10^{-4}$
2	0.0832	784.4	$1.06 \cdot 10^{-4}$
3	0.0909	784.4	$1.15 \cdot 10^{-4}$
4	0.0842	784.4	$1.07 \cdot 10^{-4}$
Promedio TWIP 5%Cr: $1.09 \cdot 10^{-4}$			

Tabla 4.9: Tabla de tasas de desgaste para ensayo Acero TWIP 5%Cr Rueda ASTM

Ensayo	Material removido [g]	Tiempo de ensayo [s]	Tasa de desgaste (T_{ex}) [g/s]
1	0.0875	784.4	$1.12 \cdot 10^{-4}$
2	0.0969	784.4	$1.24 \cdot 10^{-4}$
Promedio TWIP 10%Cr: $1.18 \cdot 10^{-4}$			

Tabla 4.10: Tabla de tasas de desgaste para ensayo Acero TWIP 10%Cr Rueda ASTM

Cabe destacar que en las tablas 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 se indica el tiempo del ensayo para poder simplificar el cálculo de la tasa de desgaste. Este valor es el equivalente a la distancia de desgaste para el experimento, ya que la norma no está basada en un tiempo máximo simulado, sino en la distancia de desgaste, que se obtiene según cuántas vueltas da la rueda. Por lo tanto, el valor de 784.4 [s] se obtiene al considerar que la rueda durante el ensayo gira a un determinado valor de rpm.

4.6. Actualización del modelo para modelación de las partículas de arena

Este trabajo se centra en el estudio de la modelación de la huella de desgaste, obtenida mediante el código MED desarrollado en el DIMEC, para obtener resultados que se correspondan con

los obtenidos en los ensayos de laboratorio. Previo a este escrito, el código es capaz de modelar mineral de cobre de forma correcta, tanto en valores de tasas de desgaste como en la forma de la huella. Pero al momento de realizar ensayos con arena, el código presenta diferencias apreciables en la forma de la huella obtenida en la figura 4.25. En las siguientes secciones se detalla el trabajo realizado, centrado en las modificaciones del código base, con el fin de modelar el desgaste de la arena.

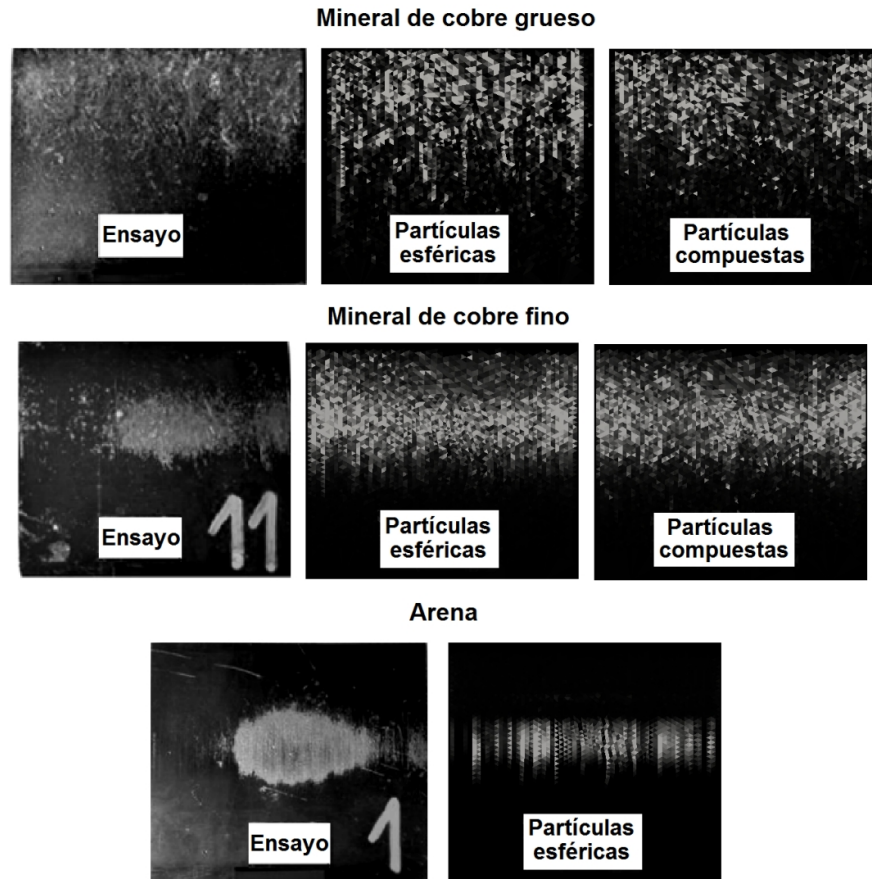


Figura 4.25: Comparación entre huellas de desgaste ensayo y simulación. (Knop, 2015)

Pero además de la forma que presentan las huellas de desgaste, se busca que los valores de las tasas de desgaste obtenidas coincidan con los obtenidos en las pruebas de laboratorio, donde para la arena, que es el material de interés de esta investigación, se obtiene el resultado presentado a continuación, en la tabla 4.11 (Mascaró, 2017).

Representación	T_{sim} [g/s]	T_{ex} [g/s]	Error [%]
Esferas	0.0024188	0.0018916	27.9

Tabla 4.11: Error tasa de desgaste (Mascaró, 2017), para ensayo Rueda CITRAM

Como fue presentado en los objetivos del presente trabajo de investigación, se realizaron diversos ajustes a rutinas puntuales del código programado en el DIMEC. Dichas modificaciones se detallan

en las próximas secciones de este capítulo, con tal de explicar el proceso mediante el cual se obtuvieron los resultados que serán posteriormente presentados para validar la representación de la huella de desgaste de arena mediante este modelo.

4.6.1. Simplificación de la geometría para el ensayo

Los ensayos realizados en trabajos anteriores correspondían a la rueda CITRAM, la cual hace uso de un chute para el ingreso de partículas al volumen de control del ensayo. Para las simulaciones realizadas en esta tesis, se reemplaza la entrada de partículas mediante el llenado del chute, por un inlet, el cual inyecta el flujo másico correspondiente al ensayo.

Las razones detrás de este cambio van relacionadas a simplificar la simulación, haciendo que el único lugar donde se concentren partículas, y por tanto, haya gran cantidad de contactos que se analicen, sea la zona donde se desgasta la probeta. Los contactos extra de los que se escribe se producían porque en los trabajos previos (Knop, 2015; Mascaró, 2017; Rodríguez, 2023), se buscaba llenar el chute, y que luego cayeran las partículas desde este, haciendo que existieran gran cantidad de estas en la simulación, que saturaban la lista de contactos máximos que se calculaban en cada paso de tiempo, lo que hacía que partículas que se encontraban en la simulación, no se estuvieran analizando, debido a que la lista de contactos se encontraba llena. Además, al ya no tener que llenar el chute, se reduce la cantidad de partículas en la simulación, y por tanto, ya no se tiene el problema de que puedan haber partículas que no están siendo analizadas pese a estar en el volumen de control.

A su vez, esta modificación facilita el cambio entre ensayos en una misma máquina, ya que al no estar leyendo el archivo de geometría que corresponde al chute, los dos ensayos son similares respecto a sus otros elementos involucrados, los cuales son una rueda y la placa de desgaste.

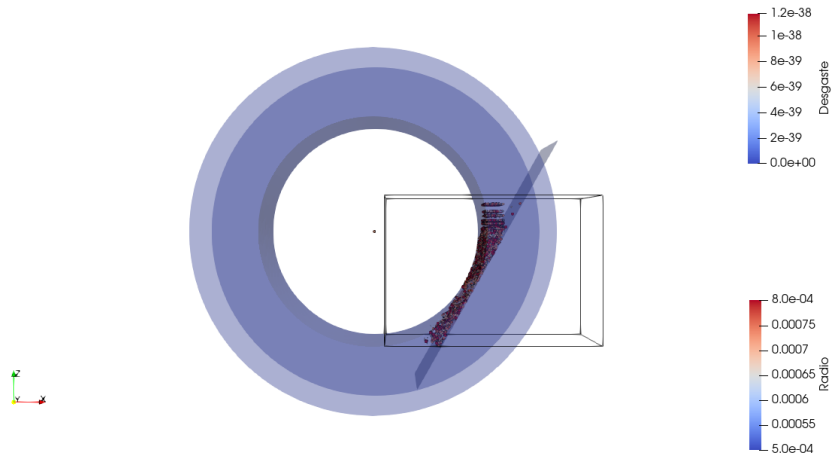


Figura 4.26: Geometría para modelación Rueda CITRAM (postprocesadas en Paraview)

Como se logra apreciar en las figuras 4.26 y 4.27, ambos ensayos constan de la rueda de desgaste que gira a una velocidad determinada según el experimento que se modele; la placa de desgaste, la cual está representada por una superficie que aplica presión a la rueda, haciendo que las partículas desprendan material en esta; y, por último, un inlet, el cual debe permitir el ingreso de la cantidad

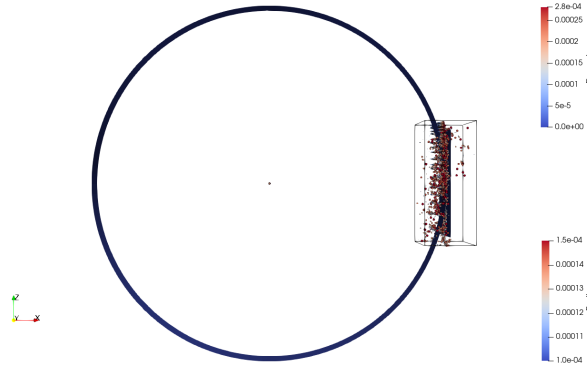


Figura 4.27: Geometría para modelación Rueda ASTM (postprocesadas en Paraview)

de partículas equivalentes al flujo másico del ensayo a modelar. De estos tres elementos, tanto el movimiento de la placa como el inlet para las partículas deben ser calibrados con tal de simular las mismas condiciones de los ensayos. En las secciones siguientes, se detallará cómo fueron calibrados estos componentes para obtener los resultados que serán posteriormente presentados en este trabajo.

4.6.2. Limitación del movimiento de la placa de desgaste

Uno de los puntos clave de los ensayos modelados es el movimiento de la placa de desgaste, la cual presiona las partículas con una fuerza determinada contra la rueda de caucho, provocando el desprendimiento de material en la placa. No calibrar de forma correcta este movimiento puede llevar a situaciones en las que la placa modelada se comporte de manera irreal; por ejemplo, traspasando la superficie de la rueda.

Primero, es necesario presentar una explicación sobre el movimiento de la placa. Con tal de representar de forma correcta los ensayos, las probetas desgastadas deben acercarse a la rueda para que se formen los patrones de desgaste. En el experimento, como se comenta en el capítulo 4.2.1, esto se hace mediante el uso de pesos colocados en un extremo del aparato. En las simulaciones, esto se hace reemplazando los pesos por momentos aplicados a la distancia donde estaría el pivote correspondiente para cada ensayo, como se presenta en las figuras 4.28a y 4.28b.

Como se logra apreciar en la figura que representa al ensayo de la rueda CITRAM (4.28a), el momento se aplica en el extremo superior de la placa, ya que para la simulación de este ensayo no solo se trabaja con la probeta desgastada, sino también con todo el portaprobetas. Al compararlo con el ensayo real, presentado en la figura 4.4, se aprecia que el pivote está justo en el extremo superior de la placa. En cambio, para el ensayo de la rueda ASTM (4.28b), solo se simula la probeta, que es representada por la placa desgastada, y por tanto, el momento en este caso se aplica en la posición donde debería estar el pivote del portaprobetas, lo cual se logra apreciar en la figura 4.3.

Una vez clarificado cómo funciona el movimiento de las placas en los ensayos, hay que entender también las restricciones aplicadas para que estos movimientos funcionaran de manera correcta. En los trabajos previos, se establecía un límite fijo en la dirección X positiva para un punto en particular en la placa, con tal de que este no superara nunca ese límite, similar a lo que se presenta en la figura 4.31, pero en vez de que el límite se pusiera en base a la parte inferior de la placa, se hacía en un punto arbitrario, que para la malla usada en los ensayos con mineral de cobre quedaba alrededor del

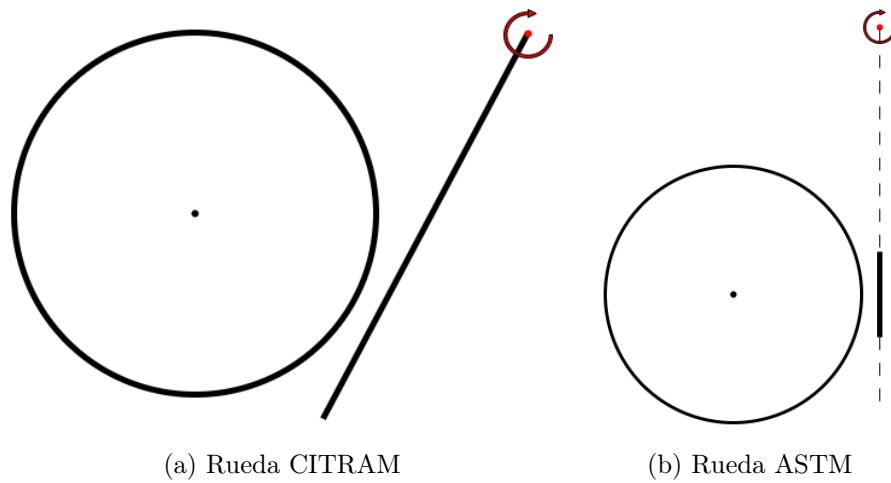


Figura 4.28: Esquema aplicación de los momentos para la simulación de ensayos de la rueda de desgaste

centro de la placa. Esta práctica funcionó de manera correcta para los minerales de cobre, debido a su granulometría mayor, pero trae problemas al utilizar granulometrías pequeñas, tales como la de la arena, porque al refinar la malla, se perdía la referencia comentada. Uno de estos problemas puede ser que la placa llegue a atravesar la rueda, como se presenta en la figura 4.29, por una mala calibración de este límite.

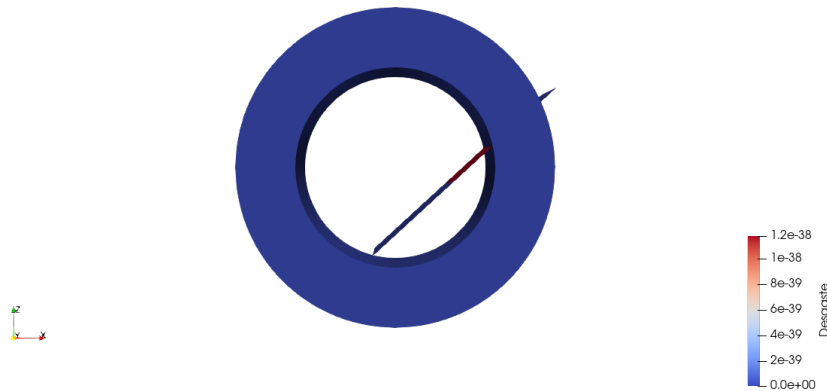


Figura 4.29: Falla en el movimiento de la placa de desgaste.

Las dificultades relacionadas con la manera en que se programó el movimiento de la placa de desgaste se pueden resumir en los siguientes tres puntos:

1. **El punto utilizado como referencia era arbitrario**, lo cual provocaba que, al cambiar de mallas o de ensayo, se perdiera la referencia, ocasionando problemas en la simulación.
2. **La placa se queda quieta en ciertos momentos**. Este no es un problema grave como tal, pero al analizar el comportamiento de la placa en los ensayos, es posible apreciar que la rueda

se va *hundiendo* levemente en la probeta desgastada, producto de la remoción del material y de la fuerza que presiona la placa contra la rueda. Por ello, se esperaría que, conforme el ensayo avance, la placa cada vez se pegue más a la rueda, sin traspasarla. Esta situación es imposible si se tiene un límite fijo que la rueda no puede superar, ya que llegará un momento en el ensayo en el que la placa no podrá avanzar más, lo cual terminará afectando la cantidad de material removido, así como la huella obtenida al final de la simulación.

3. **El proceso de selección del límite era manual;** para que el código funcionara, se establecía un límite manualmente, lo cual implicaba horas de calibración mediante prueba y error para determinar el límite correcto de un determinado ensayo. Esto hacía que cambios de malla, granulometría, entre otras pruebas llevaran mucho tiempo de preparación. Además, este límite para el ensayo de la arena es muy difícil de determinar de forma aproximada, debido a la pequeña granulometría de esta, lo cual hace que la línea entre tener un ensayo que funcione perfectamente y otro donde haya una falla en los primeros instantes de la simulación fuera muy delgada.

Luego de analizar y estudiar las limitaciones comentadas previamente, se realizaron correcciones para mejorar el comportamiento de la placa de desgaste en la simulación. La mejora implementada se basa en dos partes.

1. **Acercamiento inicial:** Para evitar problemas de la placa traspasando la rueda de desgaste en los instantes iniciales del cálculo, ya que aún no hay partículas entre estas dos superficies, el avance de la placa de desgaste es limitado en su extremo inferior para asegurar que se pueda formar una película de partículas entre ambas geometrías y así permitir que la simulación avance de manera esperada, siempre que los demás parámetros estén bien calibrados.
2. **Desgaste de la placa:** En las simulaciones de desgaste realizadas, el cálculo de desgaste comienza en un tiempo posterior al de la simulación, debido a que en los primeros instantes de la modelación, se presentan grandes movimientos en la placa. Por lo tanto, se da un espacio de tiempo para que esta se estabilice, como se aprecia en la figura 4.30. Así, una vez alcanzado el tiempo de inicio de desgaste, la limitación de movimiento de la placa cambia a una posición variable, con el fin de simular de mejor manera el hundimiento de la rueda en la probeta. Esto se logra limitando el movimiento mediante un condicional agregado en el código, donde, se analiza si la distancia entre la placa y la rueda es mayor al radio de la partícula más grande.

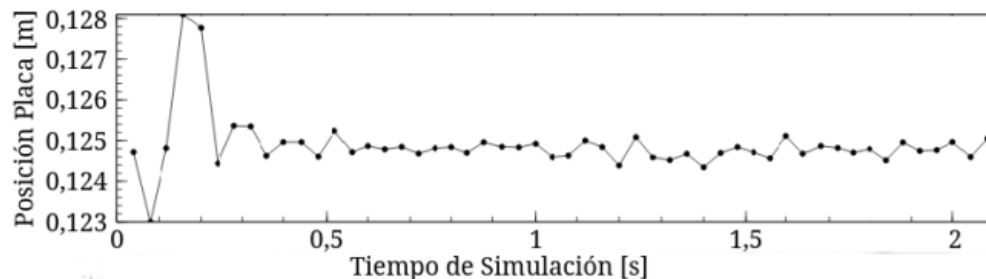


Figura 4.30: Estabilización de la placa (Mascaró, 2017)

Con tal de brindar mayor claridad a las modificaciones realizadas, se presentan las siguientes figuras. En la figura 4.31, se logra apreciar el comportamiento de la placa para los instantes iniciales

de la simulación, donde aún no hay partículas entre las geometrías involucradas. En este caso, se realiza una limitación del movimiento de la placa en la dirección horizontal, permitiéndole a la placa acercarse hasta un determinado punto, lo suficientemente cercano para permitir que las partículas puedan pasar y formar una *película* que separe la rueda de la placa de desgaste.

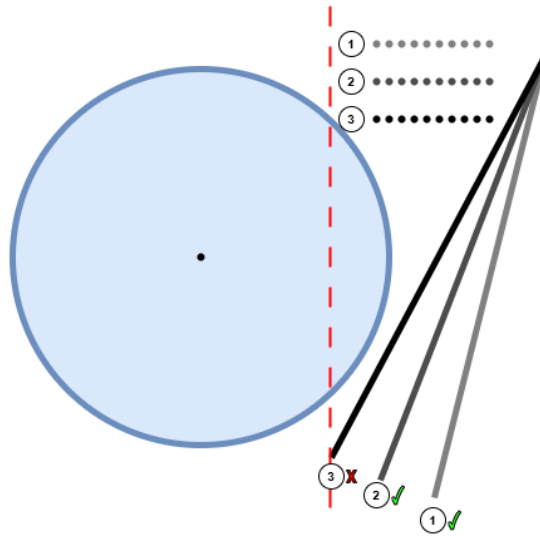
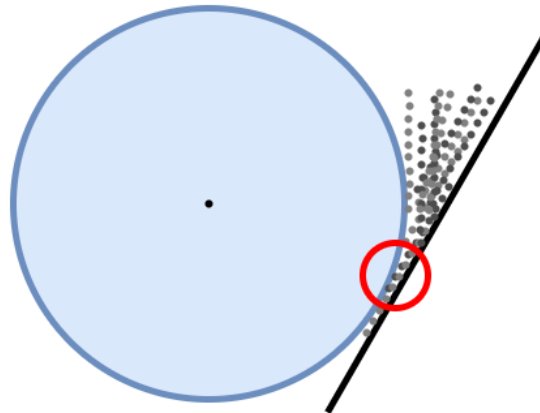


Figura 4.31: Ilustración de la limitación del movimiento para instantes iniciales

En la figura 4.33, se aprecia cómo se comporta la rueda una vez hay partículas entre la rueda y la placa.



(a) Rueda de Desgaste

Figura 4.32: Ilustración de la limitación del movimiento luego de que la placa se estabilice

Tal como se explicó, esta modificación se aplica para poder simular el hundimiento de la rueda en la placa de desgaste, que se produce gracias a la remoción de material producido, que sería imposible de conseguir si se tuviera un límite fijo a lo largo del tiempo. Para producir este ajuste variable de

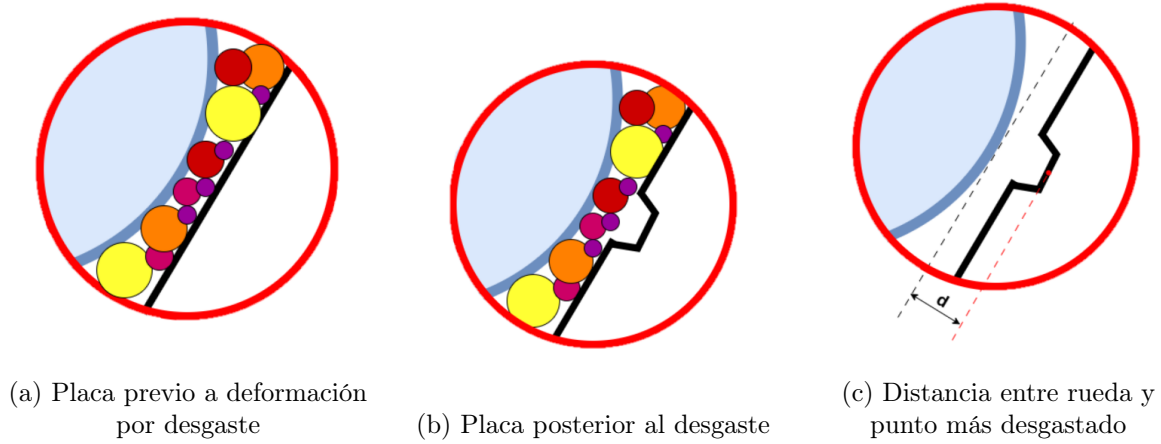


Figura 4.33: Detalle de la limitación del movimiento luego de que la placa se estabilice

la posición, se limita el movimiento con respecto a la menor distancia entre placa y rueda, para así permitir que las partículas no se queden atascadas en la simulación. Para explicar el funcionamiento de esta modificación, se hará referencia a subrutinas del programa, previamente explicadas en el capítulo 4.4.4 y actualizadas de la forma presentada a continuación:

1. En la rutina **Desplazamientos**, se genera un vector que guarda la posición de la placa luego de que esta se moviera por efecto de la fuerza aplicada. (4.33a)
2. Luego, en la rutina **Integración de la posición**, se comparará el vector guardado anteriormente, con las coordenadas de la placa posterior al desgaste de esta, durante un instante de tiempo. (4.33b)
3. Al tener estos valores, se busca el punto más desgastado, para aquel instante de tiempo, el cual corresponderá a la coordenada que sufrió el mayor desplazamiento luego de aplicarse el desgaste. Este punto, por la geometría de los ensayos, se debería encontrar en la región donde las partículas tienden a concentrarse durante la simulación.
4. Una vez identificada la coordenada más desgastada para ese determinado instante, se calcula la distancia entre ese punto más desgastado y el radio de la rueda, obteniéndose un valor δ que será utilizado como referencia para saber si la placa puede o no acercarse más a la rueda. (4.33c)
5. Finalmente, la diferencia obtenida se compara con el radio de la partícula más grande (r_{mx}) que entra al volumen de control. Si la diferencia δ es mayor que r_{mx} , la placa puede seguir acercándose a la rueda. En caso contrario, se mantendrá la posición actual como límite para el movimiento, hasta que la placa se desgaste lo suficiente como para permitir nuevamente el acercamiento, sin generar problemas de traspasos entre superficies.

4.6.3. Detección de contactos en el borde

La última modificación realizada al programa original tiene relación con la detección de contactos en los bordes de la placa. El interés de ajustar este parámetro nace de la incertidumbre del porqué

la huella de desgaste para el ensayo de la rueda CITRAM se estaba concentrando principalmente en los bordes, en vez de en el centro, que es lo esperado para estos ensayos, como ya se ha presentado anteriormente. Ante lo cual, luego de un análisis paso a paso del código, se encuentra que la rutina **Fuerzas Borde-Partícula** está calculando más desgaste del que debería. Para entender mejor esta situación, se presenta la figura 4.34.

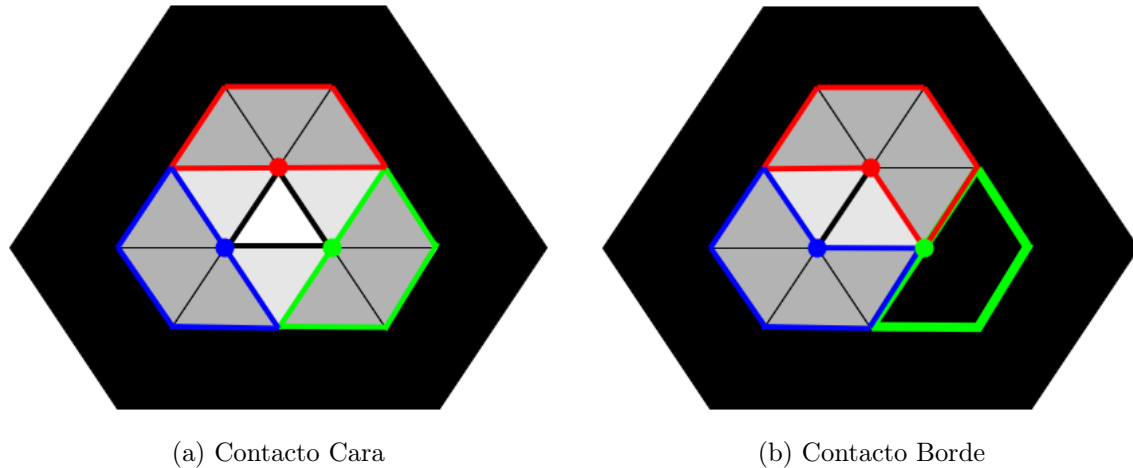


Figura 4.34: Ilustración de como se debería deformar la malla, según el tipo de contacto sufrido

La razón por la cual se dice que la rutina **Fuerzas Borde-Partícula** está calculando más desgaste del que debería es lo que se aprecia en la figura 4.34. Como ya fue mencionado, el modelo actual solo marca el desgaste como se muestra en la figura 4.34a, sin importar si la partícula contacta con la cara en sí o con un borde de esta. Pero, como se presenta en la figura 4.34b, en realidad, el movimiento de triángulos para un contacto en el borde debería ser menor, tal como se aprecia en la figura, ya que si se sigue la lógica de conectar los nodos separados presentada en la figura 4.19, para un contacto en el borde de un elemento de malla, solo se deberían separar dos nodos en vez de tres, lo cual haría que se reconectarán menos elementos de malla. Por esto, habrá parte de la malla que no debería sufrir deformación, pero lo hará, como se aprecia en la figura 4.34b, donde la parte coloreada en verde no debería moverse, ya que si se impactara el borde que une los nodos rojo y azul, el nodo verde no se vería afectado por el desplazamiento producido. Pero este desplazamiento ocurrirá, porque el modelo está construido de manera que todos los impactos marquen la placa como si fueran un contacto de cara.

Es claro que se podría agregar esta modificación al código con el fin de diferenciar la deformación de la malla para contactos en bordes y en caras, pero aquello se sale de los objetivos de este trabajo, ya que al hacer eso se estaría trabajando con un modelo de representación de desgaste distinto al que se busca validar en este trabajo. Sin embargo, en este trabajo se quiere analizar el modelo utilizado en las investigaciones previas, donde el desgaste solo se representa según el patrón de la figura 4.34a. Es aquí donde, luego de analizar las rutinas **Fuerzas Cara-Partícula** y **Fuerzas Borde-Partícula** detalladamente, se encuentra que ambas están calculando las fuerzas normales aplicadas por cada partícula de la misma manera, lo cual hace que exista una tendencia del código a desgastar más de lo que debería en los contactos en el borde. Para modificar esto, en la rutina **Fuerzas Borde-Partícula** se hace más exigente la condición para considerar que la partícula está en contacto con

el elemento de malla, lo cual se hace mediante la siguiente comparación de la ecuación (4.27)

$$rr < dist \quad (4.26)$$

$$dist = r_i \cdot c \quad (4.27)$$

Donde rr es la distancia entre partícula y cara/borde, $dist$ corresponde al límite para el cual se considera que una partícula está en contacto, r_i es el radio de la i -ésima partícula, y c es la constante con la cual se ajusta el valor para determinar si hay contacto o no. Originalmente, se trabaja con $c = 1$ en ambas rutinas, pero con la intención de compensar por el desgaste extra, se decide que para la rutina **Fuerzas Borde-Partícula** se utilizará un valor menor. Esto reduce las fuerzas F_N en esta rutina (Ecuación (4.28)), porque el cálculo de la fuerza normal, obtenido al usar el modelo viscoso de Hertz, depende de la diferencia entre rr y $dist$, como se presenta en la ecuación (4.29)

$$F_N = (-k_N \cdot \sigma^{1.5}) + d_n \cdot v_r \quad (4.28)$$

$$\sigma = |rr - dist| \quad (4.29)$$

Se debe de destacar que en la ecuación (4.29), d_n también depende del valor de σ , y que k_N es la desgaste de constante específico. Teniendo esto en cuenta, se realizan diferentes pruebas para analizar cuál sería el mejor valor para la constante c , con tal de que la huella se comporte como se espera en los ensayos mostrados. Finalmente, el valor calculado es $c = 0.25$, donde se aprecia que la huella se comporta de mejor manera, en comparación con la base ($c = 1$) y con otros valores probados.

4.7. Caracterización y calibración del solido a granel

Además de trabajar sobre la geometría de los ensayos, se hicieron modificaciones a las partículas que entran al sistema, las cuales serán detalladas a continuación.

4.7.1. Distribución de partículas

Las simulaciones realizados en trabajos previos, fueron modelando la arena como partículas esféricas simples, las cuales tenían todas un diámetro de 1.6 milímetros (Knop, 2015; Mascaró, 2017; Rodríguez, 2023). Esto no es del todo exacto con lo que se aprecia en la realidad, por el hecho de que los sólidos a granel tienen una distribución de tamaños, la cual se obtiene mediante un tamizado del material, tal como se aprecia en la figura 4.35.

Tamiz []	Tamiz [μm]	Mineral [gr]	[%]	[%] Acumulado
16	1180	0	0	0
20	850	0.1	0.03	0.03
30	600	3.2	0.98	1.01
40	425	54.8	16.84	17.85
50	300	155.4	47.74	65.59
70	212	98.7	30.32	95.91
100	150	9.9	3.04	98.95
Fondo		3.4	1.05	100

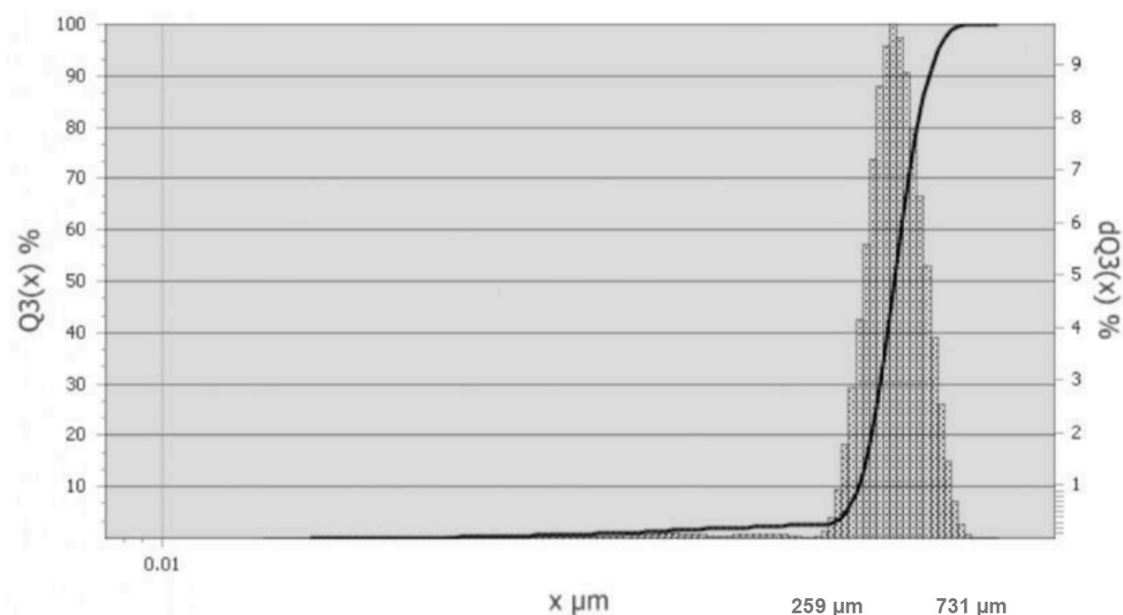


Figura 4.35: Granulometría Arena de Fundición (Solis, 2022)

Tabla 4.12: Tabla Granulometría Arena de fundición usada en el ensayo de la Rueda ASTM

Aun así, para este trabajo, se busca modelar arena con diámetros que se encuentran entre 0.2 y 0.3 milímetros, lo cual nunca se había realizado antes. Por esto, se trabajará con una distribución de tamaños para la arena, con tal de estudiar si existe un impacto en la forma de la huella obtenida, así como en los resultados de la tasa de desgaste calculada. Debido a esto, en la rutina **Seteo de variables**, se agregan dos nuevas configuraciones para las granulometrías, una para la modelación de la rueda CITRAM (*granulometría 6*) y otra que será utilizada en la modelación del ensayo de la rueda ASTM-G65 (*granulometría 7*). El detalle de estas se presenta en las tablas 4.13 y 4.14.

Partícula	Radio [mm]	Densidad [kg/m^3]
1	0.5	2876
2	0.533	
3	0.566	
4	0.599	
5	0.633	
6	0.666	
7	0.699	
8	0.733	
9	0.766	
10	0.8	

Tabla 4.13: Distribución tamaños granulometría 6

Partícula	Radio [mm]	Densidad [kg/m^3]
1	0.1	2170
2	0.1055	
3	0.1111	
4	0.1166	
5	0.1222	
6	0.1277	
7	0.1333	
8	0.1388	
9	0.1444	
10	0.15	

Tabla 4.14: Distribución tamaños granulometría 7

Es relevante destacar que para el ensayo de la rueda CITRAM, no se tienen registros precisos respecto al tamizado de las partículas; solo se sabe que todas eran menores de 1.6 [mm] de diámetro. No obstante, para estudiar el comportamiento de la huella, utilizando una granulometría no constante, se prueban los valores presentados en la tabla 4.13. Por último, el valor de la densidad utilizado corresponde al valor calibrado por Mascaró, 2017, para este ensayo en particular. A diferencia del ensayo CITRAM, como se aprecia en la tabla 4.12, sí se cuenta con la información de tamizado para el ensayo de la rueda ASTM, por lo cual se utiliza este como referencia. También, en la tabla 4.14, se aprecia que esta solo cubre partículas desde 0.2 a 0.3 [mm] de diámetro, puesto que en la documentación de los ensayos realizados por Solis, 2022, se detalla que la granulometría utilizada está entre estos valores. Además, en múltiples modelaciones MED, se suelen a utilizar solo los tamaños más predominantes, con tal de evitar partículas muy grandes que podrían dañar la representación al sobredesgastar una zona, o partículas muy pequeñas, lo cual implica usar pasos de tiempo menores, aumentando la duración de los cálculos. Finalmente, el valor de la densidad utilizado para modelar la rueda ASTM no es el mismo que el de la rueda CITRAM, debido a que las arenas son diferentes. Por esto, se buscó en la literatura un valor adecuado para esta variable, utilizando finalmente el mismo valor que Grasser et al., 2024, puesto que la arena que utilizan es similar a la de este ensayo.

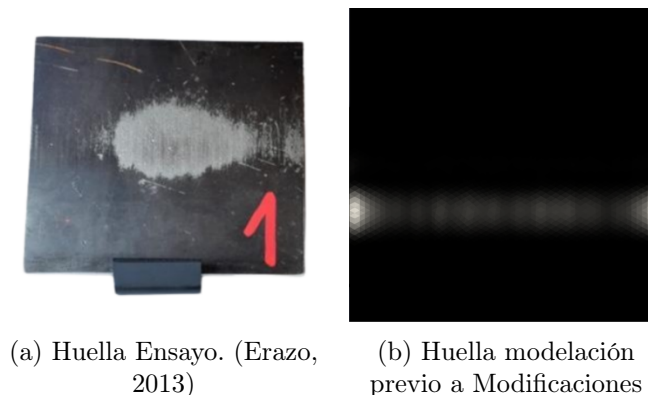


Figura 4.36: Huellas de desgaste ensayo y simulación para arena en rueda CITRAM.

Otra motivación para realizar este cambio es estudiar si el comportamiento de las partículas cambia entre simulaciones con todas las partículas del mismo tamaño. En específico, se busca anali-

zar el problema de la concentración de la huella de desgaste en los bordes para el ensayo de la rueda CITRAM, donde el desgaste tiende a concentrarse en los bordes de la placa de desgaste, junto a las tapas que tiene la rueda modelada. Esto se debe a que, al tener todas las partículas el mismo tamaño, desgastan lo mismo, dondequiera que estén; en cambio, con una distribución, puede ser que pasen más partículas de tamaño menor por los bordes que por el centro, produciendo cambios en el patrón de desgaste.

4.7.2. Inyección de Partículas

El cambio más fácil de apreciar en lo que respecta a geometrías, es la remoción del chute por el cual ingresaban las partículas en trabajos anteriores. Este cambio está motivado porque los contactos con el chute, no son el centro de este estudio; además, el remover esta geometría y cambiarla por un inlet para la entrada de partículas permite manejar con mayor precisión el flujo de material que entra al sistema, así como reducir los períodos sin desgaste. Esto se debe a que, al no tener el chute, la entrada de partículas puede ser más cercana a la placa o rueda. En general, este cambio termina brindando mayor flexibilidad, sin ninguna pérdida apreciable a la hora de hacer las simulaciones. En la presente sección se detallan las diferentes configuraciones de entradas de partículas estudiadas, con tal de determinar cuál brinda los mejores resultados para cada experimento.

Como se ha visto previamente, ambos ensayos modelados trabajan con diferentes flujos másicos. Por lo tanto, una primera preocupación previa al cálculo es determinar que está entrando la cantidad de arena correcta para cada ensayo. Para hacer esto, se divide la masa de las $xcol \times ycol$ partículas que entran al ensayo en cada inyección por el tiempo de inserción correspondiente a la configuración de parámetros que se opere, el cual se determina como se presentó en 4.7.2.



Figura 4.37: Diagrama vista superior Inlet

Al saber el flujo másico que entraba al sistema en cada simulación realizada, se comenzó el proceso de ajuste del inlet para las partículas. Para ambos experimentos se probaron diferentes opciones, pero finalmente se verificaron principalmente con tres tipos de entradas. De estas, dos son para la rueda CITRAM; esto se debe a que durante las pruebas se observaron diferentes patrones según qué tan grande fuera $xcol$, por lo cual se decidió probar con una configuración amplia (figura 4.38) y otra angosta (4.39), con tal de poder estudiar si la forma del inlet para este modelo tiene o no efectos en los resultados obtenidos.

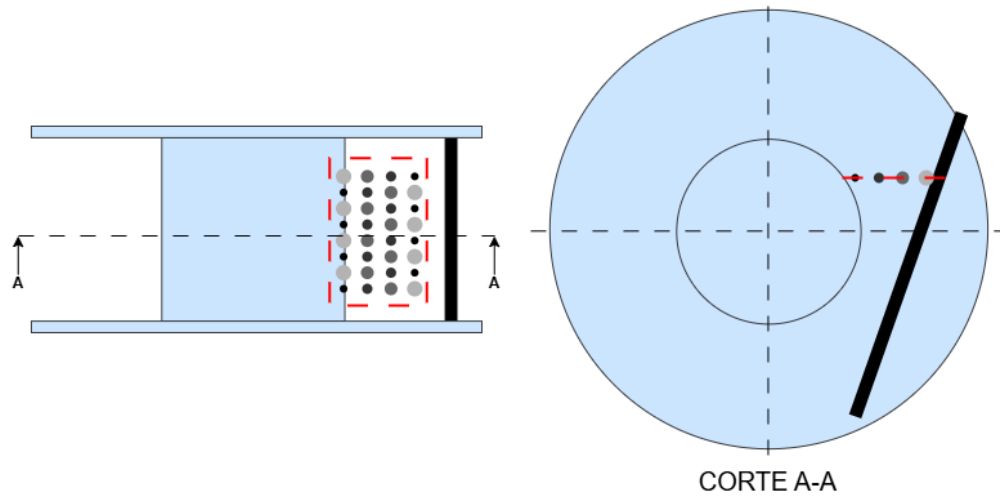


Figura 4.38: Inlet CITRAM A

En cambio, para la rueda ASTM, se utilizó una sola configuración, la cual está inspirada en el ensayo original, donde el inlet se extiende a lo largo de la placa, incluso en las regiones donde las partículas de arena no contactan con la rueda. También se realizaron pruebas con una entrada de partículas que se extendiera solo en la zona donde estaba la rueda; pero se descartó esta opción por dificultades con el movimiento de la placa, en específico, al tener que ajustar el flujo másico con menos partículas, estas tienen que entrar con mayor velocidad en una zona menor, lo cual provoca que se demore más en estabilizarse, y a la vez se daban casos de *efecto rebote*, donde la placa, por efecto de la fuerza de las partículas que entraban, se movía demasiado hacia atrás, y luego al volver a la posición que le correspondía golpeaba con más fuerza de la esperada, produciendo fallas en la representación y desgastando en exceso algunos puntos en la geometría.

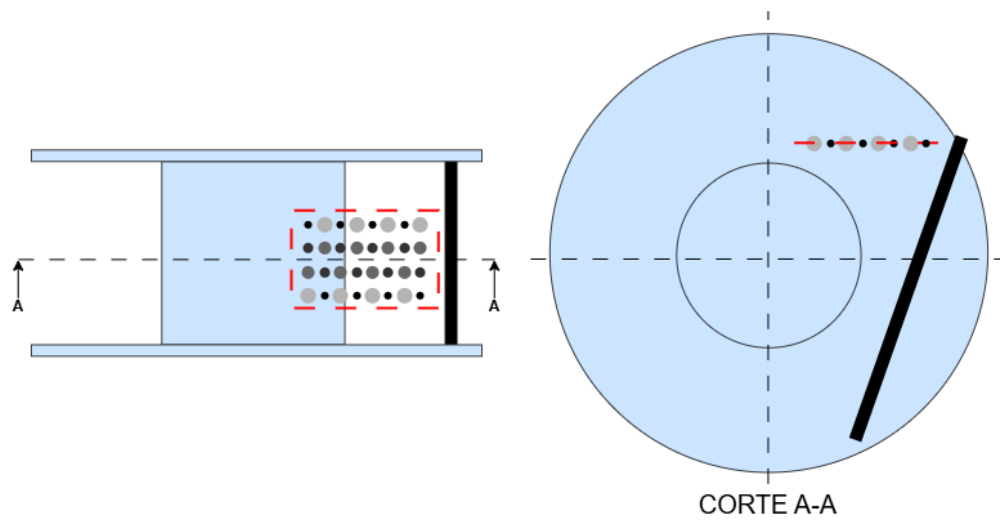


Figura 4.39: Inlet CITRAM B

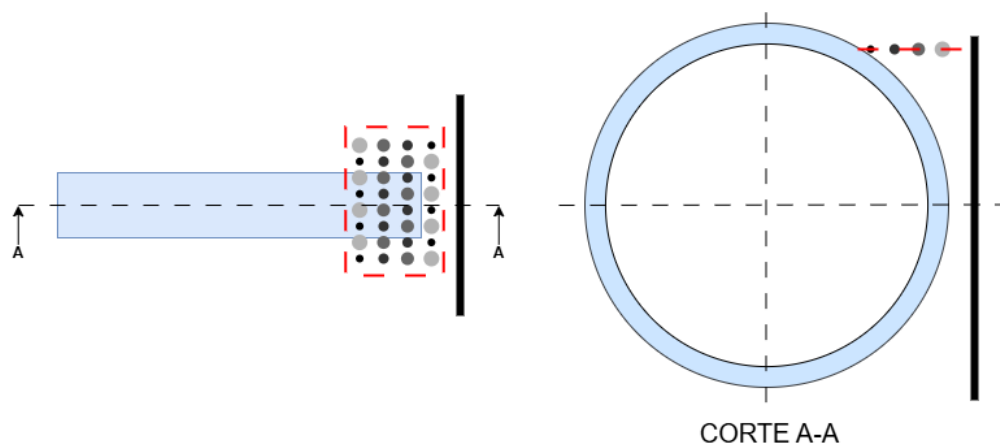


Figura 4.40: Inlet rueda ASTM

Capítulo 5

Representación del desgaste

En esta sección se presenta información sobre: las especificaciones técnicas de los servidores utilizados para realizar los cálculos de cada ensayo, el software que fue empleado para poder mostrar los resultados obtenidos por el modelo, y, por último, los parámetros de entrada de los diferentes ensayos realizados.

5.1. Especificaciones Técnicas Servidores

En esta investigación, se utilizaron distintos servidores, con diferentes especificaciones técnicas, para poder realizar los cálculos del desgaste. Se trabajó tanto con máquinas del DIMEC, como también con servidores de la Universidad George Mason, de Fairfax County, Virginia, EEUU.

5.1.1. Servidores DIMEC

Los servidores del DIMEC utilizados fueron **LEGACY** y **PROLIANT**, dedicados a los alumnos que trabajan en el AULA CIMNE.

■ **LEGACY**

- Sistema Operativo: Debian GNU/Linux 11
- Procesador: Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2687W 0 @ 3.10GHz – 3.8 GHz
- Núcleos: 32
- Memoria RAM: 100 Gb

■ **PROLIANT**

- Sistema Operativo: Ubuntu 22.04.4 LTS
- Procesador: Intel Xeon Silver 4110 CPU@ 2.1 GHz – 3.0 GHz
- Núcleos: 32
- Memoria RAM: 128 GB

5.1.2. Servidores George Mason

Se agradece la gentileza del profesor Rainald Lohner y el College of Science, Center for Computational Fluid Dynamics, George Mason University, quienes permitieron el uso de sus servidores **Ganga** y **Jamuna**. Ambos comparten la misma configuración, que se presenta a continuación.

- Sistema Operativo:
- Procesador: Intel Xeon Gold 6226 CPU@ 2.9 GHz – 3.9 GHz
- Núcleos: 64
- Memoria RAM: 1 TB

5.2. Softwares para Postproceso de resultados

Una parte fundamental de la investigación se basa en poder observar la huella de desgaste producida luego de terminada la simulación, con el fin de comparar esta con los resultados del ensayo. Para hacer esto, se utilizaron diferentes programas, de los cuales se explicará en detalle cómo se realizó el análisis de las huellas.

5.2.1. Paraview

Paraview es un software de código abierto, usado para el postprocesamiento de resultados en modelaciones científicas. En esta investigación, fue utilizado para poder visualizar los movimientos de las geometrías, la entrada de partículas, como también las huellas de desgaste producidas por la interacción de las partículas con la placa de desgaste. Las modelaciones de los ensayos postprocesadas en Paraview son presentadas en las figuras 4.26 y 4.27. Este software posee múltiples herramientas, las cuales permiten revisar los resultados obtenidos desde múltiples ángulos, en distintos instantes de la modelación, hacer comparaciones entre varios ensayos a la vez, entre otros. Las configuraciones de parámetros usadas en el postproceso para obtener las figuras presentadas se detallan en el anexo C.

Cabe destacar que el código tiene dos configuraciones para marcar en la placa el desgaste de la partícula, las cuales son: *Desgaste* e *Impacto*. La diferencia visual entre estos dos tipos de representación del contacto de la partícula viene dada por la cantidad de triángulos que se colorean luego de que una partícula toca la placa de desgaste.

Al comparar los resultados finales de las modelaciones en un mismo ensayo, se pueden apreciar pequeñas diferencias en las imágenes, tal como se logra observar en la figura 5.3. Como se observa que al utilizar la coloración *Desgaste*, la huella de los contactos tiende a ser un poco más difusa, esto debido a que se utiliza información tanto del elemento impactado como de los adyacentes a este para presentar la remoción de material. Mientras que en la huella que se marca al usar la coloración *Impacto*, se logran apreciar el trazado de las partículas con mayor detalle, por el hecho de que en este caso solo se colorea el elemento impactado por la partícula, y no los adyacentes. Al tener estas dos opciones, se debe determinar cuál es la más adecuada para poder representar el desgaste realizado. En trabajos previos se ha preferido utilizar la coloración *Impacto* para el postproceso, pero aquello era considerando solo la rueda CITRAM, por lo cual, se decide analizar cuál de las dos opciones

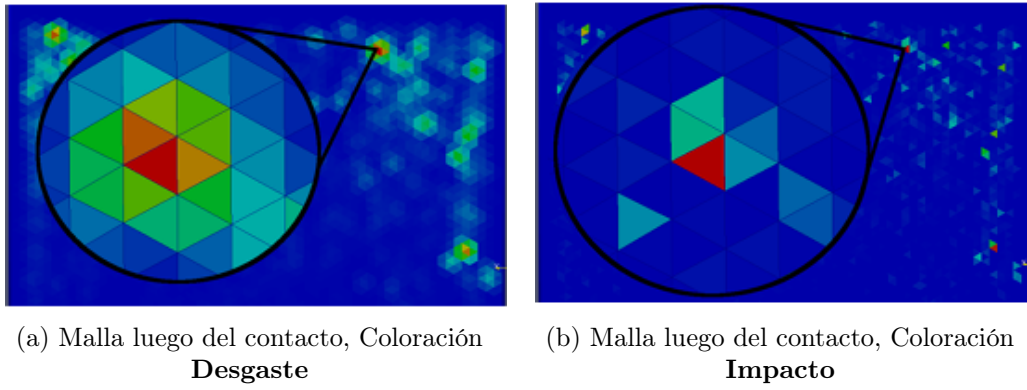


Figura 5.1: Comparación esquemas para la coloración de los contactos en Paraview (Mascaró, 2017)

entrega resultados más cercanos a lo visto en los resultados de los ensayos.

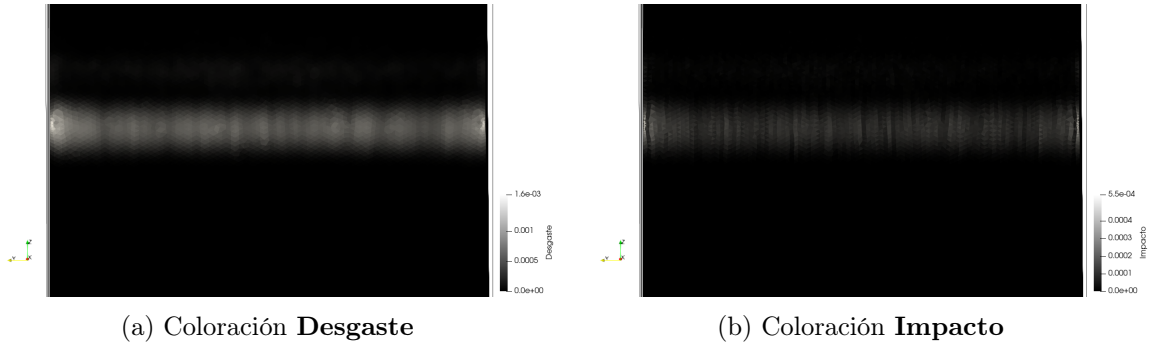


Figura 5.2: Comparación esquemas para la coloración de los contactos en Paraview Rueda CITRAM

Es en el ensayo de la rueda CITRAM donde se encontrará la mayor diferencia entre ambas coloraciones presentadas para el desgaste. Esto debido a la concentración de material removido a los bordes de la placa, donde se encuentran las tapas que presenta este ensayo. Si se miran en detalle las figuras 5.2, en particular los bordes, se observa un color blanco más predominante al usar la coloración *Desgaste* (5.2a), a diferencia de *Impacto* (5.2b), donde el desgaste se ve bastante más uniforme, esto debido a que en la primera se tiene un efecto de *sobre-marcaje*, donde, como se colorean más triángulos que el impactado, se tendrán algunos triángulos que se irán coloreando aún cuando no hayan sido impactados, por lo cual, en caso de contactar con una partícula en otro instante, se pueden dar situaciones como la comentada. Considerando lo anterior, es fácil determinar que la coloración *Impacto*, es la que brinda una mejor representación de la huella. Esto porque, para las figuras presentadas, las cuales están representando el mismo instante de tiempo y con un error en la tasa de desgaste menor al 5 %, se esperaría una huella uniforme y poco marcada, esto debido a que se simulan unos pocos segundos, lo cual se aprecia de mejor forma con la coloración *Impacto*.

Mientras que para la rueda ASTM, es difícil poder apreciar una diferencia clara entre ambos modelos de coloración, tal como se logra apreciar en la figura 5.3. Por lo cual, con tal de mantener la consistencia en el postproceso para ambas imágenes, se decide elegir la coloración *Impacto*, al igual que con la rueda CITRAM.

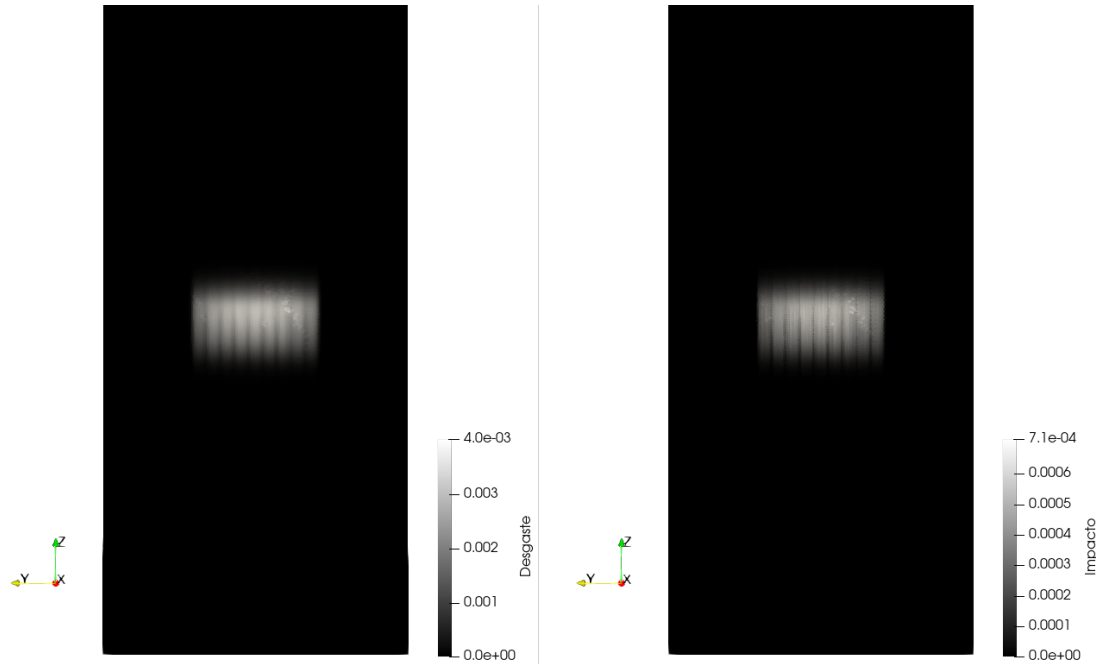
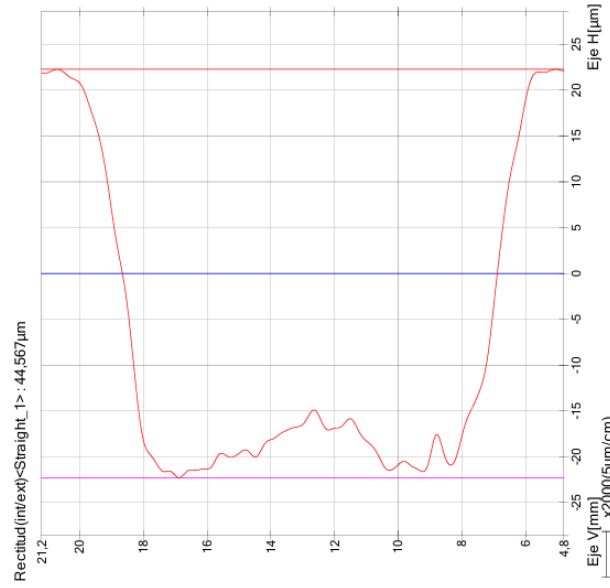


Figura 5.3: Comparación de la placa en al final de la modelación del ensayo de la Rueda ASTM. Coloración desgaste (izquierda); Coloración Impacto (Derecha)

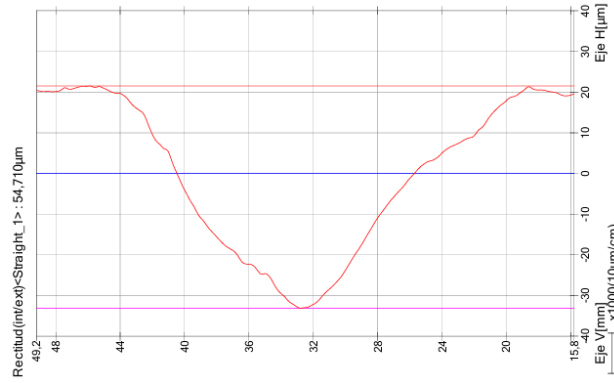
Pese a que con este programa, ya se pueden obtener figuras con las cuales analizar el comportamiento del modelo, se decide buscar otras opciones para postprocesar las huellas de desgaste obtenidas. Esto está principalmente motivado por el hecho de querer analizar cortes transversales y longitudinales de la placa desgastada, que es algo que no se pudo realizar mediante este software.

5.2.2. Matlab

El uso de Matlab para postprocesar los resultados está motivado por una limitación al momento de querer usar Paraview para hacer cortes transversales a las placas desgastadas, con el fin de así analizar en mayor detalle el patrón formado. La dificultad encontrada corresponde a la visualización del desgaste debido a la diferencia de escalas que hay entre las geometrías y los surcos producidos por la remoción de material. Para poner en contexto la situación, se debe recordar que se realizan modelaciones de poco segundos, por lo cual, la profundidad de los surcos dejados por el paso de las partículas está en la escala de los micrómetros, la cual es bastante menor si se la compara con la escala de las geometrías, cuyos tamaños están en los cientos de milímetros, lo cual hace que al observar el desgaste en Paraview, que solo trabaja con la escala mayor, la placa parezca una superficie lisa. Esta situación plantea la duda de si el modelo en realidad está desplazando la malla de la placa de desgaste o simplemente la colorea. Ante lo cual, se utiliza la programación en Matlab para analizar los resultados mediante cortes transversales como los que se presentan en la figura 5.4, los cuales se obtuvieron mediante el uso de un medidor de redondez *Mitutoyo ROUNDTEST RA-1600*. Cabe recalcar que el uso de Matlab fue por mera comodidad del usuario, pero se pueden obtener resultados similares con otros programas como Python, GNUplot, etc.



(a) Corte Transversal



(b) Corte Longitudinal

Figura 5.4: Perfil de desgaste para ensayos en rueda ASTM-G65

Para poder hacer el análisis de la huella de desgaste de forma transversal y longitudinal, se necesitó el uso de una función que permitiera generar la placa de desgaste, en base a la nube de puntos entregada por el archivo *.vtk* de salida que entrega el código cada cierto número de pasos, la cual se presenta en la figura 5.5. Luego de una búsqueda dentro de las librerías de Matlab, se encontraron las funciones *Scattered Interpolant* y *Griddata*. Para más detalles sobre el funcionamiento de este código, dirigirse al anexo C.

El procedimiento para obtener estos cortes es el mismo para ambos métodos de interpolación de la nube de puntos. Primero, se determina un plano a estudiar, que será el plano de corte. De este, se elegirá un extremo desde el cual se calcularán las distancias desde los diferentes puntos en el plano a este borde elegido, con intención de trasladar estos puntos en el espacio 3D al plano de corte, para así presentar las secciones transversales y longitudinales deseadas.

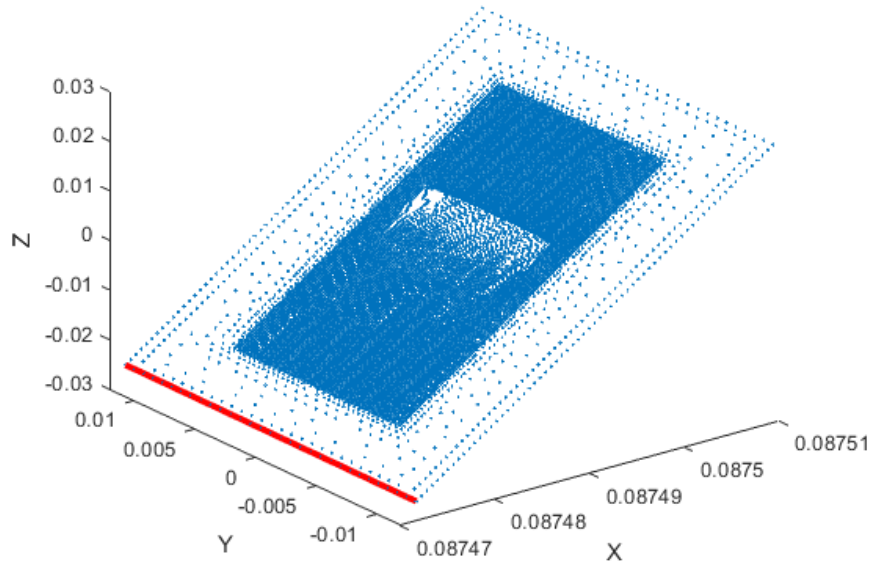
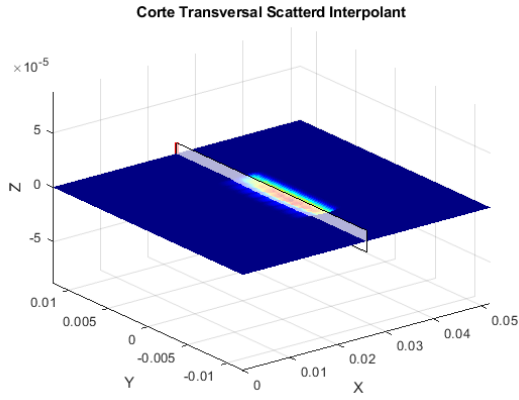
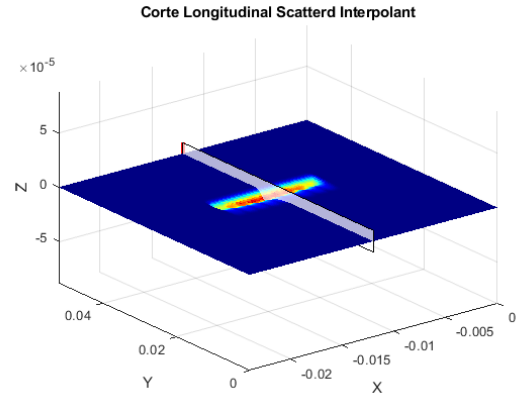


Figura 5.5: Nube de puntos brindada por el programa, para el instante final de un modelación de la rueda ASTM

Tal como se aprecia en las figuras 5.6 y 5.7, las superficies obtenidas entre ambos modelos son idénticas, por lo cual, a simple vista, no se puede comentar que un método sea superior que el otro. En las figuras 5.8, donde se muestran los cortes transversales obtenidos para un mismo ensayo, tampoco se logran apreciar grandes diferencias entre una opción y la otra. Al no haber una clara diferencia entre ambos interpoladores utilizados, cualquiera sería válido para conseguir las imágenes de los cortes que se buscan. Finalmente, se decidió utilizar solo *Scattered Interpolant* para obtener las imágenes de los cortes que serán analizados, principalmente porque tendía a ser más estable cuando se trabajaba con más puntos para hacer las interpolaciones en los cortes longitudinales y transversales realizados. Por lo cual, todas las figuras que serán presentadas en el capítulo siguiente son hechas con este método mencionado. Por último, el trabajo dedicado a poder obtener estas figuras es uno que permitirá brindar mayor profundidad al estudio del desgaste, ya que permite analizar en un detalle no antes visto las huellas producidas por el modelo.

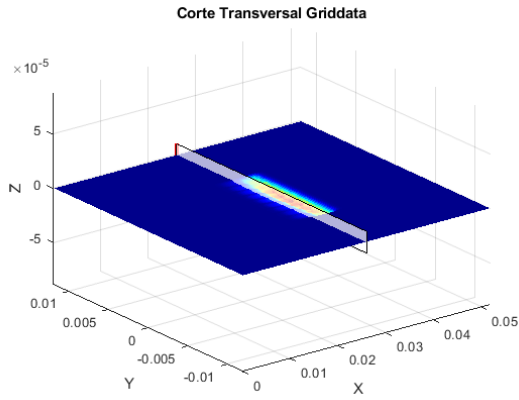


(a) Corte Transversal

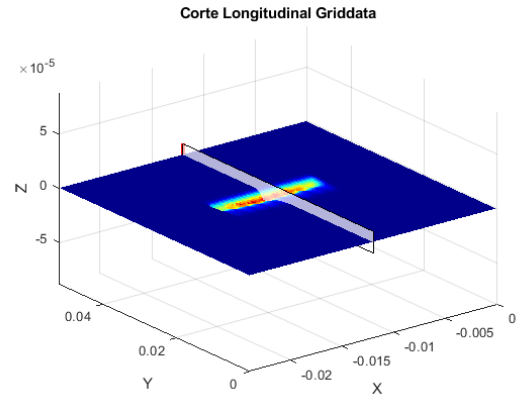


(b) Corte Longitudinal

Figura 5.6: Diagrama planos de corte para interpolación con función *Scatterd Interpolant*

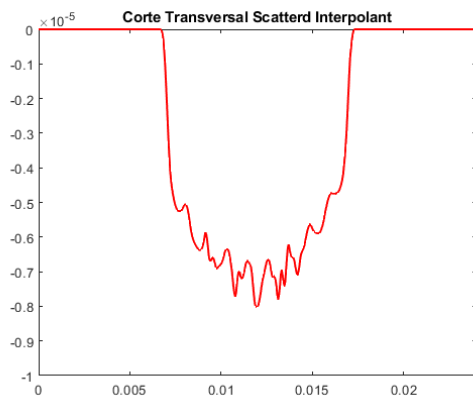


(a) Corte Transversal

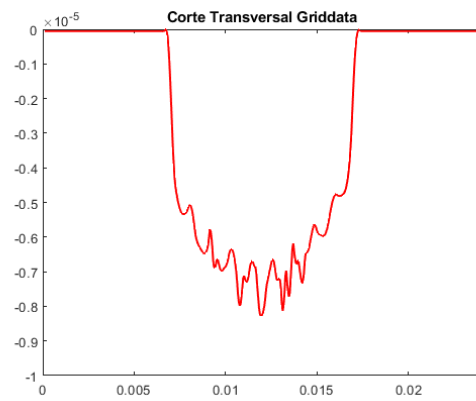


(b) Corte Longitudinal

Figura 5.7: Diagrama planos de corte para interpolación con función *Griddata*



(a) *Scatterd Interpolant*



(b) *Griddata*

Figura 5.8: Ejemplo de los cortes transversales obtenidos con ambos métodos de interpolación

Capítulo 6

Análisis de Resultados

En el presente capítulo, se presentarán los resultados entregados por el código una vez implementadas todas las modificaciones anteriormente comentadas, con el fin de poder dar respuesta a si el algoritmo con el cual se ha trabajado es capaz de representar el desgaste producido por la arena de manera correcta. Junto con ello, se analizará en detalle el comportamiento del modelo ante diferentes variaciones, respecto a los ensayos iniciales, con tal de encontrar áreas de mejora, que puedan motivar futuros trabajos, los cuales permitan seguir ampliando el conocimiento respecto a la modelación y representación del desgaste abrasivo.

Para brindar un orden y claridad a las modelaciones realizadas, se le asignó a cada una un determinado código de 3 cifras, donde el primer valor corresponde a la granulometría y los dos siguientes al ensayo que se realiza. Por ejemplo, el ensayo 621 corresponde al vigésimo primer ensayo con la granulometría N°6 (utilizada principalmente para la rueda CITRAM). Los parámetros de entrada de cada ensayo, se resumen en el Anexo A.

6.1. Rueda CITRAM

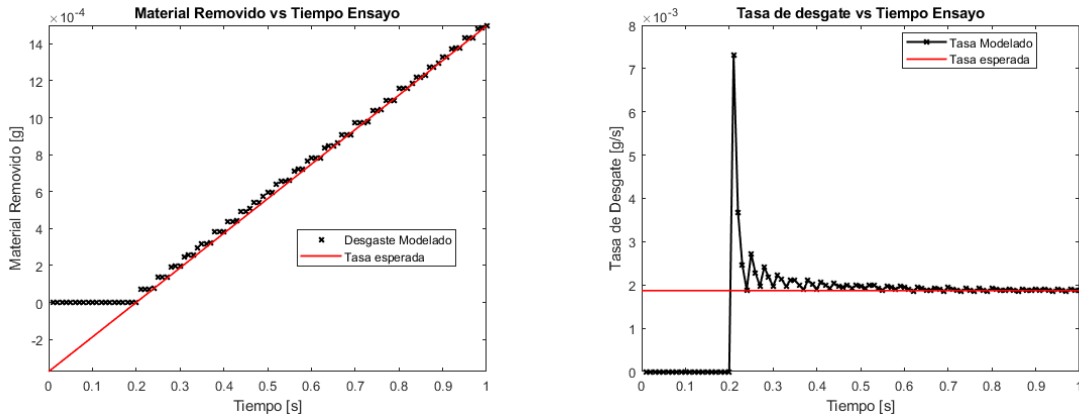
Los ensayos de la rueda CITRAM se han abordado previamente en las investigaciones de Knop, 2015 y Mascaró, 2017, donde, como se mostró anteriormente, los resultados obtenidos por el código no se corresponden con el ensayo realizado, ni en forma ni en cuanto a las tasas de desgaste. Ante esto, tomando como base la calibración de parámetros de entrada realizada por Mascaró, además de aplicar las modificaciones al modelo detalladas en el capítulo 4.5, se obtienen los resultados de la tabla 6.1.

Es importante mencionar que la **dureza específica** presentada en la tabla 6.1 no debe ser confundida con la dureza del material, que, en este caso, dado que en todos los ensayos se utiliza el mismo tipo de acero, sería la misma para todos los ensayos de la rueda CITRAM. En realidad, este valor corresponde a la división de la dureza del material desgastado H entre el parámetro adimensional K , de la ecuación 4.7.

Ensayo	$H_{esp} [N/m^2]$	$T_{ex} [g/s]$	$T_{sim} [g/s]$	Error
1	$115 \cdot 10^{10}$	$1.8916 \cdot 10^{-3}$	$1.87 \cdot 10^{-3}$	1.1 [%]
2	$120 \cdot 10^{10}$	$2.4971 \cdot 10^{-3}$	$2.3512 \cdot 10^{-3}$	5.8 [%]
3	$120 \cdot 10^{10}$	$3.0945 \cdot 10^{-3}$	$2.97 \cdot 10^{-3}$	4.0 [%]
4	$190 \cdot 10^{10}$	$2.6322 \cdot 10^{-3}$	$2.575 \cdot 10^{-3}$	2.2 [%]
5	$230 \cdot 10^{10}$	$3.3866 \cdot 10^{-3}$	$3.2262 \cdot 10^{-3}$	4.7 [%]
6	$245 \cdot 10^{10}$	$4.0867 \cdot 10^{-3}$	$3.92 \cdot 10^{-3}$	4.0 [%]
7	$165 \cdot 10^{10}$	$2.1490 \cdot 10^{-3}$	$2.055 \cdot 10^{-3}$	4.4 [%]
8	$190 \cdot 10^{10}$	$2.6542 \cdot 10^{-3}$	$2.5825 \cdot 10^{-3}$	2.7 [%]
9	$195 \cdot 10^{10}$	$3.1929 \cdot 10^{-3}$	$3.0975 \cdot 10^{-3}$	3.0 [%]

Tabla 6.1: Comparación tasas de desgaste, para ensayos 61X

Como se logra apreciar en la tabla 6.1, los resultados del porcentaje de error entre las tasas reales y las tasas modeladas están alrededor de un 5 %, con algunos resultados cercanos a porcentajes menores. Esto muestra una mejora respecto a trabajos anteriores (Knop, 2015; Mascaró, 2017; Rodríguez, 2023), pero no es suficiente para determinar si el modelo logra presentar de manera correcta el desgaste o no. Para conseguir esto, es necesario primero que la tasa de desgaste sea estable y muestre el comportamiento lineal esperado, lo cual se puede apreciar en la figura 6.1. En este caso, se logra apreciar que la cantidad de material removido va aumentando linealmente conforme avanza el ensayo. A su vez, la tasa de desgaste, luego de los primeros instantes, una vez se ha estabilizado la placa de desgaste, se aprecia que tiende a un valor específico, que es lo esperado, debido al comportamiento lineal de la remoción del material.



(a) Material removido Prueba 615 (Ensayo 1)

(b) Tasa de Desgaste Prueba 615 (Ensayo 1)

Figura 6.1: Comportamiento de la prueba 615, equivalente al Ensayo 1

Finalmente, el último punto a considerar corresponde a la huella de desgaste que se obtiene en cada una de estas simulaciones, y si se logran apreciar patrones que se asemejen con lo visto en los ensayos. Para esto, mediante el uso de Paraview, se postprocesan los nueve ensayos realizados, obteniéndose las siguientes figuras. Se debe destacar que el inlet utilizado para estos ensayos corresponde al presentado en la figura 4.38, con el cual se logra una mejor distribución de las partículas en el volumen de control.

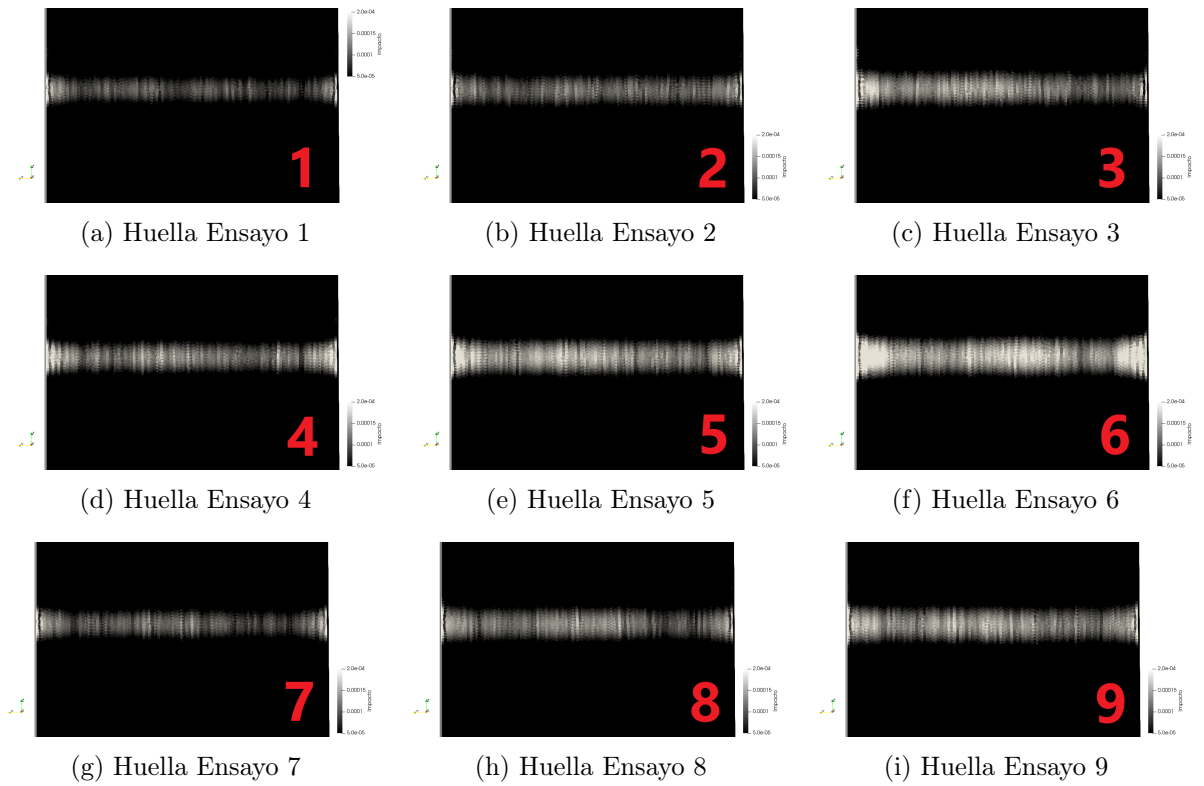


Figura 6.2: Huellas Simulación Pruebas 61X

Al analizar estas figuras, a simple vista se ve que la forma de la huella no se asemeja a lo esperado para cada uno de los ensayos. Esto se vuelve más evidente si se hace una comparación directa entre ensayos, tal como se presenta en la figura 6.3. Donde se logra apreciar en detalle el gran problema presentado por este modelo hasta la fecha al modelar este ensayo, el cual corresponde a un desgaste prominente en los bordes, en cualquier situación, aun cuando en los ensayos utilizados como referencia, este desgaste sea muy pequeño o incluso inexistente. Esta situación fue la que motivó a realizar cambios al modelo, en específico: modificar la forma del inlet de entrada y las condiciones para contar el contacto en los bordes de este sistema.

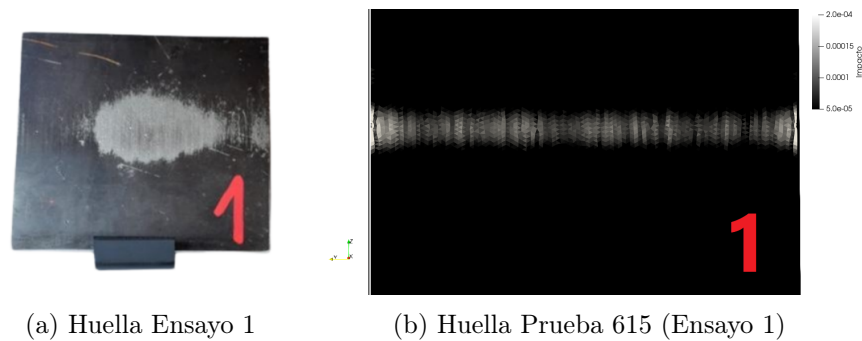


Figura 6.3: Comparación de la huella obtenida para el Ensayo 1

Considerando este problema en la representación, se realizan dos nuevas series de simulaciones:

- **62X:** El objetivo de esta serie de pruebas es obtener errores en la tasa de desgaste menores al 1 %, para ver si las figuras mejoran con un menor error en la tasa de desgaste.
- **63X:** El objetivo de esta serie de pruebas es, para parámetros de entrada iguales a los de 62X, combinados con modificaciones en la detección de contactos en los bordes donde se encuentran las tapas, y con un cambio en la forma del inlet de entrada, obtener huellas más cercanas a las obtenidas en los ensayos realizados en laboratorio.

Ambas simulaciones, comparten los mismos parámetros de entrada, siendo la única diferencia entre estos la posición y la forma del inlet. Las tasas de desgaste y errores asociados se presentan en las tablas 6.2 y 6.3.

62X				
Ensayo	$H_{esp} [N/m^2]$	$T_{ex} [g/s]$	$T_{sim} [g/s]$	Error
1	$114.75 \cdot 10^{10}$	$1.8916 \cdot 10^{-3}$	$1.8875 \cdot 10^{-3}$	0.2[%]
2	$115 \cdot 10^{10}$	$2.4971 \cdot 10^{-3}$	$2.4887 \cdot 10^{-3}$	0.3[%]
3	$114 \cdot 10^{10}$	$3.0945 \cdot 10^{-3}$	$3.1125 \cdot 10^{-3}$	0.6[%]
4	$186 \cdot 10^{10}$	$2.6322 \cdot 10^{-3}$	$2.62 \cdot 10^{-3}$	0.4[%]
5	$214 \cdot 10^{10}$	$3.3866 \cdot 10^{-3}$	$3.3975 \cdot 10^{-3}$	0.3[%]
6	$232 \cdot 10^{10}$	$4.0867 \cdot 10^{-3}$	$4.1037 \cdot 10^{-3}$	0.4[%]
7	$159 \cdot 10^{10}$	$2.1490 \cdot 10^{-3}$	$2.1625 \cdot 10^{-3}$	0.6[%]
8	$183 \cdot 10^{10}$	$2.6542 \cdot 10^{-3}$	$2.665 \cdot 10^{-3}$	0.4[%]
9	$190 \cdot 10^{10}$	$3.1929 \cdot 10^{-3}$	$3.2062 \cdot 10^{-3}$	0.4[%]

Tabla 6.2: Comparación tasas de desgaste, para ensayos 62X

63X				
Ensayo	$H_{esp} [N/m^2]$	$T_{ex} [g/s]$	$T_{sim} [g/s]$	Error
1	$114.75 \cdot 10^{10}$	$1.8916 \cdot 10^{-3}$	$1.8962 \cdot 10^{-3}$	0.2[%]
2	$115 \cdot 10^{10}$	$2.4971 \cdot 10^{-3}$	$2.6087 \cdot 10^{-3}$	4.4[%]
3	$114 \cdot 10^{10}$	$3.0945 \cdot 10^{-3}$	$3.3487 \cdot 10^{-3}$	8.2[%]
4	$186 \cdot 10^{10}$	$2.6322 \cdot 10^{-3}$	$2.615 \cdot 10^{-3}$	0.6[%]
5	$214 \cdot 10^{10}$	$3.3866 \cdot 10^{-3}$	$3.385 \cdot 10^{-3}$	0.5[%]
6	$232 \cdot 10^{10}$	$4.0867 \cdot 10^{-3}$	$4.2725 \cdot 10^{-3}$	4.5[%]
7	$159 \cdot 10^{10}$	$2.1490 \cdot 10^{-3}$	$2.19 \cdot 10^{-3}$	1.9[%]
8	$183 \cdot 10^{10}$	$2.6542 \cdot 10^{-3}$	$2.79 \cdot 10^{-3}$	4.9[%]
9	$190 \cdot 10^{10}$	$3.1929 \cdot 10^{-3}$	$3.27 \cdot 10^{-3}$	2.4[%]

Tabla 6.3: Comparación tasas de desgaste, para ensayos 63X

De los resultados obtenidos para estos dos ensayos, se logra apreciar que el cambiar el inlet de posición, aumenta el error obtenido, en general, aumentando la tasa a la cual se desgasta el material. Aun así, los errores para de las pruebas 63X, siguen en un rango aceptable, además, de ser menores que los obtenidos en trabajos previos. Ahora, lo que interesa es analizar cómo estos cambios afectan

la huella de desgaste; para esto, se utilizarán los ensayos 1 (fuerza mínima con velocidad de giro mínima), 6 (fuerza máxima con velocidad de giro máxima) y 8 (fuerza media con velocidad de giro media).

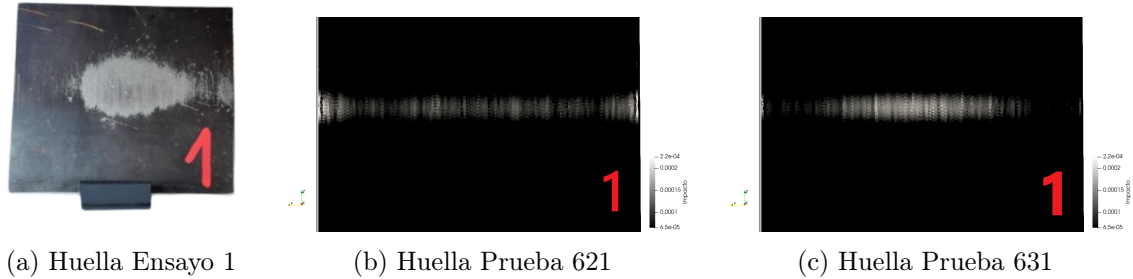


Figura 6.4: Comparación de la huella obtenida para el Ensayo 1

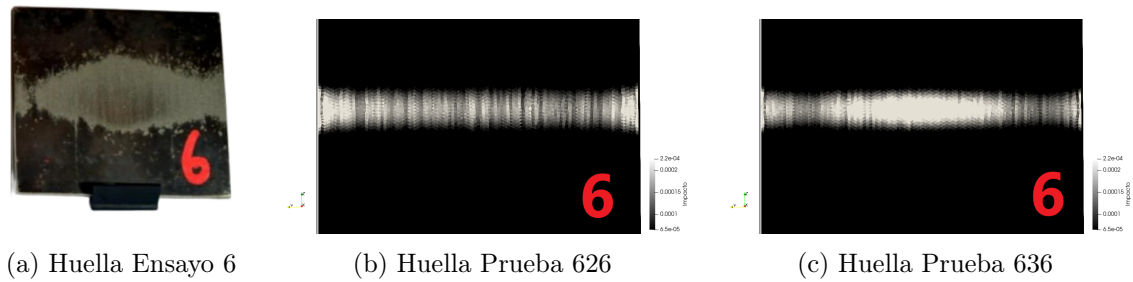


Figura 6.5: Comparación de la huella obtenida para el Ensayo 6

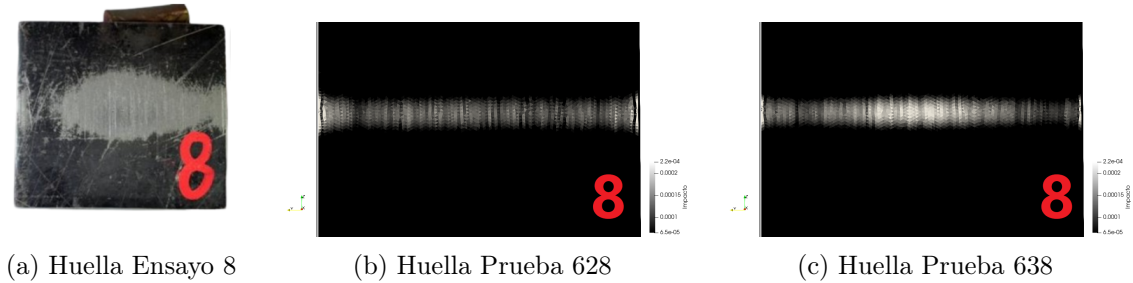
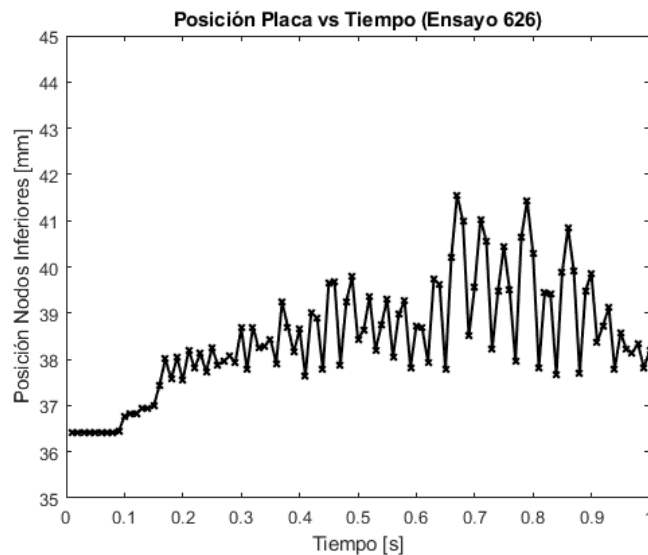


Figura 6.6: Comparación de la huella obtenida para el Ensayo 8

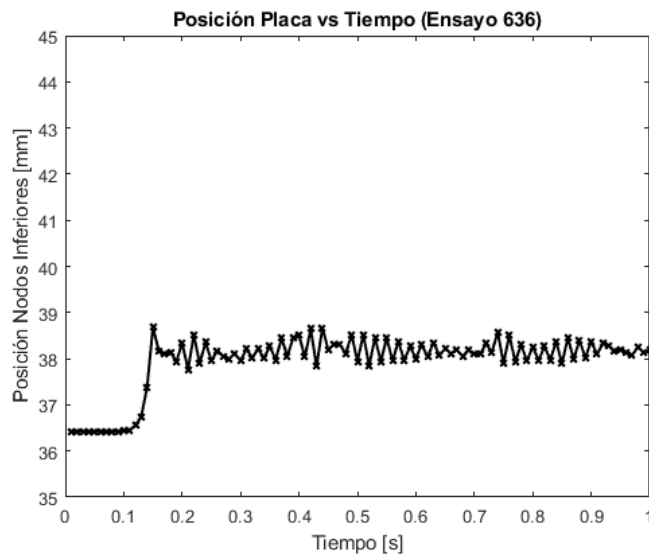
En las tres figuras presentadas, se aprecia que los ensayos 63X son los que más se acercan al desgaste real de la placa. Primeramente, en este conjunto de pruebas, se nota que la huella está mucho más concentrada en el centro, en comparación con las presentadas en 62X, donde la intensidad del desgaste es más homogénea a lo largo de la placa, con tendencias a acumularse en los bordes, un comportamiento que se repite para todos los ensayos. Estas observaciones entregan un resultado interesante respecto al modelo, así como a lo que significa la representación del desgaste, ya que, pese a que las simulaciones 62X sean en general las de menor error respecto a la tasa de material removido en el tiempo, es en ellas donde se observan las mayores diferencias en los patrones de

desgaste generados, para los parámetros de entrada proporcionados.

La razón del comportamiento visto en las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 se revela una vez se analizan los gráficos de posición de la placa. En estos se estudia la posición de los nodos inferiores de la placa de desgaste durante determinados instantes de tiempo. Como todos los ensayos de una misma serie, presentan las mismas tendencias, para ejemplificar, solo se utilizarán los gráficos correspondientes a las simulaciones del ensayo 6 (fuerza máxima y velocidad de giro máxima).



(a) 626



(b) 636

Figura 6.7: Comparación posiciones de la placa ensayos 626 y 636

Estos gráficos revelan que los ensayos 63X tienen un movimiento menor de la placa, es decir, el

movimiento es más estable a lo largo del ensayo. Se observa una relación entre un movimiento mayor en la placa y una peor representación de la huella, lo cual se debe a una mayor separación de la rueda con la placa, permitiendo que las partículas, al tener mayor libertad de movimiento por no estar presionadas entre las geometrías del ensayo, provoquen contactos fuera del patrón esperable. Esto se aprecia si se ven con detalle los gráficos presentados. En la figura 6.7a, se presentan diferencias de hasta $3[mm]$ entre el punto más cercano y el punto más alejado en ciertos instantes, lo cual en teoría no parece muy grande. Sin embargo, considerando que las granulometrías utilizadas para la modelación están entre $1[mm]$ y $1.6[mm]$ de diámetro, una separación de $3[mm]$ es suficiente para que las partículas se muevan con libertad entre las geometrías del ensayo, lo que genera contactos en zonas que no deberían presentarse. En cambio, en la figura 6.7b, se observa que la distancia entre el punto más alejado y el más cercano a la rueda no pasa de $1[mm]$, lo cual quiere decir que, en este ensayo, las partículas no tienen libertad para golpear zonas que no deberían, sino que seguirán un patrón más cercano al visto en los experimentos.

Estos resultados muestran que los cambios en la forma del inlet y en la detección de contactos en los bordes de la placa son los que más ayudan, en este modelo, a conseguir huellas más cercanas a las obtenidas en laboratorio. Como ya se presentó en el capítulo 4.6.3, el código, previo a la modificación realizada a la detección en el borde de la placa, estaba repitiendo contactos que ya habían sido contados, lo cual generaba que la placa se moviera más a causa de estos, lo que provocaba los problemas detallados previamente. Con el fin de profundizar en este análisis, se decide realizar nuevas pruebas, con los mismos parámetros de entrada, utilizando el inlet de la serie 62X y aplicando las modificaciones a la detección de contactos en los bordes, para estudiar en detalle el efecto de la forma del inlet para este ensayo. Como los comportamientos de los diferentes ensayos son similares, se ejemplificará comparando las simulaciones del ensayo 1 de la serie 63X y del ensayo 1 de la nueva serie 66X, presentadas en la figura 6.8. La elección de este ensayo se debe a que es el que menos desgaste a lo largo de la placa presenta, lo cual hace más fácil detectar anomalías en la huella, en comparación con otros.

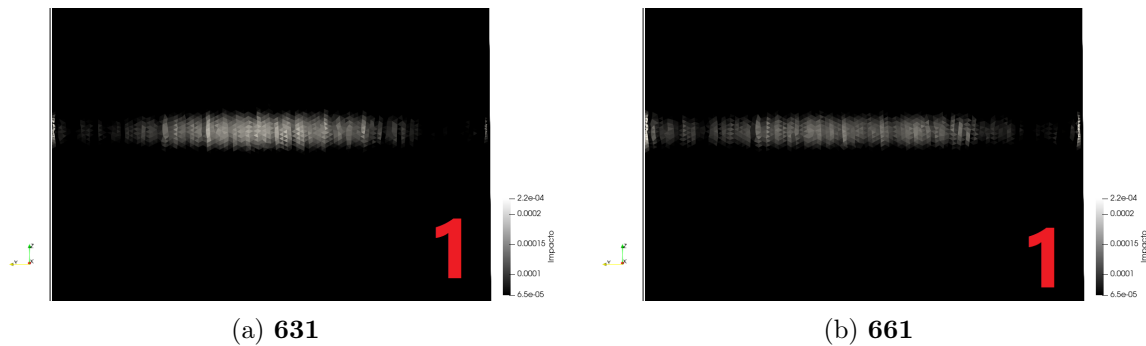


Figura 6.8: Comparación huella ensayos 631 y 661

Como se logra apreciar, 661 es una mejora respecto a la simulación 621 o 615, las cuales presentan huellas más uniformes a lo largo de la placa. Aun así, esta simulación marca de forma más tenue el centro y también se extiende más hacia los bordes que la de 631. Esta diferencia se debe a la forma del inlet. Como se presenta en el gráfico comparativo de la posición de la placa 6.9, se aprecia una similitud entre ambos, lo que muestra una buena estabilidad para la placa de desgaste. Por lo tanto, la razón por la cual el caso 661 marca más zonas fuera de patrón que 631 es que el inlet del primero utiliza un área mayor. Así, cuando se producen las grandes variaciones en la posición de la placa y

las partículas están más extendidas, aumenta las probabilidades de que estas se muevan a posiciones fuera del patrón esperado, a diferencia de 631, donde se mantienen más juntas.

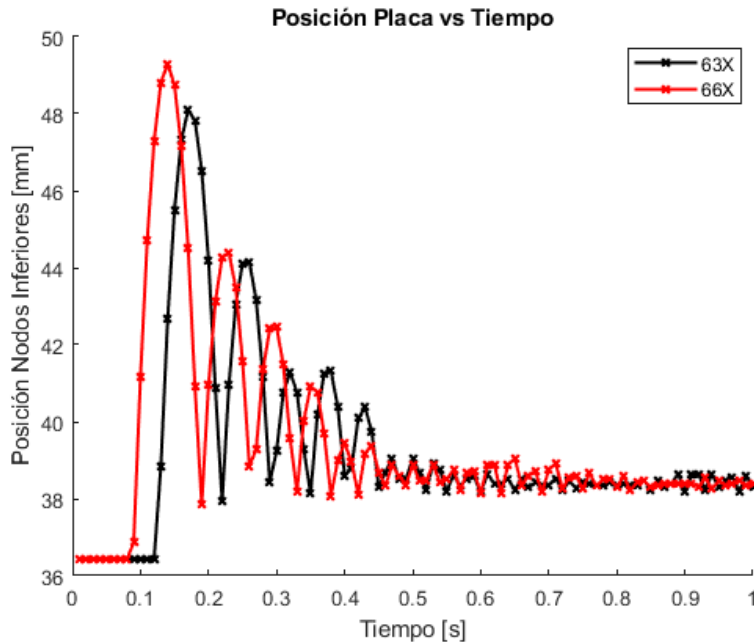


Figura 6.9: Comparación Posición placa ensayos 631 y 661

Este fenómeno presenta que, para este modelo, la forma en la que entran las partículas afecta el resultado final. Una razón para esto puede ser la no consideración de la cohesión dentro del modelo de contacto bajo el cual fue programado este código, la cual, en teoría, debería hacer que las partículas tuvieran una tendencia a agruparse entre ellas, algo que en estas simulaciones no ocurre y probarlo queda fuera de los alcances de este trabajo, ya que requeriría rehacer el modelo de desgaste planteado, cuando el foco de este trabajo es probar si el modelo actual puede o no modelar la arena. Aún así, es un interesante tópico que puede ser abordado en trabajos futuros.

Luego de todas estas modificaciones, por último, se decide analizar las huellas del conjunto de ensayos 63X, con el objetivo comprobar si se aprecian los comportamientos presentados anteriormente por la huella en los ensayos, para variaciones de velocidades de giro y presión de la placa sobre la rueda.

En la figura 6.10, se logran ver con detalle los patrones comentados. Al aumentar la fuerza de presión, la huella tiende a extenderse hacia los bordes de la placa; esto se puede apreciar con gran claridad en los ensayos 1, 2 y 3. En cambio, en los siguientes, puede ser un poco más difícil de divisar, pero se aprecia que, conforme va aumentando la fuerza, los espacios sin desgaste, más oscuros, van disminuyendo. Por otro lado, los patrones de aumento de velocidad también se cumplen, con la huella creciendo lentamente en la dirección vertical, según a mayor velocidad gire la placa, aunque estos cambios en el alto de la huella son más difíciles de apreciar a simple vista. Se debe recordar que las imágenes presentadas son para simulaciones de 1 [s] de desgaste simulado, con un postproceso adecuado para que se puedan apreciar los patrones, y, pese a que no se trate del ensayo completo, estas figuras muestran la mejora conseguida durante el trabajo realizado, mostrando que es posible repre-

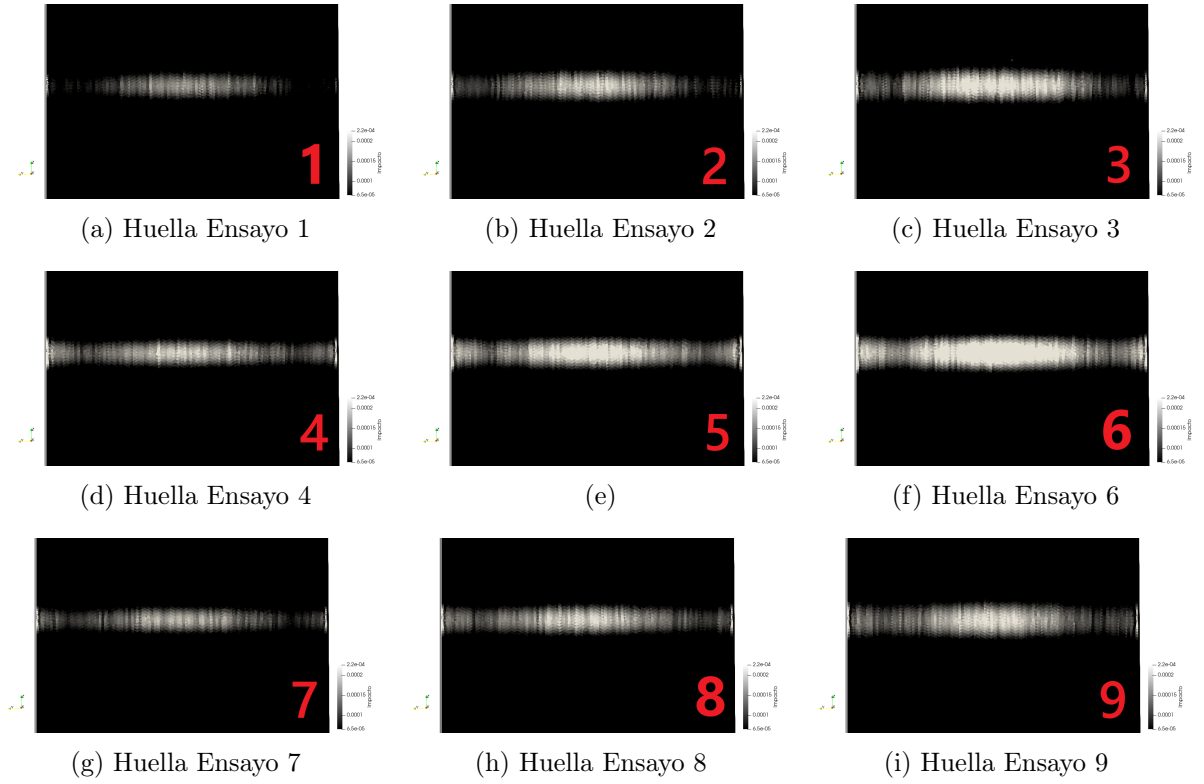


Figura 6.10: Huellas Simulación Pruebas 63X

sentar el desgaste de la arena con el modelo creado en el DIMEC, pese a las dificultades encontradas.

Como última reflexión relacionada con este ensayo, se tiene que los valores de los errores para los casos 63X pueden seguir siendo reducidos, hasta valores menores al 1[%], como se aprecia para el caso del ensayo 631 en la tabla 6.3. Para conseguir esto, habría que ajustar el valor de la dureza específica con el fin de reducir el valor de la tasa de desgaste simulada.

6.2. Rueda ASTM

Mientras se hacían los ensayos de la rueda CITRAM, se trabajaba en paralelo con la implementación y el análisis del modelo utilizando la Rueda ASTM. Como ya se mostró en la sección anterior, el modelo es capaz de simular tasas de desgaste cercanas a las reales, siempre y cuando se ajusten bien los parámetros de entrada. Los resultados se resumen en la tabla 6.4. Los parámetros de entrada para cada uno de los ensayos realizados se encuentran en el anexo A.

Acero	$H_{esp} [N/m^2]$	$T_{ex} [g/s]$	$T_{sim} [g/s]$	Error
Hadfield	$190 \cdot 10^{11}$	$1.13 \cdot 10^{-4}$	$1.1152 \cdot 10^{-4}$	1.3[%]
TWIP 0 % Cr	$175 \cdot 10^{11}$	$1.25 \cdot 10^{-4}$	$1.2974 \cdot 10^{-4}$	3.8[%]
TWIP 5 % Cr	$200 \cdot 10^{11}$	$1.09 \cdot 10^{-4}$	$1.0635 \cdot 10^{-4}$	2.7[%]
TWIP 10 % Cr	$185 \cdot 10^{11}$	$1.18 \cdot 10^{-4}$	$1.1494 \cdot 10^{-4}$	2.6[%]

Tabla 6.4: Tasas de desgaste ensayos Rueda ASTM

Como se aprecia en la tabla 6.4, se cumple con lo esperado, según lo visto en el ensayo anterior, al obtener valores cercanos para las tasas de desgaste, luego de un ajuste de parámetros. Pero el verdadero interés en este ensayo no recae en hacer simulaciones para obtener tasas de desgaste cercanas a las reales, sino en analizar a detalle las huellas formadas, ya que en este ensayo normado siempre produce un mismo patrón de desgaste (figura 6.11a).

En específico, los esfuerzos se centrarán en analizar la evolución de la huella de desgaste para tiempos de simulación mayores. Esto se debe a que todos los resultados presentados hasta el momento son para simulaciones de máximo 1 segundo de duración. El probar con tiempos mayores al comentado no ha sido estudiado hasta la fecha en trabajos previos utilizando este modelo con arena, por lo cual, los límites del código con respecto a esta variable son desconocidos. Por esto, se realizan simulaciones de un mismo experimento, donde progresivamente se va aumentando el tiempo simulado, tal como se aprecia en la figura 6.11.

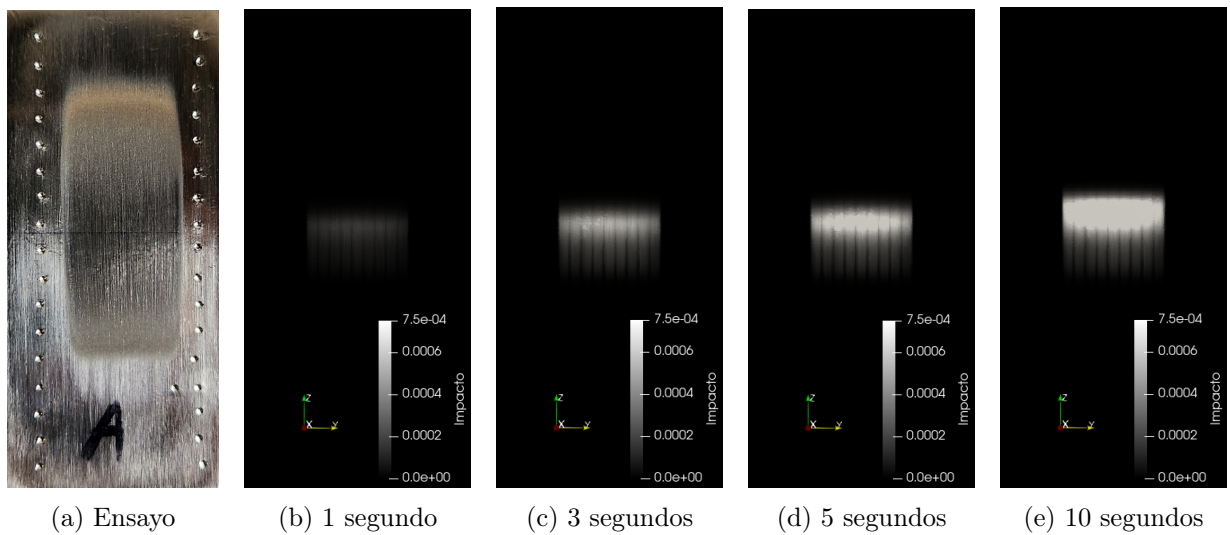


Figura 6.11: Evolución huella ensayo Rueda ASTM

En la figura 6.11, se logra apreciar que se está modelando poco tiempo, esto debido a que la huella claramente no se ha conseguido desarrollar en su totalidad, pero, tal como es de esperarse, poco a poco se va extendiendo verticalmente. Cabe mencionar, como era de esperarse, que para obtener estos resultados, se requirieron largos tiempos de cálculo, lo que se expone en la tabla 6.5.

Tiempo Modelado [s]	Tiempo cálculo [min]	Tiempo Cálculo [da]
1	1138	0.8
3	3710	2.6
5	6008	4.2
10	12392	8.6

Tabla 6.5: Tiempos de cálculo

La tabla 6.5 deja en claro que, pese a que el código esté paralelizado, estas simulaciones siguen tardando mucho tiempo, lo cual es una gran limitante del modelo presentado en cuanto a sus posibilidades de modelar ensayos más prolongados, o incluso intentar modelar el ensayo completo. Que,

en teoría, haciendo una interpolación de los valores presentados en la tabla 6.5, tardaría alrededor de un año y medio, en el mejor de los casos, lo cual es un despropósito. Estos largos tiempos de simulación pueden estar relacionados con diferentes factores, dentro de los cuales se destacan:

- Paso de tiempo: Al utilizar un modelo de integración temporal basado en el esquema Euler explícito, se requiere del uso de un paso de tiempo muy pequeño para que código funcione. Aquí usar un esquema más robusto como RK4 para permitir el uso de un paso de tiempo mayor, y técnicas para hacer el cálculo con un tiempo variable pueden ayudar a reducir el tiempo de cálculo.
- Optimización de la programación: El repetido uso de ciclos *do* a lo largo del código, pese a que estén paralelizados, puede hacer que se esté gastando tiempo preciado en cálculos que se podrían programar de forma más eficiente.
- Potencia de las máquinas utilizadas: Los tiempos presentados son los obtenidos al correr el código utilizando 32 procesadores en servidores de la Universidad George Mason, de Fairfax County, Virginia, EEUU. En cambio, al correr un caso de 3 [s] en los servidores con los cuales cuenta la Universidad Técnica Federico Santa María, utilizando el mismo número de procesadores, el tiempo de cálculo ascendía a 6645 minutos, lo cual es un 79 % más lento.

En resumen, el tiempo de simulación del código es una primera limitación de este modelo, el cual, pese a recibir mejoras en este aspecto, aún tiene potencial para seguir mejorando.

Por otro lado, al observar las figuras 6.11, se logra apreciar la efectividad de la mejora del movimiento de la placa con mucha mayor claridad, ya que, de mantenerse en el modelo el acercamiento de la placa de desgaste a la rueda hasta un límite fijo, en algún punto de la simulación la huella dejaría de crecer verticalmente, lo cual terminaría siendo un problema al modelar tiempos mayores. Este comportamiento de crecimiento progresivo de la huella también se puede apreciar al analizar los cortes transversales y longitudinales de los ensayos realizados.

Como se logra apreciar en los cortes transversales, estos guardan similitudes con los mostrados en la figura 5.4, donde se observa que la huella vista desde este corte va haciendo lentamente una hendidura con forma triangular en la superficie de la probeta desgastada. Obviamente, en las imágenes presentadas en la figura 6.12, se manipuló el eje vertical para poder analizar el detalle de la huella, ya que en estos primeros segundos la rueda solo ha alcanzado a remover unos pocos micrómetros de la superficie, lo cual no se apreciaría a simple vista si se utilizara una escala como la presentada en las imágenes obtenidas mediante la medición de redondez. Patrones de similar interés se encuentran al analizar los cortes transversales de la placa desgastada.

Nuevamente, las figuras 6.13 muestran un patrón similar al obtenido con el medidor de redondez, presentado en la figura 5.4. Pero, al mismo tiempo que se logra apreciar una huella que coincide con lo visto en los ensayos, las figuras anteriormente presentadas dan indicio de una nueva limitación de este programa, que era lo que se estaba buscando al hacer estas simulaciones de larga duración. Como se sabe, el modelo trabaja bajo la ecuación de desgaste de Archard, la cual presenta que el desgaste producido tiene un comportamiento lineal en el tiempo; es por esto que se esperaría que la diferencia en la profundidad de la huella, entre el segundo 1 y 5, fuera similar a la diferencia entre el segundo 5 y 10, pero, al ver las imágenes, queda claro que no es así, sino que, por el contrario,

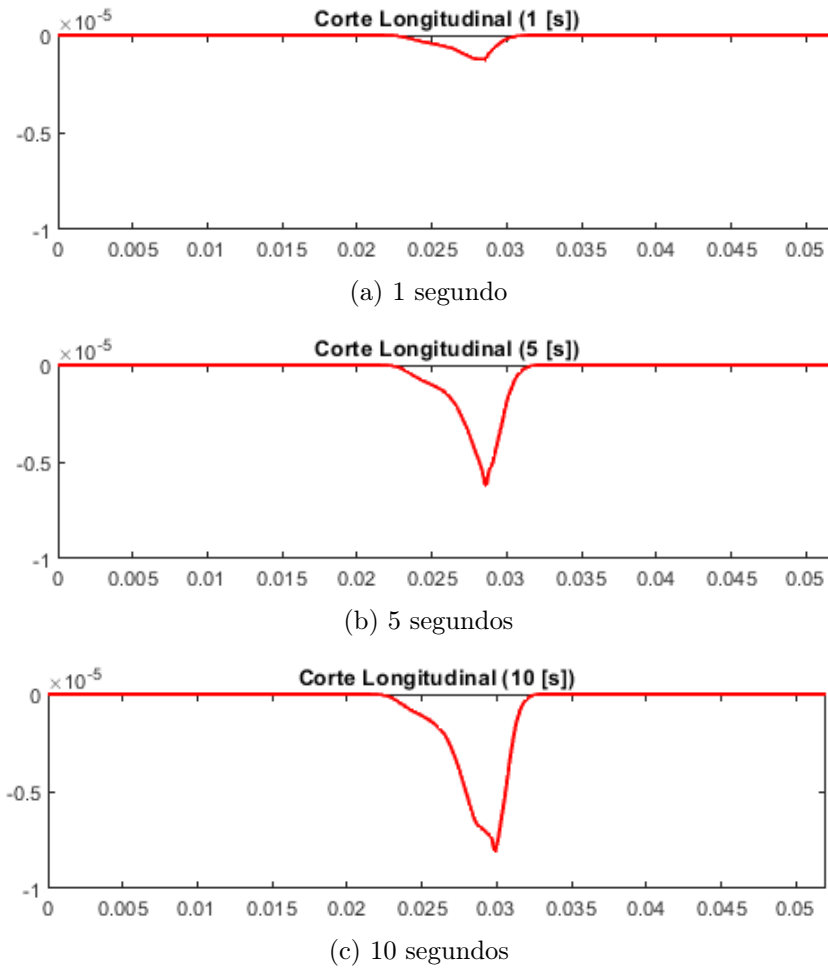


Figura 6.12: Evolución huella ensayo Corte Longitudinal Rueda ASTM

conforme más avanza el ensayo, menos desgaste se produce. Para comprobar si el desgaste no se está comportando de la manera esperada, se utilizaron los gráficos de remoción de material en el tiempo y tasa de desgaste en el tiempo.

Al observar la figura 6.14, queda en evidencia el problema apreciado en los cortes transversales y longitudinales de la placa desgastada, donde el desgaste es menor conforme avanza el tiempo calculado. La remoción de material (figura 6.14a) no se está comportando de forma lineal, y esto es porque la tasa de desgaste (figura 6.14b), luego de cierto tiempo, comienza a caer conforme avanza la simulación. Una causa de este fenómeno puede ser el cambio de área de los elementos de malla de la placa de desgaste, donde, como se sabe, luego de mover un triángulo considerado como impactado por una partícula, los adyacentes son deformados para mantener unida la geometría y así representar el desgaste, tal como se mostró en el capítulo 4.4.5. Pero esto hace que, conforme pase el tiempo, los triángulos vayan variando sus formas iniciales, haciendo que el cálculo del material removido sea cada vez menor. Igualmente, es difícil de analizar esta situación, ya que no se cuentan con probetas desgastadas para tiempos intermedios en este experimento, por lo cual, tampoco hay una completa certeza de que el material en sí se comporte de una forma lineal en el ensayo. Aun así, estos análisis de cortes transversales y longitudinales presentan una nueva forma de analizar el desgaste obtenido,

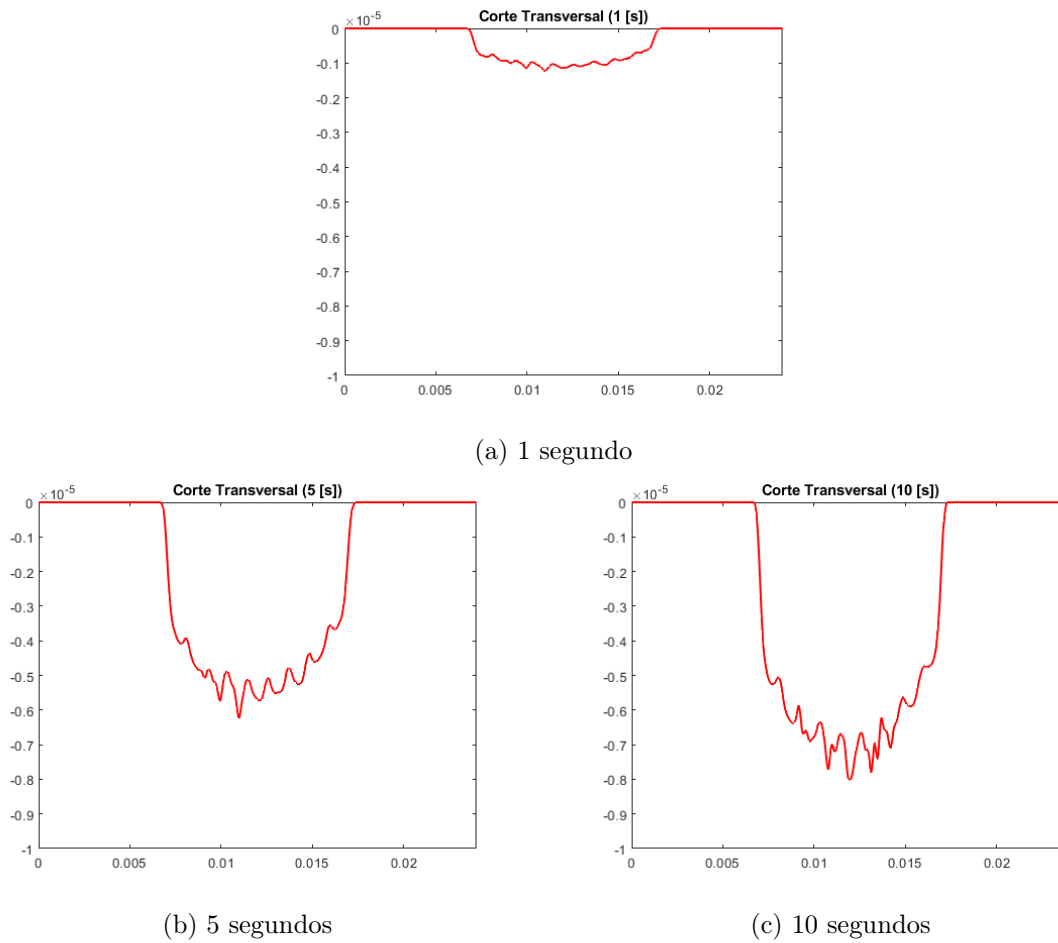
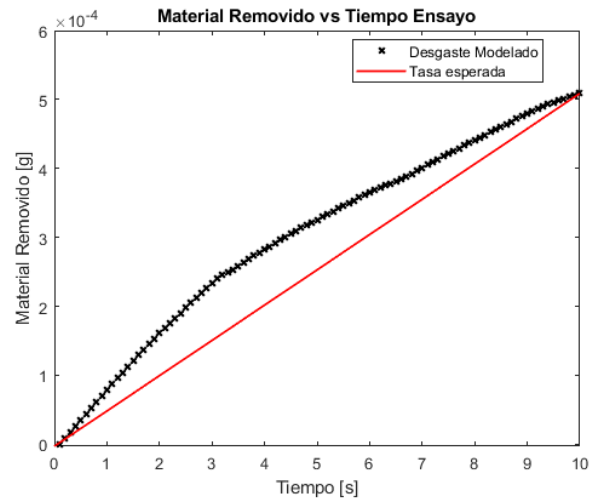


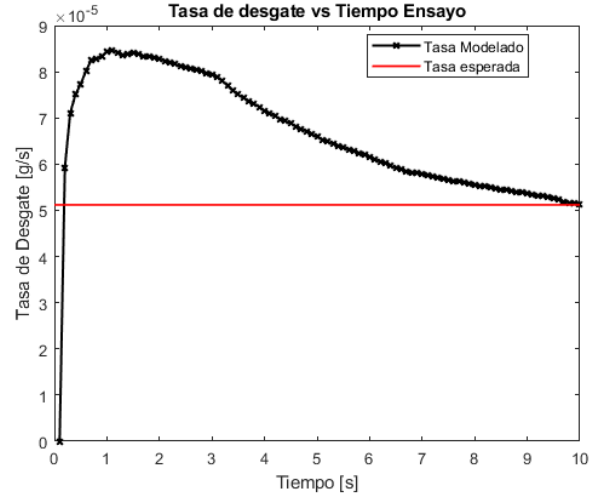
Figura 6.13: Evolución huella ensayo Corte Transversal Rueda ASTM

abriendo nuevas opciones para poder ajustar o mejorar el modelo actual, el cual tiene potencial de mejora, que puede ser explorado en nuevas investigaciones.

Finalmente, este segundo experimento recalca que el estudio de la representación del desgaste es uno de dos perspectivas: una relacionada con los resultados meramente numéricos de la masa, volumen y tasas de remoción, los cuales sirven para saber cuál es el punto de comparación, qué material se está desgastando, cuál es el abrasivo utilizado y con qué se comparará esta huella. Pero no solo se puede fiar de estos resultados, sino que deben ser acompañados por un análisis de los patrones formados, porque de nada sirve que mi modelo desgaste lo que tiene que desgastar si lo está haciendo en lugares donde no corresponde. El patrón de desgaste es el que da sentido físico a los números brindados por el programa, por lo cual no puede ser subestimado, ya que tiene una gran importancia a la hora de hacer estudios de representación, no solo de experimentos como los que se aprecian en este trabajo, sino en cualquier tipo de simulación, con tal de asegurar que los resultados son los que deben ser.



(a) Remoción de material



(b) Tasa de desgaste

Figura 6.14: Evolución huella ensayo Corte Transversal Rueda ASTM

Capítulo 7

Conclusiones

El trabajo realizado ha permitido representar el desgaste abrasivo de la arena sobre probetas de acero en dos ensayos diferentes, mediante ajustes en los parámetros de entrada, geometrías y rutinas del código, basados en la información obtenida a través de las técnicas de postproceso de datos diseñadas en esta tesis. Lo cual ha permitido obtener resultados de las tasas de desgaste simuladas que se asemejan a los obtenidos en las referencias experimentales con las cuales se comparaban las simulaciones, mostrando la validez y flexibilidad del modelo a la hora de representar sólidos a granel. Además, se ha conseguido nueva información sobre cómo analizar si la representación del desgaste es correcta, así como explicaciones a diferentes comportamientos del código anteriormente no abordados.

En particular, los aportes realizados en este trabajo se resumen en posibilitar la simulación de partículas de arena de granulometrías pequeñas (200 a 300 $[\mu m]$), a través de la calibración y el perfeccionamiento del modelo de desgaste creado en el DIMEC (Knop, 2015; Mascaró, 2017; Perazzo et al., 2019; Rodríguez, 2023). Esto se realizó modificaciones en rutinas clave del programa, así como en los valores de entrada del código, obteniéndose a su vez una comprensión más detallada del funcionamiento de este modelo. Junto con lo anterior, también se hace un aporte relacionado con la generación de nuevas herramientas de postproceso de resultados, las cuales permitieron entregar mayor información respecto de la huella de desgaste, mostrando detalles de cortes transversales y longitudinales de las placas desgastadas, que no eran posibles con las técnicas de postproceso utilizadas en trabajos previos respecto a este modelo, y que además brindan un nuevo nivel de comprobación sobre la calidad de la representación del desgaste simulada, al compararla con los resultados de laboratorio.

A continuación, se hace una revisión respecto al cumplimiento de los objetivos propuestos para esta tesis de grado.

1. Obtener una representación numérica del desgaste acorde con lo que se obtiene de los experimentos.

El modelo numérico utilizado, luego de los ajustes realizados para que las simulaciones se comportaran lo más cercano posible a la realidad, permite obtener una representación del desgaste abrasivo que entrega valores con bajos porcentajes de error al compararlo con la tasa de material removido en el tiempo de un ensayo normalizado. Además, estas modificaciones, hacen que en el postproceso se

consigan patrones de desgaste que tienen sentido físico al compararlos con los experimentos usados como referencia para calibrar el modelo. En particular el ensayo de la rueda ASTM muestra que la huella se va desarrollando en la dirección correcta.

Junto con ello, se ha conseguido profundizar el análisis de que es una buena representación de la huella de desgaste. Donde se debe reconocer en igual nivel de importancia los resultados meramente numéricos, con las figuras que se obtienen del postproceso. Ya que ambas forman parte de un todo, que terminará dictaminando si se calibró de forma correcta o no el modelo utilizado. En particular, en la rueda CITRAM, se muestra un ejemplo de que se pueden tener valores de error en la tasa de desgaste pequeños, pero con huellas que presentaran desgaste en zonas que no se apreciaba en los ensayos experimentales, como es el caso de la comparación entre simulaciones 62X y 63X, donde, sin estudiar en detalle la representación, se podrían considerar ambas configuraciones correctas, cuando en realidad, hay una que entrega mejores resultados en su huella. Mientras que en las simulaciones de la rueda ASTM, lo que puede apreciar es un desarrollo de la huella de desgaste que de seguir de esa forma, haría que se llegara al patrón presentado en los experimentos para ese ensayo, lo cual ayuda a mostrar que las modificaciones respecto al movimiento de la placa, y que la placa se ha comenzado a acercar alargando la huella en la dirección vertical, siendo esto un elemento de la simulación que no se podría analizar de forma completa solo mirando los valores de la tasa de desgaste.

2. Estudiar el efecto de diferentes parámetros

El gran número de pruebas realizadas, ajustando diferentes parámetros, permitió conseguir nueva información relacionada con los efectos que tienen estos en los resultados presentados, como también diversas maneras de afrontar la modelación del desgaste.

Granulometría de las partículas

Luego de los análisis realizados, se aprecia la importancia de trabajar con una distribución de tamaños para simular el sólido a granel, ya que esto permite diferenciar contactos entre partículas, evitando desgastar en exceso zonas o volver los movimientos poco estables, debido a que el sólido a granel modelado golpea con más fuerza de la que debería.

Junto con ello, es importante mencionar que la elección de los tamaños a utilizar para la distribución granulométrica debe ser revisada con cuidado, con el fin de que los diámetros elegidos se correspondan con los valores obtenidos en pruebas de tamizado, excluyendo valores atípicos muy grandes o pequeños, ya que estos pueden desgastar en exceso la figura o limitar la simulación por requerimientos de pasos de tiempo muy pequeños, respectivamente.

Dureza Específica

Luego de calibrar las propiedades del sólido a granel que se modelará, es importante también calibrar el material que será desgastado. Para esto, el valor elegido de la dureza específica es clave, ya que será el que brindará sentido físico a la simulación, permitiendo relacionar los resultados obtenidos mediante el modelo, con materiales reales modelados en laboratorio. En particular, este es el parámetro a ajustar para obtener las determinadas tasas de desgaste en cada ensayo realizado,

donde, al aumentarlo el material se desgastará menos, y viceversa.

Es siempre importante recordar que este valor no es la dureza del material, que será igual para todos los ensayos que se realicen con un mismo material, sino que corresponde a un término modificado para cada ensayo por una constante de desgaste específico, la cual viene dada por las condiciones propias del ensayo (velocidades de giro, fuerzas de presión, etc.), y hace que esta sea diferente en las distintas modelaciones.

Forma del Inlet

Un hallazgo interesante respecto al modelo, corresponde a que la huella de desgaste puede verse afectada por la forma que tiene el inlet de partículas utilizado. En particular, por lo visto en el ensayo de la rueda CITRAM, un inlet más compacto en su entrada, genera una entrada de partículas que genera separaciones entre la placa de desgaste y la rueda, las cuales no permiten que las partículas tengan gran libertad de movimiento entre las geometrías, reduciendo la posibilidad de desgaste en zonas no esperadas. Esto podría ser debido a que el modelo de contacto no considera fuerzas cohesivas en la simulación, las cuales hacen que las partículas quieran unirse unas con otras, y el estudio de este fenómeno podría ser profundizados en nuevas investigaciones.

Tiempo Simulado

Se ha conseguido simular, para ambos ensayos propuestos, tasas de desgaste similares a las de los experimentos y que muestran un desarrollo que tiene sentido físico, al compararlas con los ensayos, que dejan clara la capacidad actual del código para representar el desgaste. Aun así, las simulaciones realizadas se ven limitadas a pocos segundos de desgaste, debido al prolongado tiempo de cálculo de las simulaciones, como también a limitaciones del modelo a la hora de realizar simulaciones de duración prolongada. Pero, pese a estos comportamientos, más que nada relacionados con la caída del valor de la tasa de desgaste, pasado un cierto umbral de tiempo, el código es capaz de brindar resultados correctos en cuanto a tasas y patrones de las huellas de desgaste, por lo cual, si se trabajara en solucionar estas dificultades, se podrían ampliar los tipos de modelaciones realizadas.

Además, al no tener resultados experimentales que muestren el crecimiento de la huella a lo largo del ensayo, se hace difícil determinar si la caída en los valores de la tasa de desgaste es necesariamente un problema relacionado con el modelo, o si en realidad el desgaste en las probetas ensayadas se comporta de esta forma.

3. Presentar nuevas formas para analizar si la representación del desgaste es correcta

Previamente, el desgaste se analizaba únicamente a través de los resultados numéricos entregados en los archivos de salida, y las figuras postprocesadas en Paraview, las cuales entregan información limitada respecto al comportamiento de la huella a lo largo del ensayo. Pero en este trabajo, gracias a la programación en Matlab, se logró obtener nuevas figuras para cada ensayo realizado, las cuales corresponden a cortes transversales y longitudinales de las placas desgastadas, obteniendo información novedosa respecto al comportamiento del modelo de desgaste, la cual permitió comprender el

funcionamiento de este de manera más detallada que en trabajos previos.

Junto con lo anterior, se destaca que este nuevo postproceso, desbloquea una nueva dimensión para analizar los patrones de la huella, mediante el cual se pudo ver en detalle el como se comporta el modelo al simular tiempos prolongados, en particular, como afecta en el patrón de la huella, la caída en la tasa de desgaste, al ver que la profundidad y extensión de la huella, no crecía de manera lineal, información que no se podría haber extraído de los resultados, de solo estar utilizando el postproceso en Paraview.

Conclusiones Generales

En conclusión, el estudio de la representación de desgaste de la arena realizado, además de mostrar la adaptabilidad del código para diferentes tipos de materiales abrasivos, sirvió también para profundizar los conocimientos respecto a que significa una buena representación del desgaste, entregando nuevas herramientas de análisis, y directrices para mejora, a futuros estudiantes del DIMEC, que quieran seguir profundizando el desarrollo de este modelo.

Finalmente, se debe recordar que la modelación del desgaste abrasivo, no es un mero cálculo numérico, sino que debe también tener en consideración los patrones que se obtienen, ya que estos son los que entregan sentido físico a la simulación realizada.

Capítulo 8

Trabajos futuros

Como se presentó en el trabajo previo, el uso de este programa se ve limitado a simulaciones de pocos segundos, debido al rendimiento del mismo. Por lo cual, pese a que se pueden modelar patrones de desgaste que tienen sentido físico, y que se condicen con los resultados experimentales, las simulaciones son muy cortas como para poder hablar de que las comparaciones son una representación exacta de la realidad, y la falta de resultados experimentales en instantes intermedios de los experimentos hace difícil saber si el desarrollo de la huella es tal como en las pruebas realizadas. Por ello, pese a que se prueba que el código puede representar el desgaste de la arena de manera correcta, falta optimizar el rendimiento del código y pruebas de laboratorio, para poder ratificar completamente el modelo.

Con base en el trabajo realizado, se proponen las siguientes líneas de estudio que pueden motivar nuevas investigaciones basadas en a este modelo y en la representación del desgaste abrasivo.

1. Usar macropartículas para la modelación de arena

Como es sabido, los sólidos a granel, no son esferas perfectas, sino que en realidad estos tienen formas diversas y altamente complejas, lo cual puede afectar el comportamiento de la partícula al momento de desgastar una superficie. Una manera de poder simular las imperfecciones que presenta el material abrasivo, es mediante el uso de macropartículas, el cual es soportado por el modelo utilizado. Para hacer esto, se necesitarían nuevas calibraciones para los parámetros de entrada de la arena, con tal de obtener huellas de desgaste que tengan sentido con lo obtenido en los ensayos realizados.

2. Optimizar la programación en rutinas

El código, pese a estar paralelizado, haber reducido sus tiempos de cálculo originales y simular cálculos en tiempos comparables con programas comerciales, sigue teniendo margen de mejora en cuanto a su programación. En específico, las rutinas dependen en gran medida de loops y comparadores condicionales, que por lo general están recorriendo todos los puntos de las geometrías o partículas, limitando el trabajo del código con grandes números de partículas o mallas más refinadas, ya que por ejemplo, en la rutina *Desplazamientos*, para mover las placas y ruedas, se hace esto con ciclos `do` para cambiar la posición entre instantes de tiempo, nodo a nodo, cuando se podrían utilizar

matrices de movimientos. Situaciones como estas, se repiten a lo largo del código, y trabajar sobre estas, puede tener un impacto positivo en el rendimiento del programa, ampliando las posibilidades de ensayos que se puedan realizar utilizando este modelo de desgaste.

3. Robustecer los esquemas de integración temporal

Actualmente el código trabaja utilizando un método de integración temporal Euler explícito, el que ha permitido realizar cálculos con diversas granulometrías, obteniéndose buenas representaciones de huella con esta. Aún así, este método de integración temporal, termina por limitar las posibilidades de cálculos realizados, debido a que los pasos de tiempo deben ser pequeños, con tal de que las simulaciones puedan funcionar sin errores. Es por esto que estudiar los efectos de utilizar esquemas más robustos de integración temporal como esquemas Runge–Kutta o implícitos, podría afectar positivamente los tiempos de cálculo de programa. La idea en este trabajo, sería reemplazar el cálculo de la integración temporal en la rutina **Integración de la posición**, por, un llamado a una subrutina, con un determinado esquema, con tal de obtener mejores tiempos de cálculo. Igualmente, esto puede habilitar el uso de pasos de tiempo variables, con tal de analizar si existen reducciones de tiempos de cálculo aún mayores, manteniendo la correcta representación de huella de desgaste del código.

4. Considerar esquemas de deformación de malla diferentes para golpes en cara y en bordes

Tal como se mencionó en el trabajo, todos los contactos de partículas deforman la malla de la misma manera, ya sea que el contacto sea directo en la cara del elemento de malla o en un borde de este, la malla se deformará de tal modo que un elemento completo se mueve una determinada distancia, y luego los tres nodos de este elemento, son reconectados a los colindantes. Pero, luego de estudiar el código actual, se encontró que los resultados mejoraban cuando el desgaste producido en los bordes era menor, por lo cual, se propone que si una partícula contacta en un borde, esta debería de desplazar dos nodos, en vez de tres, lo cual se traduciría en un desplazamiento de volumen menor para estos contactos. En general, queda la duda si el modelo puede mejorar sus resultados numéricos o generación de la huella, si se tratan los desgaste en bordes y caras de formas diferentes.

5. Extrapolar desgaste para realizar simulaciones de tiempos mayores

Tal como se pudo apreciar, el código puede representar las huellas de desgaste de forma correcta, pero, con un problema de estabilidad en la tasa de desgaste para tiempos mayores a un par de segundos, viendo que esta comienza a caer, probablemente producto de las deformaciones sufridas en la malla, haciendo que luego de cada impacto, las áreas de determinados elementos de malla se hagan más grandes, con lo cual, los golpes de las partículas comiencen a desgastar menos. Una posible solución para este problema, considerando el desgaste como un fenómeno lineal en el tiempo, podría ser extrapolar el mismo para tiempo futuros. En este caso, se podría guardar información de cuanto se desplaza la malla en promedio al ser golpeada por una determinada partícula, en el tiempo en que la tasa de desgaste se mantiene estable, y luego usar esta información para simular los instantes

posteriores, extrapolando los datos y manteniendo la linealidad del desgaste. Esto también podría reducir tiempos de cálculo para simulaciones de mayor duración, ya que al extrapolar el desgaste, no se debería de estar calculando este en cada iteración, sino que bastaría saber donde está contactando la partícula, y mover la malla según la información guardada de cuanto desgasta en promedio cada partícula que impacta una superficie.

6. Incluir la parte cohesiva en el modelo de contacto

Como fue presentado al inicio de este trabajo de investigación, en el capítulo 4.3.2, el código no considera la zona cohesiva en su modelo de contacto, es decir, no considera fuerzas de unión entre partículas durante la modelación. Se plantea esta nueva línea de investigación para un trabajo futuro, debido a los resultados observados con diferentes formas de inlet de entrada, donde el un inlet más compacto, entregaba una mejor representación de los patrones de desgaste, que uno el cual se extendía a lo largo de la entrada. La complejidad de este estudio es elevada, ya que requeriría una reformulación de la ecuación del modelo de contacto, en particular del modelo amortiguador-resorte utilizado.

7. Estudiar experimentalmente el desarrollo de la huella

Como se apreció en el capítulo 6.2, el desgaste luego de un determinado tiempo de cálculo, deja de comportarse de forma lineal, lo cual se asume como un problema de estabilidad del modelo a la hora de calcular desgastes de tiempos mayores a un par de segundos. Pero, no se puede hacer una conclusión definitiva respecto a esto, debido a que no se tienen pruebas de laboratorio donde se pueda apreciar como va creciendo la huella en diferentes tiempos. Para esto, se propone, hacer nuevamente los ensayos de la rueda ASTM-G65, pero midiendo la probeta desgastada en diferentes tiempos, para así poder estudiar en detalle si el desgaste se comporta de forma lineal durante todo el tiempo del ensayo, o, si este en realidad, por efectos del material, también presenta diferentes tasas de desgaste conforme avanza el experimento.

Bibliografía

- Amdahl, G. Validity of the Single Processor Approach to Achieving Large Scale Computing Capabilities. En: *En Proceedings AFIPS Conference, vol 30*. 1967.
- Archard, J. (1953). Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24, 981-988.
- ASTM. (2021). Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.
- Bowden, F., & Tabor, D. (1950). *The friction and lubrication of solids*. Clarendon.
- Calvo, A. (2011). *Determinación Experimental del desgaste abrasivo en tolvas de flujo másico mediante una máquina de desgaste de placas* [Tesis Ingeniero Civil Mecánico]. Departamento de Ingeniería Mecánica, UTFSM Valparaíso.
- Chen, Y., Yang, Y., Ding, X., Lv, K., Yang, Z., & Liu, X. (2025). Quantitative DEM simulations of the mechanical properties of porous ceramics: The influence of bond strengths. *Powder Technology*, 452.
- Cleary, P., Delaney, G., Sinnott, M., Cummins, S., & Morrison, R. (2020). Advanced comminution modelling: Part 1 – Crushers. *Applied Mathematical Modelling*, 88, 238-265.
- Cundall, P. (1988). Formulation of a three dimensional distinct element model Part-I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.*, 25, 107-116.
- Cundall, P., & Strack, O. (1979). A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Géotechnique*, 29, 47-65.
- Denape, J. (2014). Third body concept and wear particle behavior in dry friction sliding conditions. *Tribological Aspects in Modern Aircraft Industry*, 640, 1-12.
- Dosta, M., & Skorych, V. (2020). MUSEN: An open-source framework for GPU-accelerated DEM simulations. *Software X*, 12.
- Erazo, M. (2013). *Implementación de una máquina para la determinación experimental del desgaste abrasivo de placas de desgaste en chutes* [Tesis Ingeniero Civil Mecánico]. Departamento de Ingeniería Mecánica, UTFSM Valparaíso.
- Finnie, I. (1960). Erosion of Surfaces by Solid Particles. *Wear*, 3, 87-103.
- Fuentealba, F. (2021). *Modelación numérica de la tasa y el patrón de desgaste en un acero SAE 4340* [Tesis Ingeniero Civil Mecánico]. Departamento de Ingeniería Mecánica, UTFSM Valparaíso.
- Gajski & Peir, J.-K. (1985). Essential issues in multiprocessor systems. *COMPUTER*, 18, 9-27.
- GiD SIMULATION. (2024). *GiD* (Ver. 16.1.6d). <https://www.gidsimulation.com/>
- Godet, M. (1984). The third body approach: a mechanical view of wear. *Wear*, 100, 437-452.
- Govender, N., Rajamani, R., Kok, S., & Wilke, D. (2015). Discrete element simulation of mill charge in 3D using the BLAZE-DEM GPU framework. *Minerals Engineering*, 2015, 152-168.
- Govender, N., Wilke, D., & Kok, S. (2016). Blaze-DEMGPU: Modular high performance DEM framework for the GPU architecture. *Software X*, 5, 62-66.

- Grasser, D., Corujeira Gallo, S., Pereira, M., & Barnett, M. (2024). Wear simulation and validation of composites (insert-reinforced matrix) in the dry sand rubber wheel test. *Minerals Engineering*, 207.
- Holm, R. (1946). *Electrical Contacts*. Gerber.
- Holmberg, K., Kivikytö-Reponen, P., Härkisaari, P., & Valtonen, K. (2017). Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International*, 115, 116-139.
- Hu, G., Hu, Z., Jian, B., & Wan, H. (2011). On the Determination of the Damping Coefficient of Non-linear Spring-dashpot System to Model Hertz Contact for Simulation by Discrete Element Method. *J. Comput.*, 6, 984-988.
- Huang, P., Pan, X., Niu, Y., & Du, L. (2022). Concrete failure simulation method based on discrete element method. *Engineering Failure Analysis*, 139.
- Jensen, A., Fraser, K., & Laird, G. Improving the precision of Discrete Element Simulations. En: *En 13th. International LS-DYNA Users Conference*. 2014.
- Knop, F. (2015). *Modelación del desgaste abrasivo mediante el método de elementos discretos* [Tesis de maestría, Departamento de Ingeniería Mecánica, UTFSM Valparaíso].
- Lai, Z., Xia, Y., & Chen, Q. (2023). Discrete element modeling of granular hopper flow of irregular-shaped deformable particles. *Advanced Powder Technology*, 34.
- Luding, S. (2008). Introduction to Discrete Element Methods Basics of Contact Force Models and How to Perform the micro-macro Transition to Continuum Theory, Discrete Model. *Geomaterials*, 785-826.
- Marigo, M., & Stitt, E. (2015). Discrete element method (DEM) for industrial applications: comments on calibration and validation for the modelling of cylindrical pellets. *Kona Powder Part. J*, 32, 236-252.
- Mascaró, P. (2017). *Calibración de un programa basado en el método de elementos discretos para modelar el desgaste abrasivo a partir de mediciones experimentales* [Tesis Ingeniero Civil Mecánico]. Departamento de Ingeniería Mecánica, UTFSM Valparaíso.
- Mechtcherine, V., & Shyshko, S. (2015). Simulating the behaviour of fresh concrete with the Distinct Element Method— Deriving model parameters related to the yield stress. *Cement Concrete Composites*, 55, 81-90.
- Mittal, A., Mangadoddy, N., & Banerjee, R. (2024). Advances in granular flow modeling: GPU-based multi-sphere DEM approach and tumbling mill dynamics. *PowderTechnology*, 444.
- Munjiza, A. (2004). *The Combined Finite-Discrete Element Method*. John Wiley Sons.
- Muth, B., Muller, M., Eberhard, P., & Ludgin, S. Collision Detection and Administration Methods for Many Particles with different sizes. En: *En Discrete Element Modelling (DEM) '07, Brisbane, Australia*. 2007.
- Nezami, E., Hashash, Y. a., Zhao, D., & Ghaboussi, J. (2004). A Fast Contact Detection Algorithm for 3D Discrete Element Method. *Comput. Geotech.*, 31, 575-587.
- Perazzo, F., Lohner, R., Labbe, F., Knop, F., & Mascaró, P. (2019). Numerical modeling of the pattern and wear rate on a structural steel plate using DEM. *Mineral Engineering*, 137, 209-302.
- Peters, R., Hopkins, M., & Kala, R. (2009). Article information Int. J. Comput. Eng. Softw, 26, 645-657.
- Rabinowicz, E., & Mutis, A. (1965). Effect of Abrasive Particle Size on Wear. *Wear*, 8, 381-390.
- Rodríguez, N. (2023). *Optimización de un código para modelar el desgaste abrasivo utilizando programación paralela* [Tesis Ingeniero Civil Mecánico]. Departamento de Ingeniería Mecánica, UTFSM Valparaíso.

- Schramm, F., Kalácska, Á., Pfeiffer, V., Sakumaran, J., De Baets, P., & Frerichs, L. (2020). Modelling of abrasive material loss at soil tillage via scratch test with the discrete element method. *Journal of Terramechanics*, 91, 275-283.
- Shen, X., Cao, L., & Li, R. (2010). Numerical Simulation of Sliding Wear Based on Archard Model. *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*.
- Solis, R. (2022). *Análisis del desgaste abrasivo en aceros TWIP de distinta composición química* [Tesis Ingeniero Civil Mecánico]. Departamento de Ingeniería Mecánica, UTFSM Valparaíso.
- Song, Y., Zhang, D., Ranjith, P., Huang, Y., Wu, B., Zhang, F., Kong, L., & Perera, M. (2024). Critical review of DEM simulation for sand production during geo-energy development: Models, parameters, and future directions. *Powder Technology*, 444.
- Trobec, R., Slivnik, B., Bulić, P., & Robič, B. (2018). *Introduction to Parallel Computing: From Algorithms to Programming on State-of-the-Art Platforms*. Springer.
- Vedachalam, V. (2011). *Discrete Element Modeling of Granular Snow Particles Using LIGGGHTS* [Tesis de maestría, University of Edingburgh].
- Wang, M., & Cai, M. (2025). Simulation of time-dependent response of jointed rock masses using the 3D DEM-DFN modeling approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 188.
- Wellmann, C., Lillie, C., & Wriggers, P. (2008). Homogenization of Granular Material Modeled by a three-dimensional Discrete Element Method. *Computers and Geotechnics*, 35, 394-405.
- Yan, Y., Helmons, R., & Schott, D. (2022). Pin-on-Disc Modelling with Mesh Deformation Using Discrete Element Method. *Materials*, 15.
- Zhao, D., Nezami, E., Hashash, Y. a., & Ghaboussi, J. (2006). Three-Dimensional Discrete Element Simulations for Granular Materials. *Eng. Comput.*, 23, 749-770.
- Zou, Y., Zhang, C., Gou, D., Cheng, G., & Yang, R. (2023). DEM analysis of wear evolution and its effect on the operation of a lab-scale HPGR mill. *Minerals Engineering*, 204.

Apéndice A

Parámetros de Entrada

En el presente anexo se muestran los parámetros de entrada generales utilizados para modelar los ensayos estudiados, destacando las diferencias entre estos. Además, se explicará de forma breve que hace cada parámetro, con tal de brindar un mejor entendimiento de que función cumple cada parámetro presentado. Para más detalles, se recomienda ir al trabajo de Mascaró, 2017.

Es importante mencionar que, para ordenar los ensayos realizados, se les asignó un código de tres números, donde el primer valor corresponde a la granulometría usada para el ensayo, mientras que los dos siguientes corresponden al número de simulación realizada, es decir, el ensayo 631, corresponde al ensayo N°31 realizado con la granulometría 6, mientras que el ensayo 719, correspondería al ensayo N°19, realizado con la granulometría 7. Por último, las tablas que serán presentadas a continuación con los datos de entrada para los diferentes ensayos, son presentadas en el mismo orden que las variables aparecen en los archivos **tipoXXX.txt**, mediante los cuales, se introducen los parámetros de entrada al código.

A.1. Configuración del Ensayo

Los primeros parámetros que aparecen en los archivos de entrada, entregan información a rasgos generales de que ensayo se hará, con que material y como estará representado este. En particular se tiene:

- **Calibración:** Identifica si se simulará el ensayo de la rueda de desgaste (1); o, el ensayo de calibración de coeficiente de roce (2); o, el ensayo de calibración del coeficiente de rebote (3).
- **Fi:** Corresponde al factor de interferencia de las partículas, el cual *está enfocado en ensayos con macropartículas*, y determina que tan juntas están estas. Los valores de Fi deben ir entre 0 y 1.
- **Nmac:** Corresponde al número de partículas que formaran una macropartícula. Este valor puede ir desde 1 a 8.
- **Granulometría:** Corresponde a la distribución de tamaños a utilizar en los ensayos, de las cuales, desde 1 a 4, son granulometrías para ensayos de cobre. En cambio, las opciones de la

5 a 7, corresponde a ensayos de arena. Finalmente, una granulometría 8, correspondería a un caso custom, en el cual todas las partículas tendrían un mismo tamaño.

Variable	Arena CITRAM	Arena ASTM
Calibración	1	1
Fi	1	1
Nmac	1	1
Granulometría	6	7

Tabla A.1: Tabla propiedades para la configuración del ensayo

A.2. Inserción de partículas

Las variables de esta sección del archivo de entrada, controlan todas las características referidas al inlet de la simulación. A continuación, se brindan breves explicaciones de que hace cada una de ellas.

- **xcol:** Determina el número de partículas repartidas paralelas al eje x.
- **ycol:** Determina el número de partículas repartidas paralelas al eje y.
- **ncuerpo:** Es el número máximo de partículas que puede haber dentro del volumen de control al mismo tiempo, durante la simulación.
- **fmod:** Factor de radio para inserción de partículas. Sirve para calcular cual es la distancia que debe haber entre una entra de partículas y la siguiente.
- **alturajet:** Determina la posición, en la dirección vertical, de la entrada.
- **(dx,dy,dz):** Estos valores, determinan la coordenada de la primera partícula de la entrada, medida desde el origen del sistema, y servirá como base para determinar las posiciones de la siguientes. Cabe mencionar que el código está programado con tal de que el centro de la rueda coincida con el origen del sistema.
- **vinicial:** Con estos parámetros, se determina la velocidad de entrada de las partículas al sistema. En esta investigación solo se trabajó con la velocidad en la dirección vertical, pero, si se agrega un valor distinto de cero a *vinicialx*, se puede tener una entrada en diagonal. Para los ensayos mostrados en esta tesis usar *vinicialy* no tiene un sentido, ya que, en la rueda CITRAM, haría que las partículas fueran a golpear directamente un borde, y en la rueda ASTM, haría que estas salieran del volumen de control.

Variable	Arena CITRAM	Arena ASTM
xcol	33	10
ycol	10	60
ncuerpo	12000	15000
fmod	1	1
alturajet	0.075	0.03
dx	0.075	0.082
dy	-0.008	-0.009
dz	0.0	0.0
vinicialx	0	0
vinicialy	0	0
vinicialz	-0.35	-0.087

Tabla A.2: Tabla propiedades para la inserción de partículas

Como se mencionó previamente, en el ensayo de la rueda CITRAM, se modelaron 9 ensayos, los cuales presentan diferentes propiedades, y en la tabla, solo se presentan los parámetros que se utilizan para simular el ensayo 1. Ante lo cual, a continuación, se presenta una tabla resumen con las modificaciones en las entradas para los 8 ensayos restantes. Las variables no mencionadas en la tabla A.2, se mantienen iguales a las del ensayo 631.

Variable	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
xcol	31	33	26	25	24	31	31	26
alturajet	0.075	0.075	0.05	0.05	0.04	0.075	0.075	0.05
dx	0.075	0.075	0.095	0.095	0.095	0.075	0.075	0.95
vinicialz	-0.35	-0.35	-0.4	-0.4	-0.4	-0.35	-0.35	-0.4

Tabla A.3: Tabla variaciones de propiedades ensayos rueda CITRAM

A.3. Volumen de Control

Las variables presentas en esta sección, corresponden a las que limitan el volumen de control del sistema. Durante el trabajo en esta tesis, se aprendió que lo recomendable con respecto al tamaño del volumen de control, para los ensayos de desgaste simulados, es que este no debe ser muy grande, porque sino, terminará traqueando partículas, las cuales no generan desgaste, lo cual es una perdida de recursos computacionales evitable.

La utilidad de cada una de estas variables, es bastante simple de inferir, pero igualmente, se detallan continuación.

- **xiz:** limita el tamaño del volumen de control en la dirección del eje x.
- **xder:** limita el tamaño del volumen de control en la dirección del eje x.
- **yiz:** limita el tamaño del volumen de control en la dirección del eje y.
- **yder:** limita el tamaño del volumen de control en la dirección del eje y.

- **alturacorte:** limita el tamaño del volumen de control en la dirección del eje z. Este valor corresponde a la parte inferior del volumen de control. Mientras que la parte superior toma como referencia el parámetro *alturaajet*, presentado en la sección previa.

Variable	Arena CITRAM	Arena ASTM
xiz	0.01	0.075
xder	0.2	1
yiz	-0.045	-0.0125
yder	0.045	0.0125
alturacorte	-0.1	-0.03

Tabla A.4: Tabla propiedades para tamaño y posición volumen de control

A.4. Tiempo

Con las variables presentadas en esta sección, se controlan los parámetros de tiempo para los diferentes ensayos realizados. Estos son:

- **deltabus:** Corresponde a un factor que se le suma al radio de la partícula, con tal de generar la vecindad donde se hará la búsqueda de vecinos para esta.
- **factorinsercion:** Cumple una función similar a la de **fmod**
- **velbus:** Este parámetro corresponde a la velocidad de búsqueda de las partículas, y se utiliza para saber el número de pasos ciegos que habrá en la simulación.
- **h:** Corresponde al paso de tiempo utilizado en el ensayo.
- **tsimm:** Es el tiempo real que se simulará, medido en segundos.
- **tdegaste:** Esta variable es la indica desde que segundo se comenzará a medir el desgaste, es decir, desde cuando el modelo comenzará a deformar la malla, representado el desgaste abrasivo. La recomendación de elección de este parámetro, es que se corresponda con el tiempo cuando la placa se ha estabilizado. Al igual que **tsimm**, este parámetro está medido en segundos.
- **fotos:** Finalmente, este parámetro indica el número de instantes de los cuales se obtendrán archivos de salida **.vtk**. Por lo general, este valor está seteado a 100, pero se puede reducir o aumentar, según se desee.

Cabe destacar que el tiempo de simulación para el ensayo de la arena ASTM, se deja vacío, ya que se realizaron diferentes duraciones en general, las cuales se presentaron en el documento. También, es importante notar que los tiempos de comienzo de desgaste son diferentes para ambos ensayos, esto es debido a que la placa de desgaste en el ensayo de la rueda ASTM, se estabiliza más rápido, que para el ensayo de la rueda CITRAM.

Variable	Arena CITRAM	Arena ASTM
deltabus	$0.625 \cdot 10^{-3}$	$1.25 \cdot 10^{-4}$
factorinersion	1	1
velbus	25	15
h	$5 \cdot 10^{-7}$	$7.88 \cdot 10^{-8}$
tsimm	1	—
tdegaste	0.2	0.06
fotos	100	100

Tabla A.5: Tabla propiedades para las variables relacionadas con tiempo del código

A.5. Propiedades asociadas a la malla

A.5.1. Propiedades placa de desgaste

En esta sección, se presentan las propiedades que tienen relación con las propiedades físicas, y la posición de la geometría de la placa de desgaste. En este caso, no se entrará en detalle en las variables relacionadas con la dureza específica del material, ni las fuerzas de presión aplicadas, ya que éstas fueron presentadas en detalle en el documento principal.

Nuevamente, con tal de comprender mejor que hace cada variable, se presentan las siguientes explicaciones.

- **dureza:** Esta variable, como ya se explicó en el documento principal, corresponde a la dureza específica del material, es decir, que corresponde a la dureza del material, dividida por una constante de desgaste específica, la cual hace que los valores varíen entre ensayos, debido a las diferentes condiciones bajo las cuales trabajan.
- **fuerzapresion:** En este caso, aquí se presenta el par de torsión aplicado en el punto de giro, el cual provoca la fuerza deseada para el ensayo que se esté calculando. Como es un par de torsión, este se trabaja en $[Nm]$.
- **alphaa:** Corresponde al ángulo inicial para la placa, al inicio de la simulación.
- **(dxplaca, dyplaca, dzplaca):** Corresponden a las coordenadas usadas para la traslación de la placa. Esto es porque el archivo **.vtk** utilizado para la placa, coloca esta en una posición en la cual de no hacerse este acomodo, no funcionaría el ensayo. Como detalle, por temas de la programación original del código, las coordenadas de dxplaca y dzplaca, están invertidas, respecto a lo que se aplica en punto de giro, es decir, si por alguna razón, se quiere mover la placa, hay procurar que dzplaca, coincida con el punto de giro 1, a menos que se quiera arreglar el código que hace la traslación, el cual se encuentra en la rutina **Lectura de malla**, líneas 104 – 147.
- **puntogiro:** Tal como se mencionó, este código para aplicar las fuerzas, utiliza un momento, el cual se posiciona, en las coordenadas indicadas en estas variables. Cabe destacar que la posición de este eje de rotación, se hizo en base a las geometrías que se presentan en los planos para cada ensayo, es decir, el pivote para la rueda CITRAM, se encuentra en el extremo superior de la placa. Mientras que, para el ensayo de la rueda ASTM, el pivote está a una distancia de 15 [cm] de la placa, con tal de simular el brazo en el cual se encuentra la probeta ensayada.

Variable	Arena CITRAM	Arena ASTM
dureza	—	—
fuerzapresion	—	—
alphaa	30°	0°
dxplaca	0.02465	0
dyplaca	0	0
dzplaca	0.1	0.0878
puntogiro(1)	0.1625	0.0878
puntogiro(2)	0	0
puntogiro(3)	0.0794	0.151

Tabla A.6: Tabla propiedades para las variables relacionadas con la caracterización de la placa de desgaste

A.5.2. Propiedades de la dinámica de la rueda

En este apartado, se presentan las propiedades que controlan el movimiento de la rueda para cada uno de los ensayos. Nuevamente, no se entrará en detalle de la velocidad de giro para los ensayos de la rueda CITRAM, debido a que estos son detallados en el documento principal.

- **rps:** Indica la velocidad de giro para la rueda, en revoluciones por segundo.
- **(dxrueda, dyrueda, dzrueda):** Estas coordenadas indican el punto en el cual estará ubicado el centro de la rueda de desgaste.

Variable	Arena CITRAM	Arena ASTM
rps	—	3.33
dxrueda	0	0
dyrueda	0	0
dzrueda	0	0

Tabla A.7: Tabla propiedades para las variables relacionadas con la caracterización del movimiento de la rueda de goma

A.5.3. Propiedades del Solido a Granel

Esta sección del archivo de entrada, solo es útil si se utiliza la granulometría configurable del ensayo. En este caso, esa opción corresponde a trabajar con la granulometría 8, pero en caso de que en un futuro se agreguen nuevas distribuciones de tamaños, ese valor podría cambiar. Cabe destacar, que los valores configurados en esta sección, serán utilizado, si y solo si, se trabaja con la granulometría número 8, en caso contrario, el código sobrescribirá los valores colocados en las variables **densidad** y **radio**, con los de la granulometría elegida al inicio, en la primera sección del archivo de entradas.

A.6. Propiedades de calibración del ensayo

Finalmente, esta sección brinda información sobre las características para que el comportamiento de los diferentes elementos involucrados en la simulación, sea lo más cercano a la realidad posible. Estas se describen a continuación.

Cabe destacar que, al eliminar el chute para la inserción de partículas, se redujo la cantidad de entradas en esta sección, comparada con trabajos anteriores, ya que no se utilizan las variables que refieren al chute. Aún así, estas variables no han sido eliminadas del código original, simplemente quedaron comentadas, por lo cual, en caso de que en futuro se quiera volver a utilizar un chute, no hay problemas para hacer ese cambio.

A.6.1. Coeficiente de rebote

- **vpart:** Coeficiente de rebote partícula-partícula eficiencia.
- **vplaca:** Coeficiente de rebote placa de desgaste-partícula.
- **vgoma:** Coeficiente de rebote partícula-pared de goma.
- **vbr:** Coeficiente de rebote borde rueda-partícula.

Variable	Arena CITRAM	Arena ASTM
vpart	0.01	0.01
vplaca	0.7	0.7
vgoma	0.9	0.9
vbr	0.8	0.8

Tabla A.8: Tabla Coeficientes de rebote

A.6.2. Coeficiente de roce

- **muplaca:** Coeficiente de roce estático Placa de desgaste-partícula.
- **mugoma:** Coeficiente de roce estático partícula-pared de goma.
- **mue:** Coeficiente de roce estático entre partículas.
- **fmuc:** Coeficiente de roce estático/dinámico.
- **roda:** Coeficiente de resistencia a la Rodadura, debe estar entre 0 y 1.
- **mup:** Coeficiente de roce estático caras restantes.

Variable	Arena CITRAM	Arena ASTM
muplaca	0.7	0.7
mugoma	1.835	1.835
mue	0.18	0.18
fmuc	0.5	0.5
roda	0.94	0.94
mup	0.7	0.7

Tabla A.9: Tabla Coeficientes de roce

A.6.3. Módulos elásticos

- **eplaca:** Módulo elástico de la placa.
- **egoma:** Módulo elástico de la pared de goma.
- **ebr:** Módulo elástico para el borde de rueda.
- **elastp:** Módulo elástico de la partícula.
- **elast:** Modulo elástico para las caras restantes.

Variable	Arena CITRAM	Arena ASTM
eplaca	$2.1 \cdot 10^{11}$	$2.1 \cdot 10^{11}$
egoma	$1.77 \cdot 10^{11}$	$1.77 \cdot 10^{11}$
ebr	$2.1 \cdot 10^{11}$	$2.1 \cdot 10^{11}$
elastp	$0.7 \cdot 10^9$	$0.7 \cdot 10^9$
elast	$2.1 \cdot 10^{11}$	$2.1 \cdot 10^{11}$

Tabla A.10: Tabla módulos elásticos

A.7. Otros

En cada archivo de entrada, al final, se encuentran otras propiedades, las cuales están relacionadas con los dos ensayos de calibración modelados por Mascaró, 2017. Para más detalles sobre estos, se recomienda revisar el trabajo citado

Apéndice B

Mallado de geometrías

Este anexo es un breve repaso sobre la generación de las mallas para las placas de desgaste, como también un poco más de detalle, respecto al comportamiento de la huella de desgaste al utilizar mallas diferentes, esto último no fue agregado al documento principal, porque el mayor interés estaba en utilizar mallas con elementos de tamaño menor que las partículas más pequeñas en la simulación, pero por temas de tiempos de cálculo, hacer estos estudios se dificultaba en gran manera.

B.1. Generación de Mallas

Para generar las mallas, como ya fue mencionado, se utilizó GID. Esta sección del anexo, se centrará en mostrar como se generaron las mallas para las placas de desgaste, ya que estas son las geometrías que se pueden cambiar a futuro. Como detalle, en caso de querer crear nuevas placas de desgaste, se recomienda utilizar las ya existentes como base para estas, este comentario es principalmente enfocado en lo ya descrito en el anexo previo, que es que el código realiza traslaciones de las figuras hasta las posiciones del ensayo, por lo cual, si se crea una nueva placa de desgaste que no fuera creada en el mismo plano que las usadas en las tesis relacionadas con este código, no se podrán obtener resultados, debido a que la placa de desgaste estará mal posicionada.

Entendiendo lo anterior, se procede a explicar el proceso de generación de mallas. Primero se comienza cargando un proyecto al programa, para ello, se utiliza el botón con forma de carpeta abierta en la esquina superior izquierda de la pantalla, lo cual abrirá una ventana, donde deberás buscar el proyecto que quieras utilizar (B.1).

Una vez cargado el proyecto, se va a la generación de malla, tal como se presenta en la figura B.2. En este caso se elige una malla *no estructurada*, pero se podrían utilizar otros tipos si así se estima conveniente. Cabe destacar que, si en el proyecto ya se ha creado una malla previamente, y ahora se quisiera hacer una nueva, es recomendable eliminar la malla ya existente, en el mismo menú que se presenta en la figura B.2.

En caso de elegir utilizar una malla *no estructurada*, para el proyecto presentado, entonces, habrá que colocar el tamaño de los elementos de malla por pantalla, como se muestra en la figura B.3. Si se aprecia en detalle la figura anteriormente comentada, se puede observar que esta se encuentra dividida en tres secciones diferentes, esto es debido a que refinar toda la placa con el tamaño de triángulos más pequeños, haría que se consumieran demasiados recursos, debido a que el programa

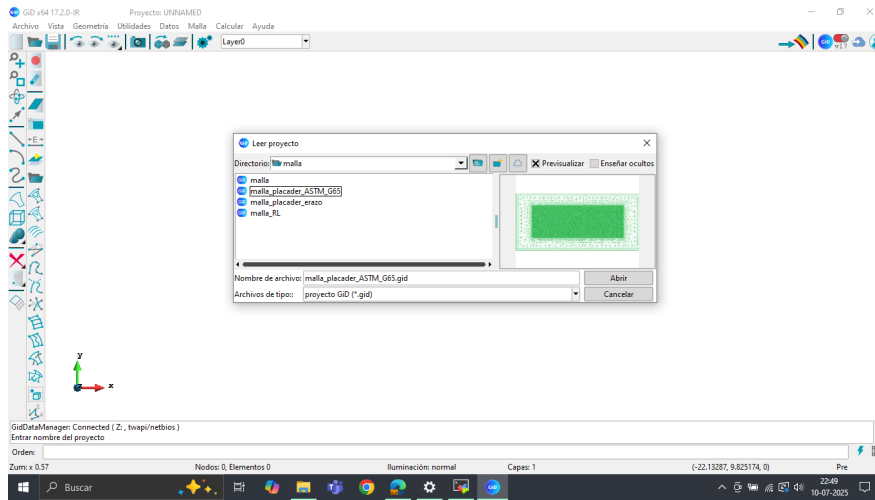


Figura B.1: Selección archivos

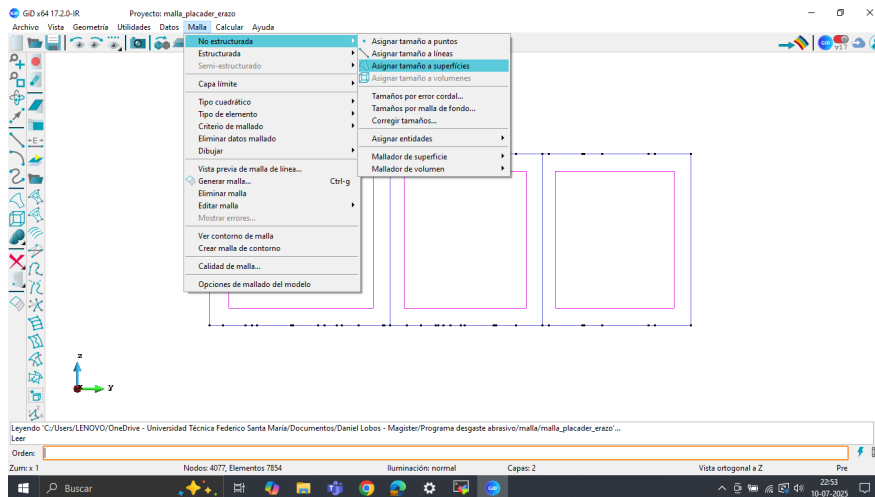


Figura B.2: Opciones para generar una malla

tendría que registrar más nodos y caras, lo cual luego hace más largas las listas de vecinos que deben ser revisadas, en resumen, hacen que el código se demore más en calcular los resultados, por sobre-refinar la malla, en zonas que probablemente no lleguen a ser desgastadas en ningún momento durante la simulación. Por esto, se recomienda siempre se consciente de no hacer mallas muy finas, porque sino el código tardará tiempos muy grandes en hacer incluso las simulaciones de menos duración.

Una vez se haya creado la malla, además de guardar el proyecto para poder seguir utilizándolo como base para nuevas refinaciones, hay que exportar la geometría en formato **.STL**. Para ello, se debe ir al menú que se indica en la figura B.4. Este paso es el más importante en la generación de mallas para este modelo, debido a que el programa solo reconocerá las geometrías si estas se le entregan en formato STL, y nombradas de la forma que corresponde. En particular, respecto a este último punto, el código hasta la fecha lee solo las geometrías que son archivos STL y tienen los nombres correspondientes que aparecen en la rutina **Lectura de malla**, en las líneas 18–20.

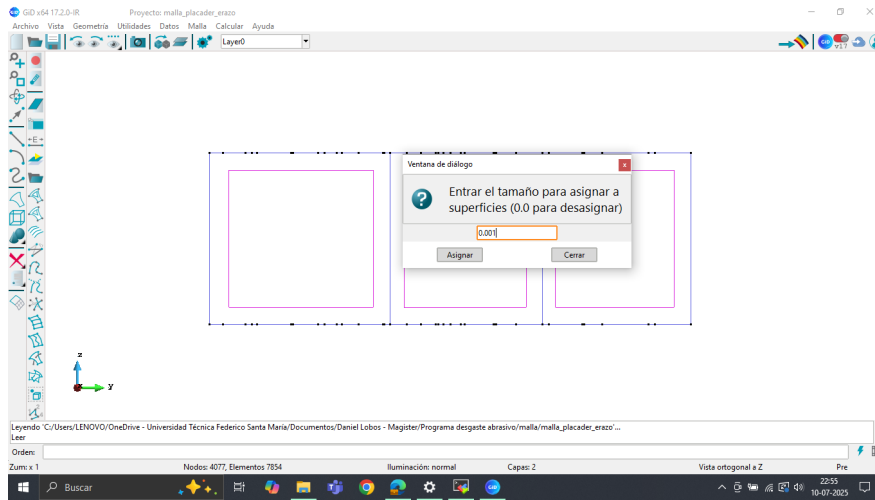


Figura B.3: Tamaño elemento de malla

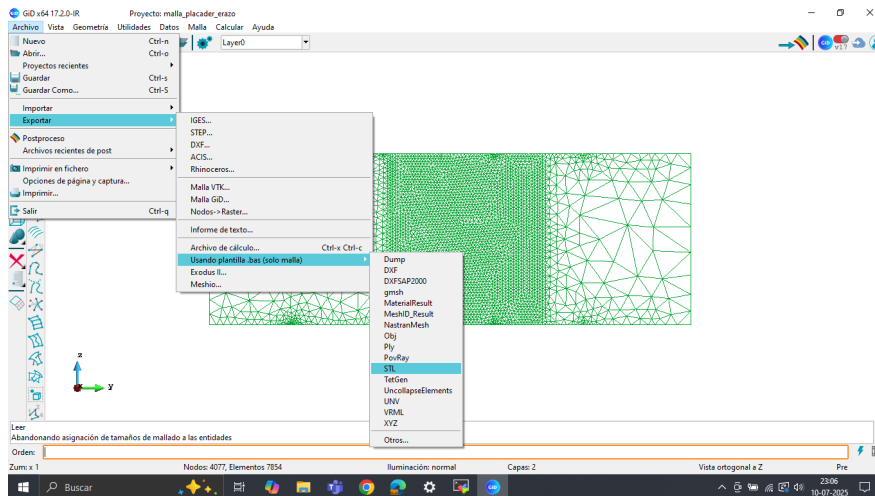


Figura B.4: Exportar malla como archivo STL

Las imágenes presentadas son para la placa utilizada en los ensayos de la rueda CITRAM, pero el proceso es el mismo para la placa de la rueda ASTM.

B.2. Diferencias mallados

Como ya fue mencionado en el documento principal, se trabajó con mallas que en la sección más fina, los elementos tienen el tamaño de las partículas más pequeñas, ya que esa refinación brinda buenos resultados, como también permite hacer las simulaciones en tiempos razonables. Pero, el código tiene la posibilidad de trabajar con distintos refinamientos, lo cual será mostrado a continuación.

Se presentan resultados para el ensayo de la rueda CITRAM, todos simulados en el servidor **PROLIANT**, usando 16 procesadores. Las simulaciones presentadas en la tabla, corresponden al ensayo 1, donde la rueda y la fuerza aplicada por la placa, son las mínimas posibles. También es importante destacar, que todos los ensayos son realizados en base a los parámetros de entrada de la simulación 631, siendo la malla utilizada, lo único que cambia.

Malla [mm]	Tasa Desgaste [g/s]	Tiempo [min]
1.0	$1.8962 \cdot 10^{-3}$	785
1.3	$1.9012 \cdot 10^{-3}$	746
1.6	$1.9325 \cdot 10^{-3}$	737

Tabla B.1: Tabla comparativa para diferentes mallas, en rueda CITRAM

Recordando, que el ensayo con malla de elementos más pequeños de 1.0 [mm], corresponde al caso 631, el cual tenía un error de 0.6 % respecto de la tasa de desgaste real de $1.8916 \cdot 10^{-3}$. Primero, es fácil apreciar que los ensayos con mallas de mayor tamaño, desgastan más, esto es porque como ya se ha visto, el modelo para representar el desgaste lo que hace es desplazar triángulos y luego calcular el volumen removido, y con este, obtener cuanta masa ha removido cada contacto. Entonces, al ser más grandes los triángulos, el código considera que la partícula desgasta más que en casos con una refinación mayor. Pero solo viendo los resultados en términos de tasas de desgaste, no es suficiente para saber cual es la malla más conveniente, sino que para ello, también es necesario un análisis de las huellas obtenidas.

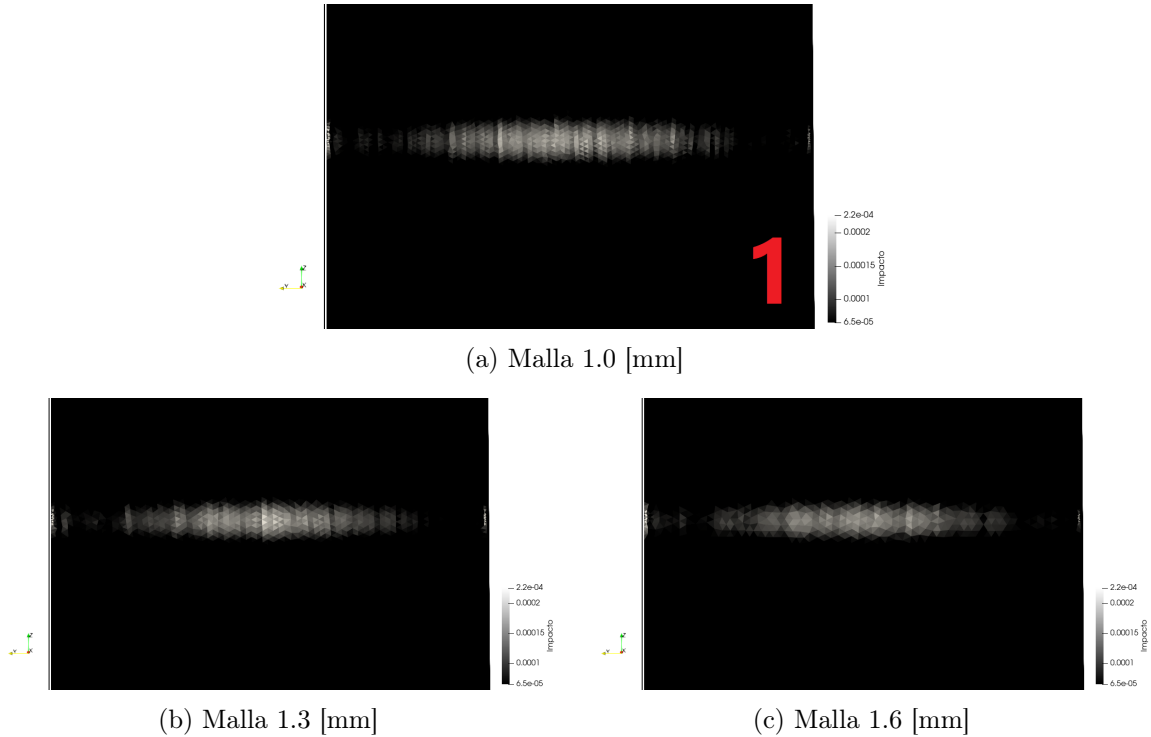


Figura B.5: Comparación Huellas para diferentes mallas rueda CITRAM

En la figura B.5, se logra apreciar un poco la diferencia entre los resultados, que en general no es demasiada, pero si se puede notar que mientras más fina la malla, se nota un poco mejor la pasada de las partículas por sobre la placa. En resumen, el utilizar mallas más grandes, no brinda grandes ganancias para la modelación en general, puesto que las huellas no se ven mejor, por lo cual, tratar de calibrar la tasa de desgaste en estos ensayos para que se asemeje a la real no parece una opción tentadora. Además, la ganancia en tiempos no es notoria, ni suficiente como para preferir el usar mallas más grandes en carreras de prueba, es mejor de un principio comenzar con las mallas que se quieren.

Para el caso de la rueda ASTM, se aprecian tendencias similares en las huellas, es decir, se desgasta más, y las diferencias en tiempo nuevamente no son muy grandes. Ante esto es que en realidad, se da recomendación, utilizar un mallado que se condiga con el tamaño de la partículas más pequeña.

Apéndice C

Generación del Postproceso

En el presente anexo, se brinda una breve guía para futuros trabajos, sobre como obtener las diversas imágenes y gráficos relacionados con la huella de desgaste.

C.1. Paraview

En este caso, se dividirá esta sección en tres partes diferentes. La primera enfocada a cargar las figuras en el programa; la segunda, detallará las configuraciones necesarias para visualizar los ensayos de manera correcta; y por último, la tercera será sobre como manejar la escala de colores, para obtener figuras como las presentadas en el documento principal.

C.1.1. Agregar la geometría

Lo primero para poder hacer el postproceso en este programa, es agregar la geometría que se quiere revisar. Para ello, primero se va la opción *Open*, la cual se encuentra en la esquina superior izquierda de la pantalla, se elige el directorio donde se encuentran los archivos de salida, y se eligen todos, tal como se presenta en la figura C.1.

Luego de tener cargadas las figuras, se debe de apretar el botón *Apply*, con tal de que se puedan visualizar las figuras en pantalla. En la figura C.2, se puede apreciar lo que se debería ver por pantalla, para una simulación de la rueda CITRAM.

C.1.2. Configuraciones para la visualización

Una vez cargados los archivos, se puede modificar el tamaño de las partículas, para que estas se vean como una distribución y no como partículas de un mismo tamaño. Para esto, uno va al archivo de partículas, donde primero se modifica la opción *Representation*, en el menú desplegable que aparece debajo de los archivos *.vtk* subidos a Paraview, como se aprecia en la figura C.3.

Una vez en este menú, se elige la opción *Point Gaussian*, la cual en primera instancia hará que todas las partículas se vean más grandes que lo esperado, pero para arreglar esto, en el mismo menú, hay que bajar hasta el apartado que se llama *Point Gaussian*, en el cual, primero hay que seleccionar un radio gaussiano, el cual debe corresponder al radio de la partícula más grande. Además, se debe

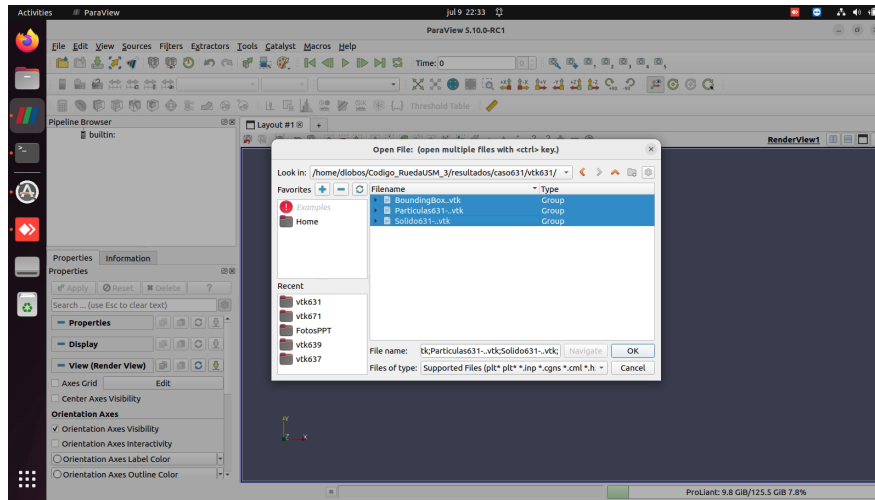


Figura C.1: Selección archivos

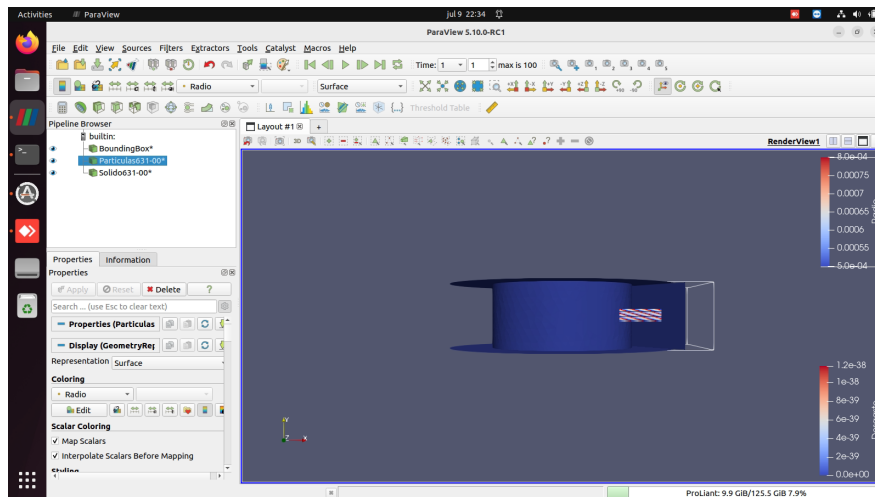


Figura C.2: Archivos por pantalla

tener activada la opción *Use Escalé Array*, para que las partículas se vean como una distribución que sigue los tamaños correspondientes. Cabe destacar que la configuración *Use Escalé Array*, no está activada por default, por lo cual, debe ser activada manualmente, si se quiere que las partículas se vean como una distribución, tal como se aprecia en la figura C.4

Lo último relacionada con esta parte, tiene relación con hacer cortes en la geometría subida al programa. Para esto, se debe utilizar la opción *Clip*, donde se debe elegir un plano para el corte, tal como se muestra en la figura C.5. Algo importante al usar esta herramienta, es que la opción *Invert*, que se aprecia en la esquina inferior izquierda de la figura C.5, tiene que está desactivada, porque sino, el corte que muestre el programa, no será el que se busca.

Si los pasos se han seguido de forma correcta, se debería tener algo como lo que se presenta en la figura C.6. En esta figura en particular, también se ha hecho invisible el plano de corte, lo cual puede ser realizado en el mismo menú en el cual se ha configurado la herramienta *Clip*.

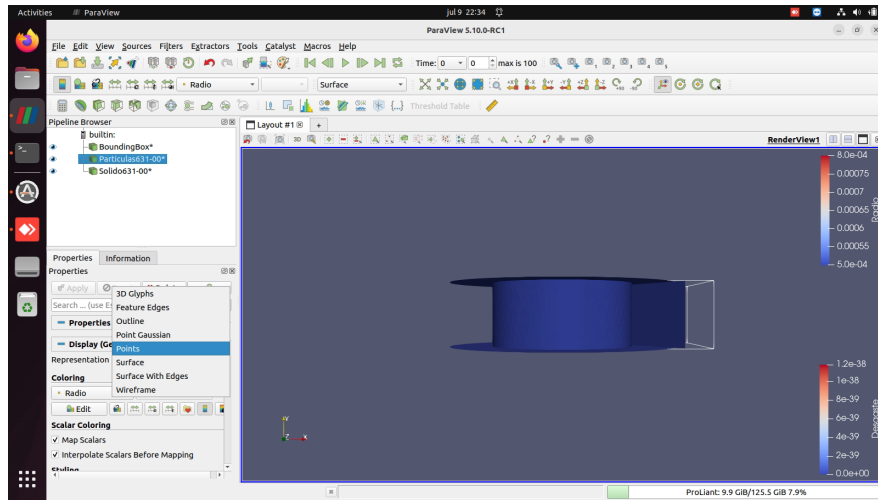


Figura C.3: Selección representación para partículas

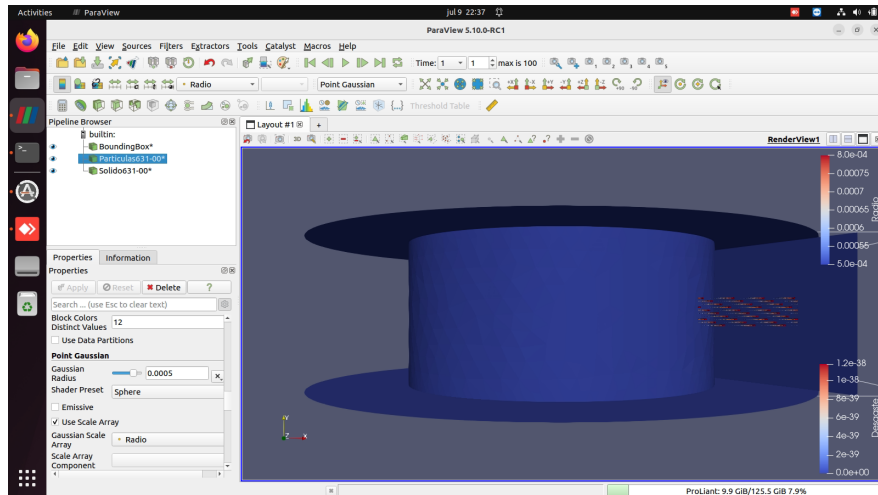


Figura C.4: Partículas representadas con una distribución de tamaños

C.1.3. Arreglos finales

Con el trabajo realizado hasta la sección anterior, ya se tiene una figura en la cual, se puede apreciar en detalle la huella, tal como se aprecia en la figura C.7. Como recomendación, ya que se harán múltiples figuras a lo largo de un trabajo, y andar calibrando la posición de la geometría todo el tiempo es un gasto innecesario de tiempo, se recomienda dejar registradas posiciones utilizando el icono con forma de cámara en la parte superior de la pantalla, hacia la derecha. Tal como se aprecia en la imagen, para este caso se dejaron guardadas 5 configuraciones, las cuales son para diferentes simulaciones, así, se puede garantizar que las figuras sean lo más prolijas posibles al comparar entre ellas.

Finalmente, la última configuración a realizar corresponde a cambiar el color de la placa, la representación del desgaste (pasando de *Desgaste* a *Impacto*), y los límites para la coloración de este. Para esto, hay ir al menú desplegable del *Clip*, donde primero se cambiará el color de la geometría,

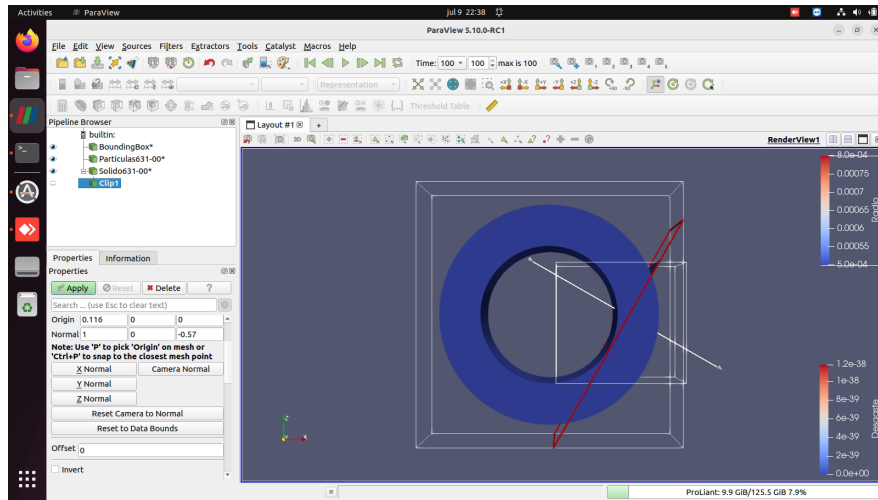


Figura C.5: Generación corte de la geometría para visualización de la huella

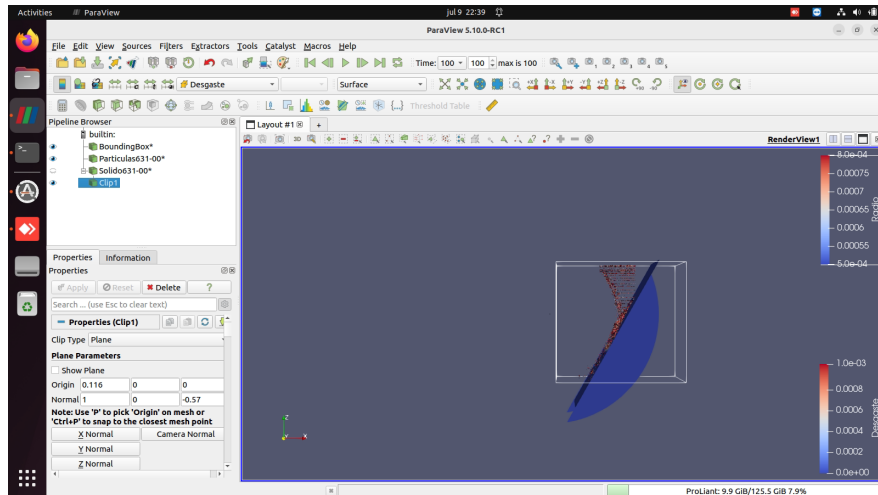


Figura C.6: Corte de la geometría para visualización de la huella

yendo a la sección de *Coloring* del menú, en particular la opción *Edit*, donde aparecerá un nuevo menú a la derecha, como se aprecia en la figura C.8.

Aquí, luego de elegir la opción **X-Ray**, si esta es la que se utilizará, se debe luego invertir la escala de colores en este menú, porque sino de lo contrario, la figura se verá blanca, lo cual hace complejo poder apreciar los patrones de buena manera. Para invertir la escala, se debe apretar el botón que tiene un círculo blanco, que se encuentra sobre un fondo blanco y negro, el cual se logra apreciar, en el centro de la pantalla, a la derecha, en la figura C.9.

Por último, antes de exportar la imagen, se recomienda configurar los límites de la coloración, a unos límites fijo para todos los ensayos del experimento, con tal de que se puedan apreciar bien las diferencias entre los distintos ensayos, porque sino de lo contrario, el programa automáticamente, elige los máximos y mínimos de la coloración, haciendo que todas las figuras se vean iguales, cuando

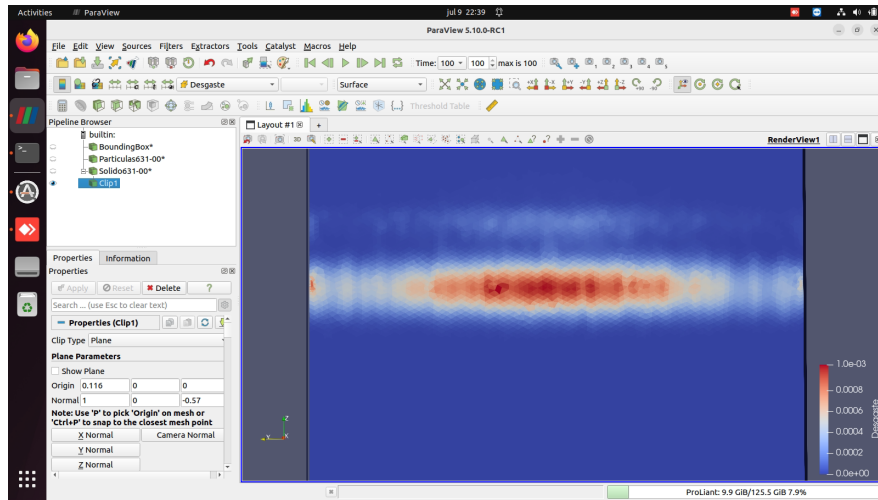


Figura C.7: Imagen de la huella desgastada

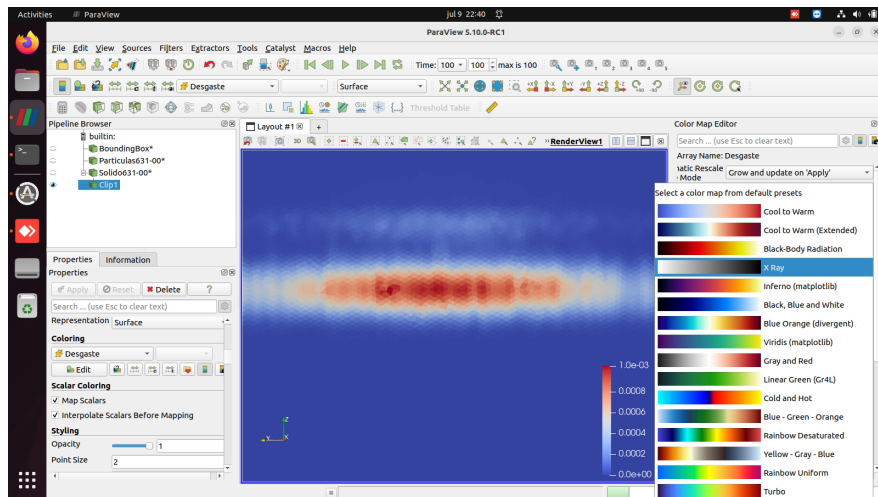


Figura C.8: Cambiar coloración placa

esto no debe de ser así, puesto que unas se han desgastado más que otras, tal como se apreció en el documento principal. En la figura C.10, se presenta un ejemplo para los límites, opción la cual aparece al apretar el botón al centro de la fila donde está la opción *Edit* para los colores de la placa.

Luego de hacer todo lo anterior, se deberían apreciar figuras como las vistas en el documento principal.

C.2. Matlab

Para genera figuras con Matlab, el proceso es simple, solo basta con colocar el nombre del archivo de salida que se quiere postprocesar. Es importante recordar que el código desarrollado para post-procesar figuras, solo trabaja con un archivo de salida a la vez, a diferencia de Paraview, donde se

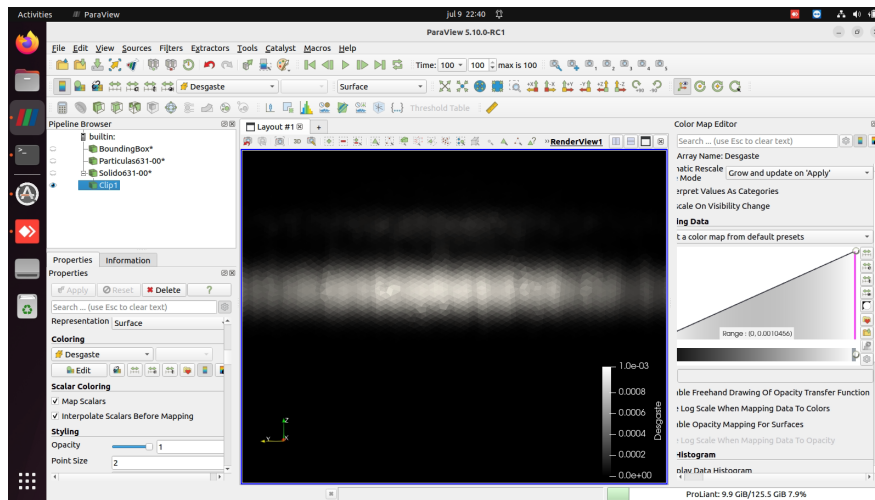


Figura C.9: Cambiar coloración placa, inversión de colores

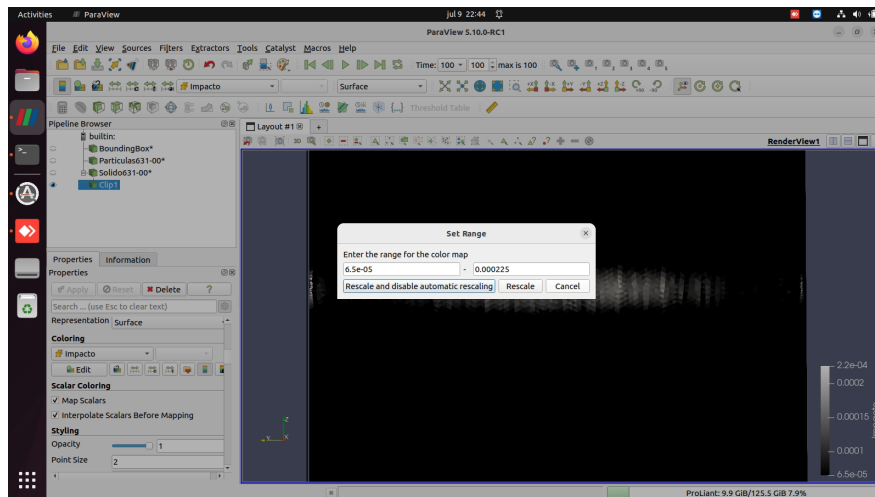


Figura C.10: Seleccionar un rango para los ensayos

pueden cargar todos los archivos a la vez. Para poder cargar una archivo de salida, que se encuentra en la misma carpeta que el código de MATLAB, se debe agregar este como archivo se presenta a continuación.

```
%===== CITRAM =====
A = VTK_read('Solido626-00100.vtk','vtk');
```

En caso de que este archivo esté en un directorio diferente, bastará con simplemente agregar el directorio, tal como se presenta en la siguiente línea.

```
%===== ASTM =====
A = VTK_read("Caso750-10seg/Solido750-00100.vtk",'vtk');
```

Previo a continuar con la explicación del código, se debe destacar que este trabaja junto con

VTKread.m, el cual es utilizado para poder leer la información de los archivos de salida y transformarlo en variables trabajables por el programa. Continuando, se pasa a la sección del programa, donde se detallan los parámetros tanto de la malla que está siendo leída, como también del número de nodos que será utilizado en las interpolaciones posteriores. Esta sección del código, también será la encargada de filtrar cuales son los datos que corresponden a la malla, y el resto de geometrías, esto debido a que el archivo de salida que entrega el programa para el sólido, guarda la información de la posición de cada nodo, de la rueda de desgaste, como de la placa.

```
%% Variables para hacer los graficos

B = A.points;
C = A.cells;
C = C(:,2:4) + 1;
R = 32218; %ASTM Malla 0.2 mm
%R = 18053; %CITRAM
%R = 15362; %ASTM Malla 0.3 mm

N = 250; NN = 500; % Estos son los puntos para usar en las
    interpolaciones

flag1 = 0; % Sirve para activar (=1) o apagar (=0) lo cortes a lo
    largo de las placas
flag2 = 0; % Sirve para activar (=1) o apagar (=0) los graficos con
    Griddata

%%
B1 = B(1:R*3,1:3);
C1 = C(1:R,1:3);
aux = 1;

Luego de que el código haga la lectura de la nube inicial de punto con la que se trabaja, pasa a la
rotación y traslación de la placa. Este paso se realiza con tal de que la placa quede en un angulo de
inclinación igual a cero, y con su borde inferior tocando uno de los ejes del sistema de referencia. Esto
se hace, primero, porque los interpoladores solo hacen cortes verticales, lo cual provoca que si se trata
de cortar la placa cuando aún está inclinada, se producen cortes que no se corresponden con la figura.

%% Rotaciones y Traslaciones a aplicar para hacer las graficas
zmax = max(B1(:,3)); zmin = min(B1(:,3)); xmax = 0; xmin = 0.9; ymin=
    min(B1(:,2)); ymax= max(B1(:,2));

for i=1:length(B1(:,3))
    if B1(i,3) == zmax
        xmax = max(xmax,B(i,1));
    elseif B1(i,3) == zmin
        xmin = min(xmin,B(i,1));
    end
end
```

```

% Para los cortes transversales (traslaci n de la placa)
BB1 = [B1(:,1)-xmin B1(:,2) B1(:,3)-zmin];

ry_angle = atan((zmax-(zmin))/(xmax-xmin));
Ry = makehgtform('yrotate',(2*pi-ry_angle));

BB1 = BB1 * Ry(1:3,1:3);

% Para los cortes verticales
BB2 = [BB1(:,1) BB1(:,2)-ymin BB1(:,3)];

Rz = makehgtform('zrotate', -pi/2);

BB2 = BB2 * Rz(1:3,1:3);

```

Una vez el código ya ha realizado todo lo anterior, se entrega esta nube de puntos a los interpoladores, con tal de que puedan reconstruir el perfil. En este caso solo se presentará el caso para **Scattered Interpolant**, pero el código funciona de igual manera para **Griddata**.

Explicando de forma resumida lo que hace el código, se tiene que: primero la función *scatterInterpolant*, a la cual se le entrega la nube de puntos, reconstruye la placa, mediante su algoritmo. Al mismo tiempo, se hará una matriz de puntos, utilizando *meshgrid*, para luego evaluar la función obtenida al usar el interpolador, y poder obtener el perfil. Luego, se comienzan a generar los distintos gráficos que entrega como salida este programa.

- Gráficos de referencia: Son los primeros que entrega el programa, más que nada utilizado para ver que todo esté funcionando bien con la representación. En caso de no estar teniendo problemas, se pueden comentar.
- Vista Superior: Este gráfico trata de asimilar el postproceso realizado en Paraview.
- Zona más desgastada: En esta sección, el código primero busca donde se encuentra el punto más desgastado, es decir, donde se encuentra la mayor hendidura en la placa. Luego de encontrarlo, hará un corte en la dirección deseada, el cual será como un ensayo de redonde para el perfil simulado.
- Cortes a lo largo de la placa: Esto cortes solo se activan al cambiar el valor de la *flag1*, al inicio del código, esto debido a que por lo general son múltiples figuras las que entrega esta sección, por lo cual, si se está trabajando con obtener solo los cortes de la zona más desgastada de diferentes perfiles, tener esta opción constantemente activa puede ser molesto. Lo que se hace aquí es un barrido de cortes, con el cual se puede apreciar como se desarrolla la huella, ya sea en el perfil transversal o longitudinal.

Lo recién comentado corresponde a lo que se realiza para los cortes transversales. Para los cortes longitudinales, el proceso es el mismo, todo en base a la misma interpolación realizada al inicio, tal como se ve en las líneas presentadas a continuación.

```

%% Scatterd Interpolant (Transversal)
F = scatteredInterpolant(BB1(:,1),BB1(:,2),BB1(:,3),'natural');
[xq,yq] = meshgrid(linspace(min(BB1(:,1)),max(BB1(:,1)),N),linspace(
    min(BB1(:,2)),max(BB1(:,2)),N));
zq = F(xq,yq);

figure
surf(xq,yq,zq)
hold on
c = jet;
c = flipud(c);
colormap (c)
shading flat
patch([max(BB1(:,1))/2,max(BB1(:,1))/2,max(BB1(:,1))/2,max(BB1(:,1))
    /2], ...
    [min(BB1(:,2)),max(BB1(:,2)),max(BB1(:,2)),min(BB1(:,2))], ...
    [-1e-5,-1e-5,1e-5,1e-5], 'w', 'FaceAlpha',0.7);
plot3([max(BB1(:,1))/2,max(BB1(:,1))/2],[max(BB1(:,2)),max(BB1(:,2))
    ],[-1e-5,1e-5], 'r', 'linewidth',3);

xlim([min(BB1(:,1)) max(BB1(:,1))])
ylim([min(BB1(:,2)) max(BB1(:,2))])
zlim([min(BB1(:,3))*10 min(BB1(:,3))*-10])
xlabel('X')
ylabel('Y')
zlabel('Z')
title('Corte Transversal Scatterd Interpolant')

% Vista Superior
figure
surf(xq,yq,zq)
xlim([min(BB1(:,1)) max(BB1(:,1))])
ylim([min(BB1(:,2))*2.5 max(BB1(:,2))*2.5])
zlim([min(BB1(:,3))*10 min(BB1(:,3))*-10])
c = gray;
c = flipud(c);
colormap (c)
shading interp
%clim ([-9e-7 0]) %Esto es para ajustar los l mites del mapa de
    colores
view(-90,90)

% Zona m s desgastada
[M,I] = min(BB1(:,3));
xq2 = linspace(BB1(I,1),BB1(I,1),NN);
yq2 = linspace(min(BB1(:,2)),max(BB1(:,2)),NN);
zq2=interp2(xq,yq,zq,xq2,yq2);

```

```

dq = sqrt((xq2-BB1(I,1)).^2 + (yq2-(min(BB1(:,2))))).^2);
figure
plot(dq,zq2-max(zq2),'r','LineWidth',1.5)
xlim([min(dq) max(dq)])
ylim([-1e-5 0])
title('Corte Transversal Scatterd Interpolant')

% Cortes a lo largo de la placa
if flag1 == 1
    for j=0:1e-3:0.052
        xq2 = linspace(j,j,NN);
        yq2 = linspace(min(BB1(:,2)),max(BB1(:,2)),NN);
        zq2=interp2(xq,yq,zq,xq2,yq2);

        dq = sqrt((xq2-j).^2 + (yq2-(min(BB1(:,2))))).^2);
        figure
        plot(dq,zq2-max(zq2))
        xlim([min(dq) max(dq)])
        ylim([-1e-5 0])
        drawnow
    end
end

%% Scatterd Interpolant (Longitudinal)
F = scatteredInterpolant(BB2(:,1),BB2(:,2),BB2(:,3),'natural');
[xq,yq] = meshgrid(linspace(min(BB2(:,1)),max(BB2(:,1)),N),linspace(
    min(BB2(:,2)),max(BB2(:,2)),N));
zq = F(xq,yq);

figure
surf(xq,yq,zq)
hold on
c = jet;
c = flipud(c);
colormap(c)
shading flat
patch([min(BB2(:,1))/2,min(BB2(:,1))/2,min(BB2(:,1))/2,min(BB2(:,1))
/2], ...
    [max(BB2(:,2)),min(BB2(:,2)),min(BB2(:,2)),max(BB2(:,2))], ...
    [-1e-5,-1e-5,1e-5,1e-5],'w','FaceAlpha',0.7);
plot3([min(BB2(:,1))/2,min(BB2(:,1))/2],[max(BB2(:,2)),max(BB2(:,2))
],[-1e-5,1e-5],'r','linewidth',3);
xlim([min(BB2(:,1)) max(BB2(:,1))])
ylim([min(BB2(:,2)) max(BB2(:,2))])
zlim([min(BB2(:,3))*10 min(BB2(:,3))*-10])
xlabel('X')

```

```

ylabel('Y')
xlabel('Z')
title('Corte Longitudinal Scatterd Interpolant')

% Zona m s desgastada
[M,I] = min(BB2(:,3));
xq2 = linspace(BB2(I,1),BB2(I,1),NN);
yq2 = linspace(min(BB2(:,2)),max(BB2(:,2)),NN);
zq2=interp2(xq,yq,zq,xq2,yq2);

dq = sqrt((xq2-BB2(I,1)).^2 + (yq2-(min(BB2(:,2))))).^2);
figure
plot(dq,zq2-max(zq2),'r','LineWidth',1.5)
xlim([min(dq) max(dq)])
ylim([-1e-5 0])
title('Corte Longitudinal Scatterd Interpolant')

% Cortes a lo largo de la placa
if flag1 == 1
    for j=-0.024:1e-3:0
        xq2 = linspace(j,j,NN);
        yq2 = linspace(min(BB2(:,2)),max(BB2(:,2)),NN);
        zq2=interp2(xq,yq,zq,xq2,yq2);

        dq = sqrt((xq2-j).^2 + (yq2-(min(BB2(:,2))))).^2);
        figure
        plot(dq,zq2-max(zq2))
        xlim([min(dq) max(dq)])
        ylim([-1e-5 0])
        drawnow
    end
end

```

Finalmente, pese a ser un código de múltiples líneas, su funcionamiento es relativamente sencillo, y su utilidad es bastante, tal como se enfatizó en el documento principal. Si se requiere, se puede seguir optimizando con tal de aprovechar de la mejor manera posible esta herramienta desarrollada en esta tesis.