



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL
UTILIZANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS DEM
PARA DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DE LA CUCHARA DE
UNA RETROEXCAVADORA.**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

AUTORES:

JUAN CARLOS LEMACHE AUQUILLA

BRYAN JEFFERSON MARTÍNEZ REYES

Riobamba – Ecuador

2024



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL
UTILIZANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS DEM
PARA DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DE LA CUCHARA DE
UNA RETROEXCAVADORA.**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

AUTORES: JUAN CARLOS LEMACHE AUQUILLA

BRYAN JEFFERSON MARTÍNEZ REYES

DIRECTOR: ING. EDWIN RODOLFO POZO SAFLA

Riobamba – Ecuador

2024

© 2024, Juan Carlos Lemache Auquilla & Bryan Jefferson Martínez Reyes

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Juan Carlos Lemache Auquilla & Bryan Jefferson Martínez Reyes, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 24 de junio de 2024



Juan Carlos Lemache Auquilla
0604441071



Bryan Jefferson Martínez Reyes
1725054041

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECANICA
CARRERA INGENIERIA AUTOMOTRIZ

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL UTILIZANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS DEM PARA DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DE LA CUCHARA DE UNA RETROEXCAVADORA**, realizado por los señores: **JUAN CARLOS LEMACHE AUQUILLA** y **BRYAN JEFFERSON MARTÍNEZ REYES**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

FIRMA

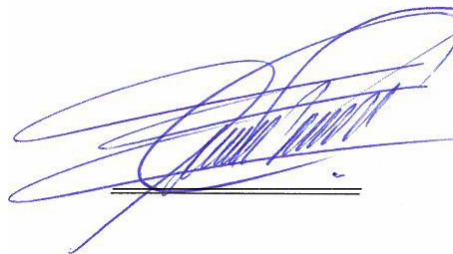
FECHA

Ing. Juan Carlos Rocha Hoyos
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



2024-06-24

Ing. Edwin Rodolfo Pozo Safla
DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



2024-06-24

Ing. Sócrates Miguel Aquino Arroba
ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



2024-06-24

DEDICATORIA

Tengo el honor de dedicar mi trabajo de titulación, a mis queridos padres Carlos Henrique Lemache y Mariana Auquilla, a mis hermanos Mario y Cristofer, de igual manera a mis hermanas Mercy y Marcia por brindarme el apoyo y ánimo para no rendirme, mediante el trabajo se refleja el esfuerzo y la fe que ellos depositaron en mi para poder cumplir mi sueño más anhelados desde mi infancia. De igual forma al gran grupo de amigos que creamos en el paso de la vida universitaria donde siempre estuvo el apoyo y compañerismos para seguir adelante y nunca renunciar a nuestros sueños que con el pasar del tiempo estamos cumpliendo.

Juan

Dedico este trabajo de investigación a Dios por darme la fuerza de culminarlo de la mejor manera y a mis queridos e idolatrados padres que este trabajo es una muestra de mi gratitud y respeto porque supieron darme una educación cristiana y una verdadera profesión para mi vida. De igual manera a mis hermanas, familiares y amigos que supieron apoyarme en el transcurso de mi carrera universitaria.

Bryan

AGRADECIMIENTO

Tengo el honor de agradecer a Escuela Superior Politécnica De Chimborazo por acogerme e inculcarme conocimientos útiles y también en el ámbito profesional. A mi familia por creer en mí y por siempre alentarme a seguir mis sueños, a mis amigos por siempre estar ahí, incluso en los momentos más difíciles. Su amistad ha sido un regalo invaluable en mi vida.

Juan

Tengo el honor de agradecer a Escuela Superior Politécnica De Chimborazo por acogerme e inculcarme conocimientos útiles y también en el ámbito profesional. A mi familia por creer en mí y por siempre alentarme a seguir mis sueños, a mis amigos por siempre estar ahí, incluso en los momentos más difíciles. Su amistad ha sido un regalo invaluable en mi vida.

Bryan

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	XIII
ÍNDICE DE ANEXOS	XVI
RESUMEN.....	XVII
ABSTRACT	XVIII
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1.	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1.	Planteamiento del problema	2
1.2.	Objetivos.....	2
1.2.1.	<i>Objetivo general</i>	2
1.2.2.	<i>Objetivos específicos</i>	2
1.3.	Justificación.....	3
1.3.1.	<i>Justificación Teórica</i>	3
1.3.2.	<i>Justificación económica</i>	3
1.4.	Hipótesis	3
1.4.1.	<i>Hipótesis Nula (Ho)</i>	3
1.4.2.	<i>Hipótesis alternativa (Hi)</i>	4

CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO	5
2.1.	Antecedentes de investigación	5
2.2.	Tipos de máquinas	6
2.3.	Tipos trabajos	8
2.3.1.	<i>Excavadora de empuje</i>	8
2.3.2.	<i>La Dragalina</i>	8
2.3.3.	<i>Retroexcavadora hidráulica</i>	8
2.3.4.	<i>La cuchara de almeja</i>	9
2.3.5.	<i>Cuchara de una retroexcavadora</i>	9
2.4.	Partes de una cuchara de retroexcavadora	9

2.5.	Normativa.....	11
2.6.	Referencias teóricas	11
2.6.1.	<i>Método de Elementos Discretos (DEM)</i>	<i>11</i>
2.6.2.	<i>Propiedades del Método de Elementos Discretos</i>	<i>12</i>
2.6.3.	<i>Fundamentos del DEM.....</i>	<i>12</i>
2.6.4.	<i>Fuerzas típicas en el DEM.....</i>	<i>13</i>
2.6.4.1	<i>Fuerzas de contacto.....</i>	<i>14</i>
2.6.5.	<i>Colisión de una partícula</i>	<i>14</i>
2.6.6.	<i>Definición del paso del tiempo en software CAE utilizando el DEM.....</i>	<i>15</i>
2.6.6.1	<i>Efectos de los muelles blandos</i>	<i>15</i>
2.6.7.	<i>Modelo de resistencia a la rodadura.....</i>	<i>16</i>
1.1.1.1	<i>Forma de Partículas</i>	<i>17</i>
1.1.1.2	<i>Representación de las partículas.....</i>	<i>17</i>
1.1.1.3	<i>Partículas por defecto.....</i>	<i>18</i>
1.1.1.4	<i>Formas personalizadas de las Partículas.....</i>	<i>18</i>
1.1.1.5	<i>Representación de las partículas.....</i>	<i>19</i>
1.1.1.6	<i>Tamaño de las partículas.....</i>	<i>20</i>
2.6.8.	<i>Orientación de las Partículas.....</i>	<i>21</i>
2.6.9.	<i>Marco de movimiento.....</i>	<i>22</i>
2.6.10.	<i>Tipos de movimientos Prescritos.....</i>	<i>22</i>
2.6.11.	<i>Movimientos combinados y anidados</i>	<i>22</i>
2.6.12.	<i>Fotograma de movimiento</i>	<i>22</i>
2.7.	Medidas Estadísticas	23
2.8.	Cálculo de Partículas.....	24
2.9.	Modelo de Contactos de Uso Normal.....	24
2.10.	Aplicación del Método de Elementos Discretos	24
2.11.	Propiedades Mecánicas Relacionadas con el DEM	25
2.11.1.	<i>Módulo de Young</i>	<i>25</i>
2.11.2.	<i>Coefficiente de Poisson</i>	<i>25</i>
2.12.	Tribología del Método de Elementos Discretos (DEM).....	26
2.13.	Mecánica de Deformación en DEM	26
2.13.1.	<i>Modelado de Partículas Rígidas y Deformables</i>	<i>27</i>
2.13.2.	<i>Enfoques para la Mecánica de Deformación en DEM.....</i>	<i>27</i>
2.14.	Estudio de la deformación aplicando método de elementos discretos	27
2.14.1.	<i>Ecuaciones de Movimiento</i>	<i>28</i>
2.15.	Método de Elementos Finitos.....	29

2.16.	Dureza.....	29
2.17.	Deformación elástica	30
2.18.	Deformación plástica	31
2.19.	Deformación convencional.....	31
2.20.	Propiedades mecánicas de los metales	32
2.20.1.	<i>Coefficiente de Poisson</i>	32
2.20.2.	<i>Ley de Hooke</i>	32
2.20.3.	<i>Límite elástico</i>	32
2.21.	Resistencia a la tracción	33
2.21.1.	<i>Ensayo de tracción</i>	33
2.22.	Comparación entre el Método de Elementos Discretos y el Método de Elementos Finitos	34
2.23.	Ventajas y desventajas del Método de Elementos Discretos	34

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	36
3.1.	Metodología	36
3.1.1.	<i>Método Descriptivo</i>	36
3.1.2.	<i>Método Cuantitativo</i>	36
3.2.	Instrumentos de investigación	37
3.3.	Resultados de la espectrometría	38
3.3.1.	<i>Principales aceros y aleaciones</i>	38
3.3.2.	<i>Acero AISI-1045 estirado en frío</i>	38
3.3.3.	<i>Acero AISI-4340 normalizado</i>	39
3.3.4.	<i>Probeta de acero AISI-1045 y 4340</i>	39
3.3.4.1	<i>Placa de acero AISI-1045 estirado en frío</i>	39
3.3.4.2	<i>Placa de acero AISI-4340 normalizado</i>	39
3.3.4.3	<i>Desgaste superficial de la muestra de los aceros</i>	40
3.3.4.4	<i>Forma de desgaste de los aceros AISI-1045 y 4340</i>	41
3.3.4.5	<i>Limpieza de la muestra</i>	41
3.3.4.6	<i>Zona de ataque químico</i>	42
3.3.5.	<i>Microestructura del acero</i>	42
3.3.5.1	<i>Placas de acero AISI – 1045 y 4340 en estado puro</i>	44
3.4.	Espectrometría.....	45
3.4.1.	<i>Propiedades del material presentes en el acero AISI – 1045</i>	47

3.4.2.	<i>Propiedades del material presentes en el acero AISI – 4350.....</i>	48
3.5.	Selección del acero para la cuchara y uñas de la retroexcavadora Komatsu.....	49
3.6.	Rango de trabajo de la retroexcavadora	49
3.7.	Modelado de la cuchara	50
3.7.1.	<i>Diseño de la cuchara SolidWorks.....</i>	52
3.7.2.	<i>Croquis de la cuchara de la Komatsu PC28UU-1.....</i>	55
3.7.3.	<i>Elección del material para la cuchara de la Komatsu PC28UU-1.....</i>	59
3.7.4.	<i>Exportación del archivo de la cuchara de la Komatsu PC28UU-1</i>	62
3.8.	Análisis por método de elementos finitos.....	63
3.8.1.	<i>Configuración del material en ANSYS para su respectivo análisis</i>	64
3.8.2.	<i>Selección del material en la cuchara y uñas de la retroexcavadora Komatsu.....</i>	65
3.8.3.	<i>Parámetros del mallado</i>	66
3.8.4.	<i>Restricciones físicas para el análisis de la cuchara de la retroexcavadora</i>	68
3.8.5.	<i>Fuerzas aplicadas en la cuchara de la retroexcavadora.....</i>	68
3.8.6.	<i>Estudios relevantes para la cuchara de la retroexcavadora hidráulica.</i>	69
3.8.7.	<i>Análisis de deformación mediante software CAE.....</i>	70
3.8.8.	<i>Esfuerzo de Von Mises.....</i>	70
3.8.9.	<i>Factor de seguridad.....</i>	71
3.9.	Análisis por el método de elementos discretos (DEM)	72
3.9.1.	<i>Configuración del material para su respectivo análisis en el software CAE.....</i>	73
3.9.2.	<i>Parámetros del mallado</i>	74
3.9.3.	<i>Movimiento de traslación aplicado para la cuchara.....</i>	74
3.9.4.	<i>Estudios relevantes para la cuchara mediante el método de elementos discretos (DEM)</i>	75
3.9.5.	<i>Análisis de deformación mediante software CAE.....</i>	75
3.9.6.	<i>Esfuerzo de Von Mises (DEM).</i>	76
3.9.7.	<i>Análisis de la deformación de la cuchara</i>	77
3.9.8.	<i>Análisis de la tensión tangencial.</i>	77

CAPÍTULO IV

4.	CUADRO ANALISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	79
4.1.	Análisis de resultados de la simulación MEF.....	79
4.1.1.	<i>Deformación en la cuchara de la retroexcavadora hidráulica Komatsu</i>	79
4.1.2.	<i>Tensión de Von Mises en la cuchara de la retroexcavadora hidráulica Komatsu</i>	79

4.1.3.	<i>Factor de seguridad en la cuchara de la retroexcavadora</i>	81
4.2.	Análisis de resultados de la simulación DEM.	81
4.2.1.	<i>Colisión entre la cuchara de la retroexcavadora y partículas de tierra.</i>	81
4.2.2.	<i>Tensión de Von Mises en la cuchara de la retroexcavadora hidráulica Komatsu</i> 83	
4.2.3.	<i>Deformación Total de la cuchara.</i>	84
4.2.4.	<i>Tensión tangencial de la cuchara.</i>	86
4.2.5.	<i>Comparación entre la simulación MEF y DEM</i>	87

CAPÍTULO V

5.	MARCO PROPOSITIVO	88
5.1.	Propuesta	88
	CONCLUSIONES	89
	RECOMENDACIONES	91
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Tamaño de las partículas	20
Tabla 2-2: Modelo de contactos de uso normal	24
Tabla 2-3: Tribología del DEM	26
Tabla 2-4: Comparación entre el método de elementos discretos (DEM) y el método de elementos finitos (MEF).	34
Tabla 2-5: Ventajas y desventajas del método de elementos discretos	35
Tabla 3-1: Herramientas y maquinas utilizadas	37
Tabla 3-2: Propiedades del acero AISI-1045 estirado en frio	38
Tabla 3-3: Propiedades del acero AISI-4340 normalizado	39
Tabla 3-4: Características del microscopio NIKO Eclipse E200 LED	43
Tabla 3-5: Composición química del material (cuchara).	46
Tabla 3-6: Composición química del material (uñas)	46
Tabla 3-7: Comparación de las propiedades químicas de los aceros	49
Tabla 3-8: Rango de trabajo de la retroexcavadora.	50
Tabla 4-1: Comparación de resultados de deformación.....	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Excavadora de empuje	6
Ilustración 2-2: Dragalina.....	7
Ilustración 2-3: Retroexcavadora	7
Ilustración 2-4: Cuchara de almeja.....	8
Ilustración 2-5: Elementos de una cuchara.....	10
Ilustración 2-6: Cuchara con elementos protectores	10
Ilustración 2-7: Tipos de cuchilla.....	11
Ilustración 2-8: Posición de una partícula	13
Ilustración 2-9: Fuerza de contacto	14
Ilustración 2-10: Evento de colisión.....	15
Ilustración 2-11: Efecto de los muelles blandos.....	16
Ilustración 2-12: Modelo de resistencia a la rodadura.....	16
Ilustración 2-13: Representación de las partículas	17
Ilustración 2-14: Representación de las partículas	18
Ilustración 2-15: Formas personalizadas de las partículas	19
Ilustración 2-16: Representación de las partículas	20
Ilustración 2-17: Orientación de las partículas por defecto y en 3 ejes.....	21
Ilustración 2-18: Módulo cubico básico – Prisma varios módulos.	28
Ilustración 2-19: Movimiento en un sistema referencias espacial.....	29
Ilustración 2-20: Deformación elástica de un material.....	30
Ilustración 2-21: Desplazamiento de los átomos del metal.	31
Ilustración 2-22: Fractura de un elemento.....	33
Ilustración 3-1: Muestra del material-cuchara.....	39
Ilustración 3-2: Muestra de material-uña de la cuchara	40
Ilustración 3-3: Tipos de papeles abrasivos para el desgaste del acero.....	40
Ilustración 3-4: Desbastadora.....	41
Ilustración 3-5: Pulidora.....	42
Ilustración 3-6: NIKO Eclipse E200 LED	43
Ilustración 3-7: Placa de acero en su estado natural AISI-1045.....	44
Ilustración 3-8: Microestructura del acero AISI-1045.	44
Ilustración 3-9: Placa de acero en su estado natural AISI-4340.....	45
Ilustración 3-10: Microestructura del acero AISI-4340	45
Ilustración 3-11: Vista isométrica de la cuchara (Komatsu PC28UU-1)	50

Ilustración 3-12: Vista frontal de la cuchara (Komatsu PC28UU-1)	51
Ilustración 3-13: Vista superior de la cuchara (Komatsu PC28UU-1).....	51
Ilustración 3-14: Vista lateral de la cuchara (Komatsu PC28UU-1)	52
Ilustración 3-15: Dientes de la cuchara (Komatsu PC28UU-1)	52
Ilustración 3-16: Vista isométrica de la cuchara en software CAE.....	53
Ilustración 3-17: Vista lateral de la cuchara en software CAE.....	53
Ilustración 3-18: Vista frontal de la cuchara en software CAE.....	54
Ilustración 3-19: Vista superior de la cuchara en software CAE	54
Ilustración 3-20: Croquis- Protectores laterales de la cuchara.	55
Ilustración 3-21: Croquis- Plancha laterales de la cuchara.	56
Ilustración 3-22: Croquis-Interior de la cuchara	56
Ilustración 3-23: Simetría de identidades.....	57
Ilustración 3-24: Plancha de desgaste	57
Ilustración 3-25: Horquilla de la cuchara (retroexcavadora).....	58
Ilustración 3-26: Croquis de la uña de la retroexcavadora.	58
Ilustración 3-27: Extrusión de la uña de la retroexcavadora.	59
Ilustración 3-28: Material Aplicado a la cuchara	60
Ilustración 3-29: Selección del material en SolidWorks (AISI-1045)	60
Ilustración 3-30: Material aplicado a las uñas.....	61
Ilustración 3-31: Selección del material en SolidWorks (AISI-4340)	61
Ilustración 3-32: Archivo en formato STEP - Cuchara.....	62
Ilustración 3-33: Archivo en formato STL - Cuchara	62
Ilustración 3-34: Selección Static Structural en ANSYS	63
Ilustración 3-35: Configuración del nuevo material (AISI-1045).....	64
Ilustración 3-36: Configuración del nuevo material (AISI-4340).....	64
Ilustración 3-37: Asignación del material a la cuchara	65
Ilustración 3-38: Asignación del material a las uñas.....	66
Ilustración 3-39: Propiedades de la malla	67
Ilustración 3-40: Calidad de la malla	67
Ilustración 3-41: Restricciones físicas de la cuchara de la retroexcavadora.	68
Ilustración 3-42: Fuerza de excavación.....	69
Ilustración 3-43: Detalles del análisis de deformación en ANSYS.....	70
Ilustración 3-44: Detalles del análisis de esfuerzos en ANSYS.....	71
Ilustración 3-45: Detalles del análisis del factor de seguridad en ANSYS	72
Ilustración 3-46: Pieza exportada en archivo STL- Cuchara Komatsu	73
Ilustración 3-47: Configuración del material - Partículas	73

Ilustración 3-48: Configuración del material - Cuchara.....	74
Ilustración 3-49: Propiedades de la malla	74
Ilustración 3-50: Datos de traslación - Cuchara	75
Ilustración 3-51: Conjunto Cuchara - Suelo.....	76
Ilustración 3-52: Contacto Cuchara - Suelo	76
Ilustración 3-53: Histograma de esfuerzo software CAE (DEM)	77
Ilustración 3-54: Niveles-deformación total.....	77
Ilustración 3-55: Niveles-deformación tangencial.	78
Ilustración 4-1: Deformación total de la cuchara	79
Ilustración 4-2: Tensión de Von Mises de la cuchara	80
Ilustración 4-3: Factor de seguridad de la cuchara.....	81
Ilustración 4-4: Colisión de partículas.....	82
Ilustración 4-5: Conjunto de la simulación DEM.....	82
Ilustración 4-6: Tensión de Von Mises-Vista frontal	83
Ilustración 4-7: Tensión de Von Mises-Vista lateral.....	83
Ilustración 4-8: Tensión de Von Mises-Vista superior.....	84
Ilustración 4-9: Deformación total- vista isométrica.....	85
Ilustración 4-10: Deformación total- vista frontal.....	85
Ilustración 4-11: Tensión tangencial- vista frontal.....	86
Ilustración 4-12: Tensión tangencial- vista frontal.....	86
Ilustración 4-13: Simulación MEF y DEM	87

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: DIMENSIONES OBTENIDAS DEL ELEMENTO

ANEXO B: PLANOS OBTENIDOS DEL DISEÑO DE LA CUCHARA

ANEXO C: OBTENCIÓN DE PROBETAS

ANEXO D: PROCESO DE ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL

ANEXO E: MICROESTRUCTURA DEL ACERO AISI 1045 Y AISI 4340

ANEXO F: RESULTADOS DEL MÉTODO DEM

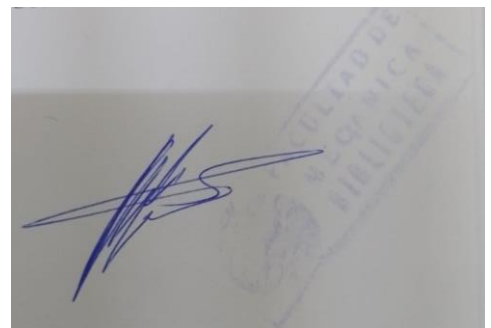
ANEXO G: RESULTADOS DEL MÉTODO MEF

RESUMEN

En el área de minería los trabajos que realizan los diferentes tipos de maquinarias que existen son continuos y de gran esfuerzo, en una retroexcavadora hidráulica el elemento que mayor deterioro sufre con el paso del tiempo es la cuchara debido a que es el elemento que mayor interacción tiene con superficies duras. Por lo tanto, este trabajo de investigación final tuvo como objetivo el análisis de la deformación de la cuchara mediante el método de elementos discretos (DEM) y la comparación con el método de elementos finitos (MEF). Como punto de partida se inició con una búsqueda exhaustiva de información detallada y confiable sobre la aplicación del método en equipos de maquinaria pesada, para esto se eligió la retroexcavadora hidráulica Komatsu del Taller de Maquinaria pesada de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Se realizó la identificación del material de la cuchara mediante pruebas de espectrometría y como resultado se identificó un acero AISI-1045 para el material de la cuchara, de igual manera se procedió al diseño del elemento en 3D mediante un software CAE con la ayuda de la ficha técnica obtenida de la máquina y con la ayuda de instrumentos de medición para mayor exactitud a la hora del resultado final. Se importó la geometría de acuerdo con la compatibilidad de archivos que tiene el software, se realizó los dos análisis para poder observar las diferencias que tienen a la hora de entregar resultados la simulación. Se pudo comparar los resultados de los dos métodos y se determinó que si es factible realizar un estudio mediante el método de elementos discretos (DEM), ya que nos permitió observar mediante la simulación el trabajo que realiza la cuchara y los esfuerzos que se producen al interactuar con una superficie dura (Tierra).

Palabras clave: < SIMULACIÓN POR DEM > < SIMULACIÓN POR MEF > < INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAE) > < DISEÑO DE PARTÍCULAS > < ESPECTROMETRÍA > < MINERÍA > < RETROEXCAVADORA >.

1110-DBRAI-UPT-2024



ABSTRACT

In the mining area, the work performed by the different types of existing machinery is continuous and of great effort, in a hydraulic backhoe loader the element that suffers the greatest deterioration with the passage of time is the bucket because it is the element that has the greatest interaction with hard surfaces. Therefore, the objective of this final research work was to analyze the deformation of the bucket using the discrete element method (DEM) and the comparison with the finite element method (FEM). As a starting point, an exhaustive search for detailed and reliable information on the application of the method in heavy machinery equipment began. For this purpose, the Komatsu hydraulic backhoe loader of the Heavy Machinery Workshop at Escuela Superior Politécnica de Chimborazo was chosen. The identification of the bucket material was carried out through spectrometry tests and as a result an AISI-1045 steel was identified for the bucket material. Likewise, we proceeded to design the element in 3D using CAE software with the help of the technical data obtained from the machine and with the help of measuring instruments for greater accuracy at the time of the result. The geometry was imported according to the compatibility of software files. The two analyses were performed in order to observe the differences that they have when delivering simulation results. It was possible to compare the results of the two methods and it was determined that it is feasible to carry out a study using the discrete element method (DEM), since it allowed us to observe through simulation the work done by the bucket and the efforts produced when interacting with a hard surface (Earth).

Keywords: < DEM SIMULATION > < FEM SIMULATION > < COMPUTER ASSISTED ENGINEERING (CAE) > < PARTICLE DESIGN > < SPECTROMETRY > < MINING > < RETRO EXCAVATOR>.



Lic. Sandra Paulina Porras Pumalema Mgs
C.I.0603357062

INTRODUCCIÓN

El análisis mediante simulación computacional se ha establecido como una herramienta indispensable en el campo de la ingeniería y el área de minería, permitiendo a los ingenieros predecir el comportamiento de los componentes bajo diversas condiciones de carga y sin necesidad de prototipos físicos costosos y consumidores de tiempo. Un método particularmente dentro de este ámbito es el Método de Elementos Discretos (DEM), el cual ofrece una aproximación única y detallada para el estudio de la interacción entre partículas y la deformación de materiales bajo esfuerzos.

La aplicación del Método de Elementos Discretos (DEM) en el análisis de la cuchara de una retroexcavadora ofrece ventajas significativas en el diseño y desarrollo de esta maquinaria esencial. Permite predecir significativamente la deformación que la cuchara experimentará bajo condiciones de trabajo reales, simulando las complejas fuerzas durante la excavación y la carga de materiales. Este conocimiento posibilita la optimización del diseño de la cuchara para mejorar su durabilidad, adaptando su geometría y seleccionando los materiales más adecuados para aumentar su resistencia y prolongar su vida útil.

Mediante el DEM facilita la evaluación comparativa de distintos materiales bajo condiciones operativas uniformes, ayudando a elegir aquellos que ofrecen el mejor balance entre ligereza, durabilidad y costo.

Implementar el análisis DEM no solo optimiza el proceso de diseño, sino que también en futuros trabajos de investigación podría contribuir a la creación de retroexcavadoras más eficientes, capaces de enfrentar las exigentes condiciones de trabajo con menos mantenimiento y mayor longevidad. Esta estrategia asegura que los productos no solo cumplan con los estándares de rendimiento esperados, sino que también sobresalgan en fiabilidad y durabilidad, elementos clave para la satisfacción del cliente y el éxito competitivo en el mercado.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

En el Ecuador, los equipos de maquinaria pesada son los más utilizados en diversas industrias como la minera, agrícola y construcción. Debido a las diferentes superficies a las que están expuestos los distintos equipos y sus actividades que realizarán. Actualmente en el país en el área de maquinaria de construcción no existen estudios computacionales de esfuerzos y deformaciones mecánicas aplicadas a las cucharas mediante el método de elementos discretos (DEM) al carecer de estos estudios de la cuchara no puede plantearse un plan de mantenimiento predictivo de la deformación lo cual ocasiona grandes pérdidas económicas debido a la parada de la máquina innecesariamente en las horas de trabajo.

1.2. Objetivos

1.2.1. *Objetivo general*

Examinar la deformación del elemento producto de las fuerzas ejercidas en la cuchara de la retroexcavadora simulando el funcionamiento utilizando un software CAE y aplicando el método de elementos discretos DEM para identificar los puntos más críticos de deformación.

1.2.2. *Objetivos específicos*

- Citar bibliografías sobre el método de elementos discretos DEM indagando en revistas de alto impacto para comprender y aplicar los parámetros correctos en la simulación.
- Emplear un software CAE que permita la modelación de partes de una retroexcavadora mediante fichas técnicas y catálogos para obtener mejores resultados en la simulación.
- Realizar la simulación computacional con el método DEM y MEF mediante la utilización de un software CAE para comparar los datos obtenidos en la simulación de la cuchara de una retroexcavadora.
- Comparar los resultados obtenidos de los métodos DEM y MEF utilizando un software CAE para determinar los puntos críticos de la cuchara en donde existe mayor deformación.
- Evaluar las comparaciones de los resultados obtenidos mediante las técnicas aplicadas DEM y MEF para determinar la precisión de los datos obtenidos mediante estos métodos.

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación Teórica

El método de elementos discretos DEM se enfoca en la capacidad para modelar el comportamiento de materiales granulares de manera realista, teniendo en cuenta la naturaleza discreta de las partículas y las interacciones a nivel microscópico. Esto lo hace adecuado para abordar problemas complejos de modelación con los métodos tradicionales.

Esta herramienta permite determinar los esfuerzos y deformación que se dan durante la interacción de un componente sobre cierta superficie. El método de elementos discretos DEM es un modelo matemático que busca representar el comportamiento de partículas en medios granulares y geométricos.

La aplicación de un software de simulación que utilice el método de elementos discretos DEM nos brinda un estudio más completo obteniendo resultados precisos y concisos que nos permiten comparar los resultados con los métodos tradicionales que se usan para el estudio de las deformaciones y esfuerzos para la cuchara de una retroexcavadora.

1.3.2. Justificación económica

En la actualidad, las reparaciones de las cucharas en retroexcavadoras, utilizadas en la maquinaria de minería se realizan de manera no sistemática, lo que conlleva a una fluctuación en los costos entre una reparación y otra. Los costos de una reparación tienen un costo de entre 2000 a 6000 dólares cuando la cuchara queda inhabilitada para seguir trabajando debidamente.

Para efectuar una reparación de este tipo, se requiere reemplazar diversos componentes como base, las uñas, las protecciones laterales, así como tuercas, pines y bocines. Además de estos elementos, es crucial considerar el costo asociado a la mano de obra.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis Nula (H₀)

No es factible el análisis mediante el método de elementos discretos DEM de la cuchara de una retroexcavadora obteniendo mejores resultados que mediante el método de elementos finitos MEF.

1.4.2. Hipótesis alternativa (Hi)

Es factible el análisis mediante el método de elementos discretos DEM de la cuchara de una retroexcavadora obteniendo mejores resultados que mediante el método de elementos finitos MEF.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

Se ha hecho una exhaustiva revisión bibliográfica que abarca artículos científicos, libros, sitios web y revistas que exploran temáticas relacionadas a la investigación, tales como:

El método de elementos discretos (DEM) se utiliza en diversas áreas de la ingeniería, como la simulación de sólidos industriales y granulares, la evaluación del comportamiento de materiales granulares, la comprensión de la interacción entre materiales y equipos en diferentes condiciones de proceso, y la optimización de procesos (Altair Engineering Inc, 2024).

El análisis por DEM es una técnica empleada para simular y analizar el comportamiento de materiales granulares y sólidos industriales en diversas condiciones y procesos. Se basa en la representación matemática de un modelo que describe la interacción entre partículas discretas. Utilizando el análisis DEM, los ingenieros pueden comprender mejor cómo interactúan estos materiales con los equipos y optimizar los procesos relacionados (Altair Engineering Inc, 2024).

Es un método computacional ideado para analizar el comportamiento de materiales sólidos en grandes cantidades. Inicialmente introducido por Cundall en 1971, este enfoque fue desarrollado con el objetivo de investigar cómo el hielo interactúa con las estructuras de los puentes. Con el tiempo, su aplicación se ha ampliado a diversas áreas, incluyendo la minería, la alimentación y la tecnología de la información, para analizar el comportamiento de estos materiales mediante el Método de Elementos Discretos (DEM).

De acuerdo con (Boom & Bucket, Inc., 2023), las cucharas de la retroexcavadora son componentes fundamentales para su funcionamiento y se utilizan para excavar, cargar y transportar materiales. Estas cucharas están diseñadas para adaptarse a diferentes tipos de trabajos y condiciones.

Algunos aspectos relevantes sobre las cucharas de la retroexcavadora son:

- Las retroexcavadoras están diseñadas para proyectos pequeños y medianos de ingeniería urbana, construcción y agricultura (Quinn Company, 2020).

- Las retroexcavadoras típicas tienen una profundidad de excavación de aproximadamente 14 pies y una capacidad de carga de más de 2.400 libras.
- La elección de la cuchara adecuada para una retroexcavadora depende de varios factores, como el tipo de trabajo que se va a realizar y el tipo de material que se va a manipular.
- Algunas cucharas tienen dientes diseñados para excavar, mientras que otras tienen bordes planos más adecuados para recoger arena y nivelar (Boom & Bucket, Inc., 2023).
- También es posible considerar una cuchara con acoplamiento rápido, que permite cambiar rápidamente entre distintos implementos sin salir de la cabina de la retroexcavadora.
- Las cucharas son accesorios fundamentales para las retroexcavadoras y herramientas esenciales para los proyectos de construcción y demolición.
- Las cucharas de las retroexcavadoras pueden tener diferentes anchuras, capacidades y pesos, según el modelo y las necesidades del proyecto (Quinn Company, 2020).

2.2. Tipos de máquinas

La maquinaria pesada se utiliza en una variedad de industrias y aplicaciones para tareas que requieren fuerza y potencia. Dentro de la categoría de equipos mecánicos diseñados para cargar tierra y otros materiales, se encuentran varias máquinas especializadas, cabe distinguir en las siguientes ilustraciones:

- Excavadora de empuje (Ilustración 1)
- Dragalina (Ilustración 2)
- Retroexcavadora (Ilustración 3)
- Cuchara de almeja (Ilustración 4)



Ilustración 2-1: Excavadora de empuje

Fuente: Caterpillar. 2022.



Ilustración 2-2: Dragalina

Fuente: Caterpillar. 2022.



Ilustración 2-3: Retroexcavadora

Fuente: Caterpillar. 2022.



Ilustración 2-4: Cuchara de almeja

Fuente: Caterpillar. 2022.

2.3. Tipos trabajos

Los trabajos realizados por la variedad de equipos de maquinaria pesada que existen se pueden identificar de la siguiente manera.

2.3.1. Excavadora de empuje

Es una máquina que realiza las mismas funciones elementales de excavación que una simple pala de mano. Estas operaciones son: Hincar la cuchara, levantar la carga, girar la cuchara misma verter después el contenido ya en la posición girada. (Río, 2006)

2.3.2. La Dragalina

Consta de un balde que se lanza sujeto a unos cables recogiendo tierra en su interior al cobrar estos. Una vez realizada la carga del balde, este queda colgado de tal manera que no viene la tierra, pudiéndose mantenerlo suspendido y ser girado para depositar al cargamento en cualquier otra posición dentro del alcance de la pluma. (Río, 2006)

2.3.3. Retroexcavadora hidráulica

Realiza la misma función que la pala excavadora, pero en vez de recoger la tierra por encima del nivel de sus orugas o sistema de sustentación, la hace en un plano inferior, por esta razón, es muy empleada para la excavación de zanjas. (Río, 2006)

2.3.4. *La cuchara de almeja*

Tiene un dispositivo que, dejándola caer desde una posición elevada, recoge entre sus valvas el material que se quiere elevar, cerrando éstas mediante un sistema de cables, lo que permite proceder a la elevación, ya que entonces el material no se derramará. (Río, 2006)

2.3.5. *Cuchara de una retroexcavadora*

Las retroexcavadoras pueden utilizar varias herramientas, como un martillo hidráulico, sin embargo, en este trabajo de investigación, se centrará en la herramienta más común, que es la cuchara. La cuchara es el componente que proporciona a la máquina la capacidad de extraer tierra u otros materiales (Sekhar Babu y Venu, 2018).

2.4. Partes de una cuchara de retroexcavadora

Esta se compone de varias partes, las cuales serán descritas a continuación:

- **Labio de corte o borde de ataque:** Es la parte frontal de la cuchara que entra en contacto con el material a excavar, está diseñado para cortar y penetrar en el suelo o los materiales de manera eficiente (Coloma Morales, 2017, p. 33).
- **Dientes de cuchara:** los dientes son proyecciones afiladas en el labio de corte, estos mejoran la capacidad de penetración al material.
- **Fondo de la cuchara:** es la parte inferior de la cuchara en la cual se recoge y retiene los materiales excavados.
- **Planchas laterales:** estas actúan como paredes para evitar que el material se disperse.
- **Planchas de desgaste laterales:** estas tienen la función de proteger las paredes laterales contra el desgaste causado por la fricción y la abrasión del material excavado.
- **Planchas de desgaste inferiores:** estas están ubicadas en la parte inferior de la cuchara para proteger el fondo contra el desgaste que ocurre cuando entra en contacto con el suelo, rocas u otros materiales.

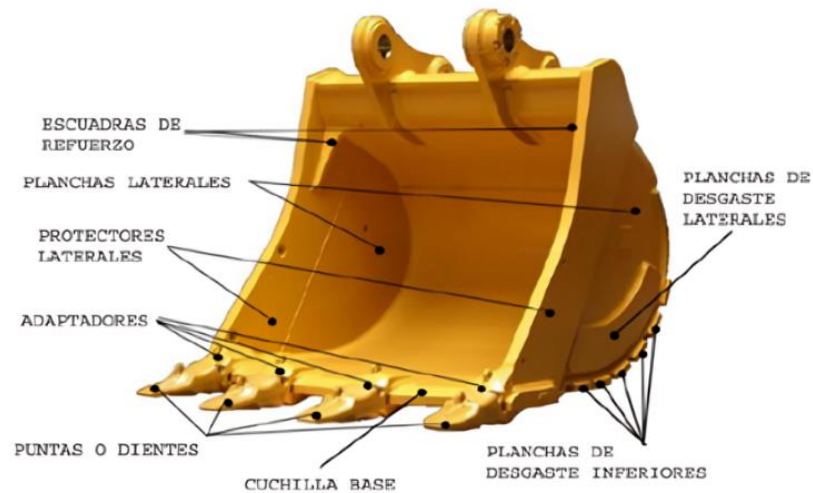


Ilustración 2-5: Elementos de una cuchara

Fuente: Coloma Morales, 2017.

Dependiendo del tipo de trabajo al que se destine la máquina, utilizaremos distintos tipos de cucharas. Por ejemplo, si pretendemos cargar rocas grandes, se suelen emplear cucharas con protectores laterales como los que se muestran en la Ilustración 2-2. Estos paneles laterales permiten que las rocas se asienten más fácilmente y también sirven para alargar la vida útil de la cuchara, ya que son el componente que más se utiliza.



Ilustración 2-6: Cuchara con elementos protectores

Fuente: Sekhar Babu y Venu, 2018.

Otro componente que puede mostrar variabilidad son las cuchillas base. Esto se debe a que la selección de cuchillas rectas para aplicaciones generales o cuchillas oblicuas para terrenos rocosos depende de la naturaleza del terreno en el que se pretende zanjar. La Ilustración 2-7 muestra una representación gráfica de los dos tipos de cuchillas base.

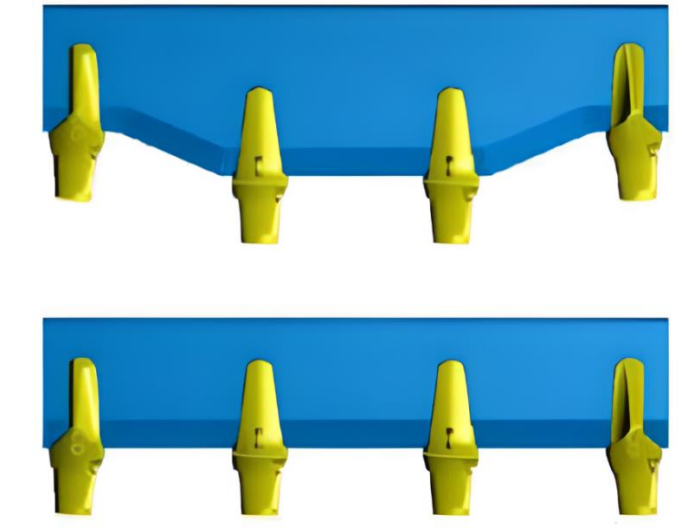


Ilustración 2-7: Tipos de cuchilla

Fuente: Academigrab. 2021

2.5. Normativa

Dentro de todo diseño dentro del campo de la ingeniería, se tiene en cuenta la normativa aplicable, por lo que, en este apartado se expone la normativa que repercute en el presente trabajo.

- UNE 115430:1999 Maquinaria para movimiento de tierras. Dispositivo para control de bajada de la pluma en excavadoras y retrocargadores hidráulicas.
- UNE 115443:2003 Maquinaria para movimiento de tierras. Excavadoras hidráulicas. Terminología y especificaciones comerciales.
- UNE-ISO 6015:2006 Maquinaria para movimiento de tierras. Excavadoras hidráulicas. Método de ensayo para la medida de las fuerzas del útil.

2.6. Referencias teóricas

2.6.1. Método de Elementos Discretos (DEM)

La (Universidad Politécnica de Catalunya, 2024) afirma que, DEM es una técnica de simulación numérica que estudia y analiza el comportamiento mecánico de un sistema constituido por partículas individuales que interactúan entre sí a través de sus puntos de contacto.

(Malgarejo Hernández, 2021) destaca que, el método de elementos discretos es un modelo matemático que describe el comportamiento de un sistema compuesto por elementos independientes que interactúan entre sí siguiendo las leyes de interacción. En este enfoque, se destaca que, durante el contacto, las partículas no experimentan deformación, sino que se superponen entre sí.

El método parte de la hipótesis que el material se puede representar por la interacción de un conjunto de partículas rígidas, siendo en su formulación básica esferas o cilindros. El comportamiento general de este sistema está condicionado por las leyes de cohesión y fricción entre partículas (Universidad Politécnica de Catalunya, 2024).

2.6.2. Propiedades del Método de Elementos Discretos

Las propiedades básicas que definen de manera global y a grandes rasgos el DEM son las siguientes:

- Las partículas son elementos discretos que en su conjunto conforman un sistema complejo (Universitat Politècnica de Catalunya, 2024).
- Estos elementos se desplazan independientemente unos de otros e interaccionan entre sí en las zonas de contacto.
- A nivel de cada partícula se hace uso de la mecánica de cuerpo rígido y los elementos discretos se consideran elementos rígidos.

2.6.3. Fundamentos del DEM

Los fundamentos del Método de Elementos Discretos (DEM) para modelar la dinámica de partículas se toma en cuenta la Segunda Ley de Newton ya que permite entender cómo las fuerzas externas e internas afectan el movimiento y la interacción de las partículas dentro de un sistema.

$$\sum F_{net} = \sum F_{body} + \sum F_{surface} = m \frac{dv}{dt}$$

Esto hace que el DEM sea una herramienta poderosa para estudiar el comportamiento de materiales granulares y otros sistemas compuestos por partículas discretas.

Una partícula que cae bajo la acción de la gravedad, en un primer instante en el tiempo, no hay otra fuerza que actúe sobre esa partícula, excepto la gravedad. En un segundo instante en el tiempo la gravedad sigue siendo la única fuerza que actúa sobre esta partícula, en el tercer instante de tiempo las fuerzas que actúan sobre la partícula es la gravedad y una fuerza de contacto con una

superficie y el último instante de tiempo sobre la partícula vuelve actuar solo la gravedad, como se muestra en la siguiente ilustración 2-8.

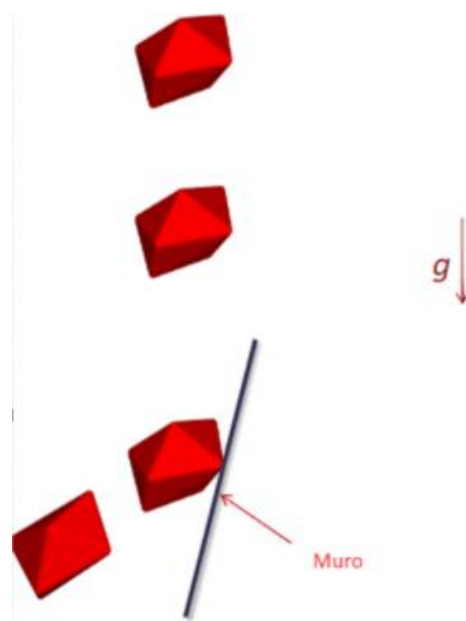


Ilustración 2-8: Posición de una partícula

Fuente: ESS-DEM. 2021.

2.6.4. Fuerzas típicas en el DEM

Las fuerzas típicas que se aplican a las partículas en la simulación de Métodos de elementos discretos DEM.

Fuerzas corporales:

- Gravedad
- Fuerza de fluidos
- Electroestática / Campos magnéticos

Fuerzas de superficie:

- Fuerza de contacto
- Adhesión / Fuerza de cohesión

Considerando que estas fuerzas que pueden estar actuando sobre las partículas, entendemos que las simulaciones DEM son siempre transitorias, ya que se necesita actualizar las posiciones de las partículas basándonos en las fuerzas que actúan sobre si mismas, por lo que un parámetro muy

importante en una simulación DEM es el tiempo total de simulación para poder iniciar con el análisis.

2.6.4.1 Fuerzas de contacto

El modelo implementado en la fuerza de contacto se denomina método de la esfera blanda, donde las partículas se consideran rígidas y cuando se produce una deformación por contacto, se modela en una simulación con solapamiento, lo que significa que cuando dos partículas colisionan no se deforman como lo harían en la realidad, este modelo sólo es válido para solapamientos pequeños como se puede observar en la siguiente ilustración 2-9.

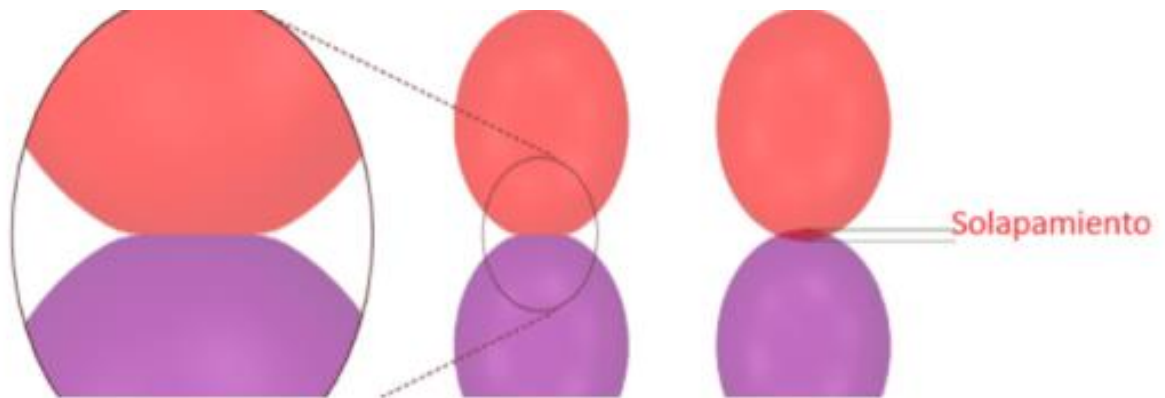


Ilustración 2-9: Fuerza de contacto

Fuente: ESS-DEM. 2023.

2.6.5. Colisión de una partícula

La colisión de partícula consiste en la interacción de dos partículas en función del tiempo donde en un segundo instante en el tiempo observamos un contacto entre estas dos partículas en un tercer instante en el tiempo vemos un mayor solapamiento.

Empezarán a moverse en direcciones opuestas como si se estuvieran alejando la una de la otra y finalmente las partículas dejarán de estar en contacto esta secuencia de contactos se llama evento de colisión un evento de colisión se compone de varios contactos entre partículas que son instantáneos y cada contacto ocurre en cada paso de tiempo correspondiente de la simulación como se puede observar en la siguiente ilustración 2-10.



Ilustración 2-10: Evento de colisión

Fuente: ESS-DEM. 2024.

2.6.6. Definición del paso del tiempo en software CAE utilizando el DEM

Se calcula automáticamente los pasos de tiempo basándose en el modelo de fuerza de contacto normal seleccionado por el diseñador para el modelo por defecto. El paso de tiempo del modelo de resorte histórico de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\Delta t = \min \left(\frac{\pi}{2N_{\Delta t}^1} \sqrt{\frac{m^*}{k_{n1}}}, \frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{m^*}{k_{nu}}} \right)$$

En esta fórmula el paso de tiempo es una función de la masa efectiva, la rigidez de carga y la rigidez de descarga, también es una función de la carga y los pasos, que es otra entrada del diseñador. El diseñador puede utilizar la carga y los pasos para controlar el tamaño del paso de tiempo, haciéndolo mayor o menor para acelerar la simulación o hacerla más estable.

Donde:

$$N_{\Delta t}^1 \equiv \text{carga en } N - \text{pasos}$$

Eficiencia de masa

$$\frac{1}{m^*} = \begin{cases} \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} & \text{contacto partícula - partícula} \\ \frac{1}{m} & \text{contacto partícula - límite} \end{cases}$$

2.6.6.1 Efectos de los muelles blandos

El efecto de los muelles muy blandos puede conducir a resultados poco realistas, ya que sabemos que dos sólidos no pueden ocupar el mismo espacio. Pero si utilizamos dos muelles blandos, las fuerzas que se calcularán no serán lo suficientemente grandes y se observarán solapamientos

excesivos en una simulación, lo que dará lugar a fracciones de sólidos superiores a uno, lo que no es realista, por lo que al reducir la rigidez de los contactos en una simulación hay que tener cuidado de no reducirla demasiado para no obtener resultados poco realistas en este punto tan importante.

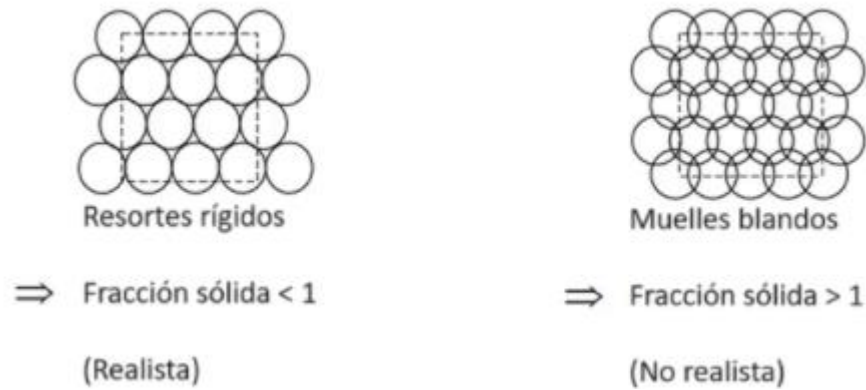


Ilustración 2-11: Efecto de los muelles blandos

Fuente: ESS-DEM. 2021.

2.6.7. Modelo de resistencia a la rodadura

El modelo de la resistencia a la rodadura representa un contacto real entre un plano de contacto y una esfera como se observa en la siguiente ilustración 2-12.

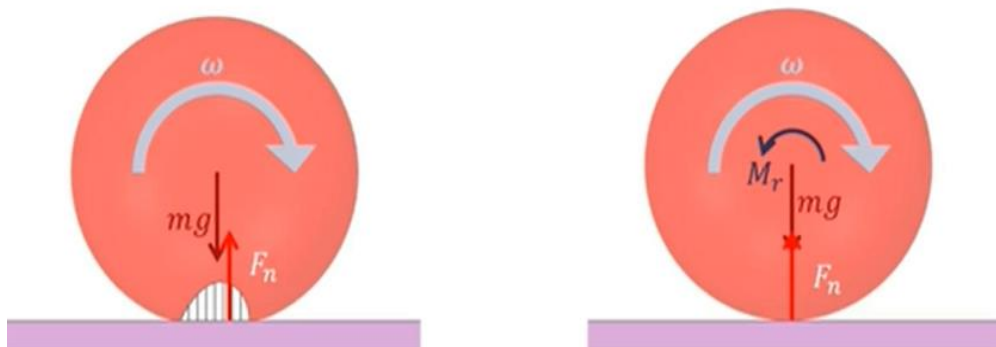


Ilustración 2-12: Modelo de resistencia a la rodadura

Fuente: ESS-DEM. 2023.

La resistencia a la rodadura es la fuerza que se opone al movimiento de un cuerpo rodante, para materiales sólidos hay dos tipos de resistencia a la rodadura:

- Tipo A: Modelo de momento constante
- Tipo B: Modelo de límite de rodadura con resorte lineal

El tipo A es un modelo de movimiento constante y el tipo B es un modelo de límite a la rodadura de resorte lineal. El tipo B es el modelo recomendado para la mayoría de los casos que se puedan analizar por el método de elementos discretos (DEM).

1.1.1.1 Forma de Partículas

La forma de las partículas en la vida real no es esférica pero la mayoría de los códigos DEM utilizan partículas esféricas debido a:

- Detección de contacto simple
- Disponibilidad en modelos de fuerza
- Punto de contacto único para esferas
- Facilidad de caracterización de solo un diámetro

1.1.1.2 Representación de las partículas

Las formas reales de las partículas difieren de las esféricas en lo que respecta a la densidad del soporte, los modos de transporte lineal y rotacional, la dilatación de las partículas durante el cizallamiento, entrelazamiento y la resistencia del material. Además, hay varias formas de representar partículas no esféricas en los códigos DEM, una de ellas es utilizar el método de las estructuras redondeadas, que consiste básicamente juntar esferas entre sí y, aunque es sencillo, tiene sus problemas, uno de ellos es la precisión de la forma, ya que se crea una fricción artificial entre las esferas. Otro problema es el de los modelos de rotura, ya que los modelos de rotura disponibles para unas buenas esferas no conservan la masa y el volumen de la partícula.

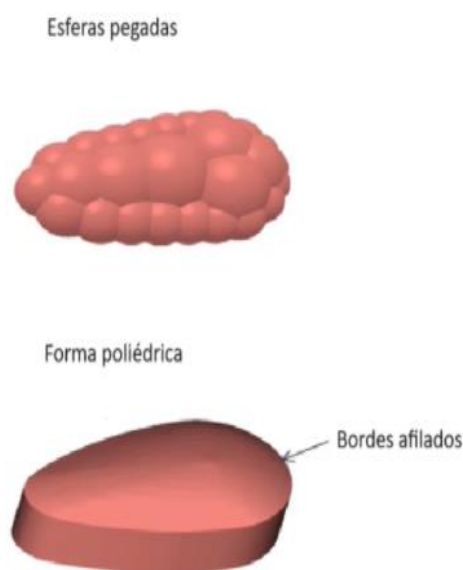


Ilustración 2-13: Representación de las partículas

Fuente: ESS-DEM. 2022

1.1.1.3 Partículas por defecto

En la mayoría de los softwares, utilizan representaciones más realistas de la forma de la partícula, estas representaciones particulares de la forma incluyen modelos analíticos o matemáticos usando cilindros espirales o cuadrículas como se muestra en la siguiente ilustración.

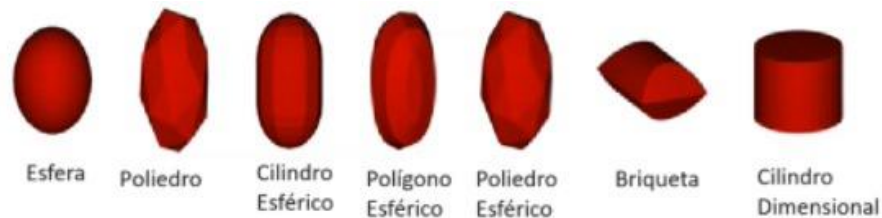


Ilustración 2-14: Representación de las partículas

Fuente: ESS-DEM. 2022.

1.1.1.4 Formas personalizadas de las Partículas

En el uso de la mayoría de los softwares se implementa formas predefinidas y formas de partículas reales importando archivos CAE a los diferentes softwares. Por ejemplo, se puede dibujar algo en su grupo CAE y exportar esta geometría, dependiendo el tipo de archivo que utilice el software. Incluso se puede escanear cierta geometría y usarla como la forma de la partícula. Teniendo en cuenta que cuanto mayor sea la resolución de la forma de la partícula mayor será el coste computacional, por lo tanto, serán más lentas las simulaciones.

Para una simulación más rápidas es necesario tener un equilibrio entre la fidelidad de la forma de la partícula y los recursos computacionales que se requieran.



Ilustración 2-15: Formas personalizadas de las partículas

Fuente: ESS-DEM.2022.

1.1.1.5 Representación de las partículas

Categorías de formas diferenciales según la geometría. Las fibras son principalmente partículas unidimensionales.

Las formas tipo shell se generan asignando un grosor uniforme a una malla de superficie bidimensional y los sólidos son todos los demás grupos de partículas y se clasifican en esferas o partículas con forma, donde las partículas no esféricas pueden ser convexas o cóncavas y las formas convexas pueden ser redondeadas o no. pueden ser convexas o cóncavas y las formas convexas pueden ser redondeadas o no en esta diapositiva estamos mostrando las limitaciones de cada tipo de partícula en la siguiente ilustración 2-16.

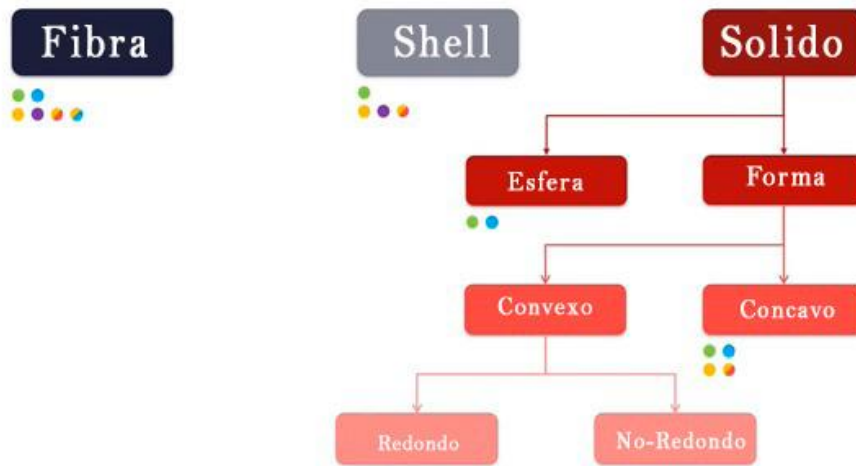


Ilustración 2-16: Representación de las partículas

Fuente: ESS-DEM. 2022.

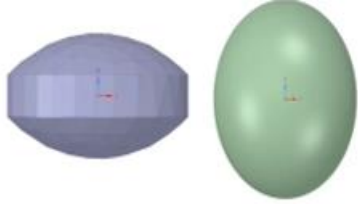
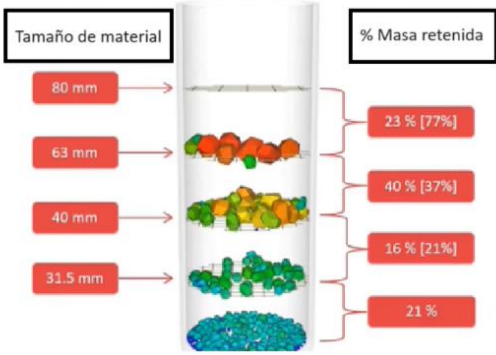
1.1.1.6 Tamaño de las partículas

Para definir los tamaños de la partícula y las distribuciones de tamaño en un software CAE, se puede definir de diferentes maneras dependiendo del tipo de partículas por lo que podemos tener varios tamaños de partículas:

- Tamaño de tamiz
- Diámetro de esfera equivalente
- Escala de tamaño original

Tabla 2-1: Tamaño de las partículas

<p>The diagram shows a 3D polyhedral particle. A vertical dashed line represents the 'Major axis'. A blue arrow labeled \hat{n} points upwards from the top vertex. A horizontal blue line represents the 'Sieve size', which is the width of the particle at its narrowest point. The particle is shaded in light green.</p>	<p>Tamaño del tamiz</p> <p>Es el más usado en la industria minera se define como la abertura cuadrada más pequeña por la cual una partícula puede pasar.</p>
--	---

	<p>El diámetro de la esfera equivalente</p> <p>Se puede utilizar con cualquier forma de partícula cuando se selecciona.</p>
	<p>Escala de tamaño original</p> <p>Se conserva las dimensiones originales de las partículas personalizadas importadas. Esta escala es útil para mantener la integridad del diseño original de las partículas. Además, es posible establecer una "distribución de tamaño de partícula", que representa el porcentaje de masa de partículas para cada tamaño de tamiz. En lugar de utilizar un único valor constante, esta distribución permite una representación más precisa de la variabilidad en el tamaño de las partículas.</p>

Fuente: ESS-DEM

Realizado por: Lemache J. & Martínez B, 2024.

2.6.8. Orientación de las Partículas

Por defecto todas las partículas son generadas con una orientación fija y para representar diferentes condiciones es importante implementar partículas en diferentes orientaciones, así que una rotación fija prescrita puede ser dada por diferentes orientaciones aleatorias para cada uno de los ejes globales X, Y y Z con eso podemos inyectar partículas aleatoriamente en las tres direcciones.

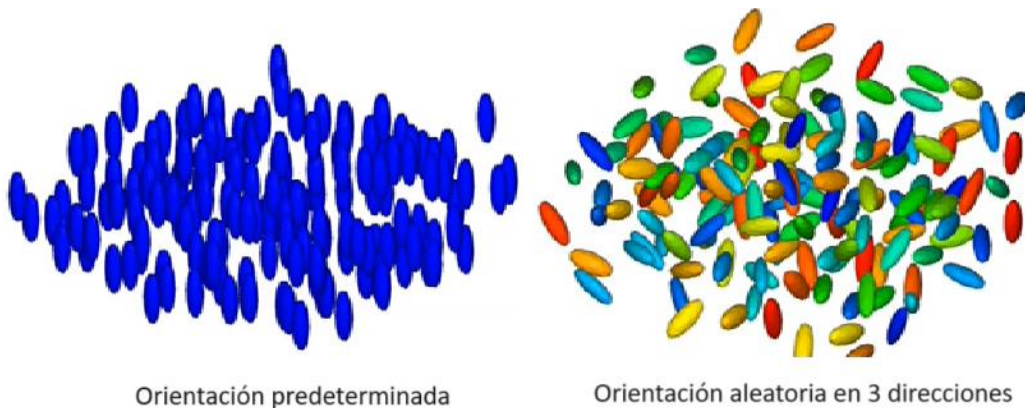


Ilustración 2-17: Orientación de las partículas por defecto y en 3 ejes.

Fuente: ESS-DEM.2022.

2.6.9. Marco de movimiento

En el marco de movimiento se puede obtener, movimientos prescritos o movimientos de cuerpo libre, también podemos tener movimientos combinados y anidados.

El movimiento se define a través de tres ejes de coordenadas para las direcciones X, Y, Z estos marcos de referencia se utilizan para establecer las propiedades de movimiento de los límites que se utilizan para representar geometrías los cuales son:

- Movimientos fronterizos
- Marco de referencia
- Avances del movimiento

2.6.10. Tipos de movimientos Prescritos

Los tipos de movimiento prescritos en un software CAE son tres tipos:

- Movimientos de traslación
- Movimientos de rotación
- Movimientos oscilantes

Bajo los movimientos oscilantes podemos tener traslación periódica que es una vibración o rotación periódica que representa el movimiento de un péndulo.

2.6.11. Movimientos combinados y anidados

El uso de movimientos combinados, donde se definen varios tipos de movimiento para un solo objeto, así como movimientos anidados, que establecen una jerarquía de movimientos para sistemas multi-cuerpo. Estas técnicas permiten una mayor flexibilidad y realismo en la simulación del movimiento, lo que resulta útil en una variedad de aplicaciones, desde la animación de personajes hasta la simulación de sistemas mecánicos complejos.

2.6.12. Fotograma de movimiento

Se refieren a imágenes o capturas que representan estados específicos o momentos dentro de una simulación de dinámica de partículas. Estos fotogramas pueden ser utilizados para visualizar y analizar cómo se mueven e interactúan las partículas dentro del entorno simulado a lo largo del tiempo.

El software que utilice el DEM permite al investigador estudiar el comportamiento de partículas sólidas en varios procesos industriales. Los fotogramas de movimiento capturados de estas simulaciones ofrecen perspectivas valiosas sobre:

- La distribución de las partículas y su dinámica en diferentes momentos
- Las zonas de acumulación o congestión de partículas
- El análisis de la eficiencia de los procesos de mezclado o separación
- La evaluación del desgaste y el impacto en las superficies de los equipos
- La optimización de diseños de maquinaria para mejorar el flujo de partículas y reducir el mantenimiento.

2.7. Medidas Estadísticas

Las medidas estadísticas podemos tener media de fracción de volumen que devuelve la suma de una propiedad para cada partícula ponderada por el volumen de la misma partícula (V_n) dividido por el volumen de un cuerpo (V_b) como se muestra en esta primera ecuación.

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N a_n v_n}{v_b}$$

También podemos tener medias ponderadas en las que algunos puntos contribuyen más que otros a la media final de forma diferente a lo que se observa en las medias aritméticas ordinarias si el diseño contiene N partículas y el valor de la propiedad de cada partícula y los pesos (W_n) son la media ponderada se calcula mediante las siguientes expresiones:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N a_n w_n}{\sum_{i=1}^N w_n}$$

De igual manera es posible obtener la desviación estándar y evaluar la cantidad de variación o dispersión dentro de un conjunto de valores de propiedades una desviación estándar baja indica que la propiedad analizada tiende a estar cerca de la media mientras que una desviación estándar alta indica que los puntos de datos están dispersos en un rango más amplio de valores si el contenedor contiene partículas N_K y la propiedad de cada partícula la variación estándar se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{\psi} == \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_k} (\psi_i - \psi)^2}{N_k}}$$

Donde

$$\psi = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} \psi_i}{N_k}$$

2.8. Cálculo de Partículas

El cálculo de partículas es un proceso donde los valores calculados se conservan incluso después de que las partículas salen de la zona seleccionada, después de que si las partículas entran en la zona seleccionada de nuevo los cálculos se reanudarán desde donde se detuvieron.

2.9. Modelo de Contactos de Uso Normal

Los modelos de contacto uso-normal en DEM describen la respuesta de las partículas al ser comprimidas unas contra otras. Estos modelos son cruciales para calcular la fuerza normal que surge cuando las partículas entran en contacto y se deforman elástica o plásticamente.

Tabla 2-2: Modelo de contactos de uso normal

Modelo Normal	Uso Normal
Muelle lineal histórico (HLS) por defecto	Modela el comportamiento del material a granel compresible e incompresible
Muelle lineal con depósito (LSD)	Modela el comportamiento de un material incompresible. También suele ser más rápido que el HLS.
Amortiguador de muelle hertziano (HSD)	Utiliza una fuerza de resorte no lineal y se incluye debido a la complementariedad con otro software. Este modelo puede influir en las cargas previstas sobre las estructuras en comparación con los modelos lineales.

Fuente: ESS-DEM

Realizado por: Lemache J. & Martínez B, 2024.

2.10. Aplicación del Método de Elementos Discretos

En la actualidad, el método de elementos discretos (DEM), es ampliamente reconocido como un método eficaz para abordar problemas de ingeniería en materiales granulares y discontinuos,

especialmente, con los flujos de partículas granulares, la mecánica del polvo, y mecánica de rocas (Las Heras Casas et al., 2019, p. 2).

2.11. Propiedades Mecánicas Relacionadas con el DEM

2.11.1. Módulo de Young

Es una propiedad mecánica que mide la rigidez de un material sólido. Define la relación entre el estrés (fuerza por unidad de área) y la deformación (cambio relativo en forma) en el rango elástico (no permanente) de un material. Es decir, cuanto mayor es el Módulo de Young, más rígido es el material. En el DEM las partículas son tratadas como entidades discretas, el Módulo de Young se utiliza junto con otros parámetros mecánicos (como la relación de Poisson, la fricción, y la cohesión) para definir las leyes constitutivas que rigen el contacto y la interacción entre partículas. Esto permite a los investigadores y a los ingenieros analizar el comportamiento mecánico de materiales y sistemas de partículas con una gran precisión, lo que es fundamental para el diseño y análisis en muchas áreas de la ingeniería y la ciencia de materiales.

2.11.2. Coeficiente de Poisson

En la mecánica de materiales, el coeficiente de Poisson (simbolizado generalmente como ν) se define como el negativo de la razón entre la deformación transversal (en dirección perpendicular a la carga aplicada) y la deformación axial (en la dirección de la carga). Los valores típicos para el coeficiente de Poisson varían entre 0 y 0.5 para la mayoría de los materiales, donde un valor de 0.5 indica un comportamiento completamente incompresible (es decir, el volumen del material no cambia bajo carga) y un valor de 0 indica que no hay expansión transversal cuando el material se estira.

Es un parámetro fundamental para caracterizar el comportamiento mecánico de los materiales modelados. Este coeficiente es una medida de la deformación transversal relativa que experimenta un material cuando se le aplica una deformación axial. En términos más simples, describe cómo un material se expande o contrae en direcciones perpendiculares a la dirección de la carga aplicada. En DEM, el coeficiente de Poisson se utiliza junto con el Módulo de Young para definir cómo las partículas individuales o los ensamblajes de partículas se deforman bajo carga. Estos dos parámetros permiten a los investigadores modelar el comportamiento elástico de los materiales de manera más precisa. En particular, el coeficiente de Poisson afecta cómo se distribuyen las tensiones y deformaciones dentro del material modelado cuando se somete a cargas externas.

2.12. Tribología del Método de Elementos Discretos (DEM)

Se refiere al estudio de la fricción, el desgaste, y la lubricación entre partículas, superficies sólidas durante su interacción y movimiento. En DEM dependiendo de esta área de estudio es crucial para simular y entender cómo las fuerzas mecánicas y las interacciones superficiales afectan el comportamiento y la dinámica de sistemas compuestos por numerosas partículas, como pueden ser los materiales granulares, polvos, o incluso componentes en sistemas mecánicos donde las interacciones entre elementos discretos son significativas como se indica en la siguiente tabla 2-3.

Tabla 2-3: Tribología del DEM

Fuerzas Mecánicas/Interacciones Superficiales	Significado
Fricción en DEM	La fricción es uno de los aspectos fundamentales de la tribología que se modela en DEM. Es la resistencia al movimiento relativo que surge en el punto de contacto entre dos partículas o entre una partícula y una pared. En DEM, se simula la fricción para prever cómo afectará al movimiento y a la energía dentro del sistema.
Desgaste en DEM	El desgaste, aunque más desafiante de modelar en DEM debido a su naturaleza compleja y dependiente del material, es otro aspecto importante de la tribología. Implica la remoción gradual de material de la superficie debido a procesos mecánicos como la abrasión, la adhesión, o la fatiga superficial.

Fuente: ESS-DEM

Realizado por: Lemache J. & Martínez B, 2024.

2.13. Mecánica de Deformación en DEM

La mecánica de deformación en el Método de Elementos Discretos (DEM) se refiere al estudio y modelado de cómo las partículas individuales o conjuntos de partículas se deforman bajo la acción de fuerzas externas o internas. En DEM, aunque las partículas suelen considerarse como entidades rígidas para simplificar los cálculos, existen enfoques para incorporar la deformación de las

partículas y simular más precisamente el comportamiento de materiales que experimentan deformaciones significativas.

2.13.1. Modelado de Partículas Rígidas y Deformables

En el DEM clásico, las partículas se modelan como rígidas, lo que significa que no se deforman independientemente de la magnitud de las fuerzas aplicadas. Este enfoque simplifica significativamente los cálculos, ya que solo es necesario considerar las fuerzas y torques resultantes en los puntos de contacto entre partículas. Sin embargo, para algunos materiales y condiciones, es importante considerar la deformación de las partículas para capturar con precisión su comportamiento.

2.13.2. Enfoques para la Mecánica de Deformación en DEM

El modelado de la deformación en DEM es especialmente relevante en campos donde la deformación de las partículas afecta significativamente el comportamiento del material, como en la modelación de materiales granulares deformables, la simulación de procesos de manufactura que involucran deformación plástica, y el estudio de la fractura y fragmentación de sólidos.

También es crucial en la simulación de procesos como en:

- Modelos de contacto mejorados
- Partículas deformables

2.14. Estudio de la deformación aplicando método de elementos discretos

El método de elementos discretos consiste esencialmente en la discretización espacial del continuo por medio de un reticulado espacial formado por la repetición de un módulo regular. Las rigideces de las barras que componen el reticulado son equivalentes a la del continuo que se quiere representar. Como se consideran barras de reticulado espacial, por cada nudo se tienen tres grados de libertad. La masa del modelo es discretizada y concentrada en los nodos del reticulado espacial ya mencionado. En la Ilustración 2-18 se observa el arreglo cúbico básico o módulo, este está compuesto de ocho nodos en sus vértices más un nodo central (Kosteski, 2014).

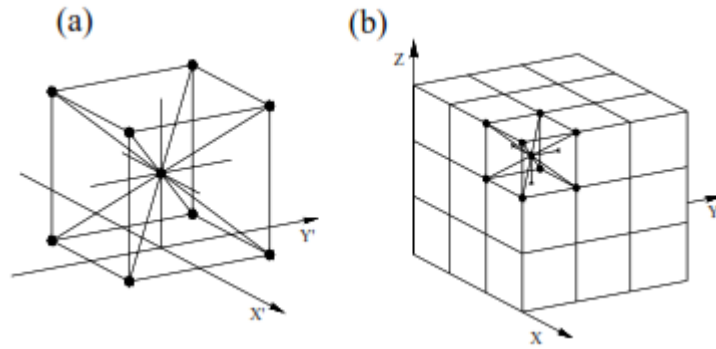


Ilustración 2-18: Módulo cubico básico – Prisma varios módulos.

Fuente: Kostaski, 2014.

2.14.1. Ecuaciones de Movimiento

El movimiento de los diferentes elementos discretos que conforman el modelo de partículas se rige por las leyes de la dinámica de la mecánica del sólido rígido. La translación y la rotación de las partículas se describen por medio de las ecuaciones de la dinámica de Newton-Euler. El movimiento del elemento del conjunto de elementos discretos se describe por las siguientes ecuaciones:

$$m_i \ddot{\mathbf{u}}_i = \mathbf{F}_i$$

$$\mathbf{I}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \mathbf{T}_i$$

Donde:

- \mathbf{u} : es el vector de desplazamiento del centroide del elemento en un sistema de coordenadas.
- $\boldsymbol{\omega}$: velocidad angular del elemento respecto a sistema de referencia móvil \mathbf{x} , con el elemento y el origen en el centro del mismo.
- m : masa del elemento o partícula
- \mathbf{I} : momento de la inercia,
- \mathbf{F} : fuerza resultante
- \mathbf{T} : el momento resultante.

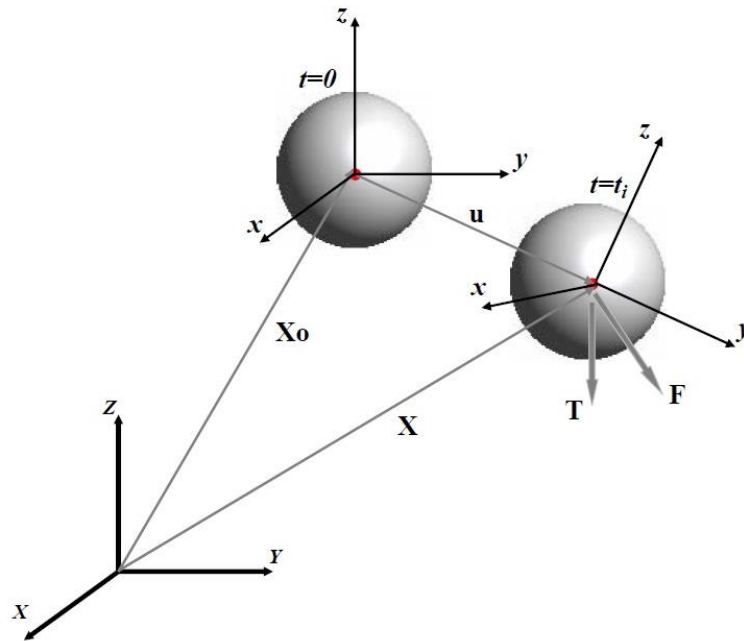


Ilustración 2-19: Movimiento en un sistema referencias espacial.

Fuente: Kostascki, 2014.

2.15. Método de Elementos Finitos

El método de elementos finitos (MEF) es una técnica de análisis numérico, el cual divide un dominio continuo en pequeñas subregiones llamadas elementos finitos, conectadas entre sí en nodos, con la finalidad de determinar el estado de tensión y deformación de un sólido de geometría arbitraria sujeto a acciones externas (Azevedo, 2013).

2.16. Dureza

La dureza es una medida de la resistencia de un metal a la deformación plástica permanente en su superficie. Dependiendo del material, la dureza puede variar, los metales duros como el titanio y el berilio son más resistentes que los metales blandos como el sodio y el estaño metálico. Para medir la dureza de un metal, se debe forzar este con un penetrador sobre su superficie; por lo general el material del penetrador, que es usualmente una bola, una pirámide o cono está hecho de un material más resistente que el material al cual se le hace el estudio (Coloma Morales, 2017, p. 34; MECÁNICA DE LA MOTO, 2022).

Los materiales utilizados como penetradores son, por lo general, acero endurecido, carburo de tungsteno y diamante. Después de realizar la incisión, se retira el penetrador de la superficie, se

calcula un valor de la dureza empírica o se utiliza una escala análoga, la cual se basa en el área de la sección o en la profundidad de la impresión (Coloma Morales, 2017).

2.17. Deformación elástica

El metal sufre una deformación cuando es sometido a una fuerza de tracción uniaxial, si este recupera sus dimensiones originales cuando la fuerza cesa, el metal ha experimentado una deformación elástica; es decir, cuando se quita la carga, los átomos del metal vuelven a ocupar la posición original y la deformación desaparece (Coloma Morales, 2017, p. 35; Rodríguez, 2022).

En otros términos, la deformación elástica es una variación de las distancias entre los átomos por la acción de fuerzas exteriores, por esto, la tensión es una variación de las distancias interatómicas y puede medirse por métodos radiográficos, al momento de cesar la carga, estos retoman a su posición original. Cuan menor sea la deformación que produzca la tensión, el material será más rígido; es por ello, que el módulo de elasticidad caracteriza la rigidez del material (Rodríguez, 2022).

La mayoría de los materiales, cuando se somete a un nivel bajo de carga, se comporta de manera lineal elástica, esto se puede observar en la Ilustración 2-19. El alargamiento del material es directamente proporcional al nivel de carga aplicado; es decir, la gráfica tensión versus deformación es una línea recta. Este comportamiento se conoce como la Ley de Hooke (García Romero y Monasterio Guisasola, 2018).

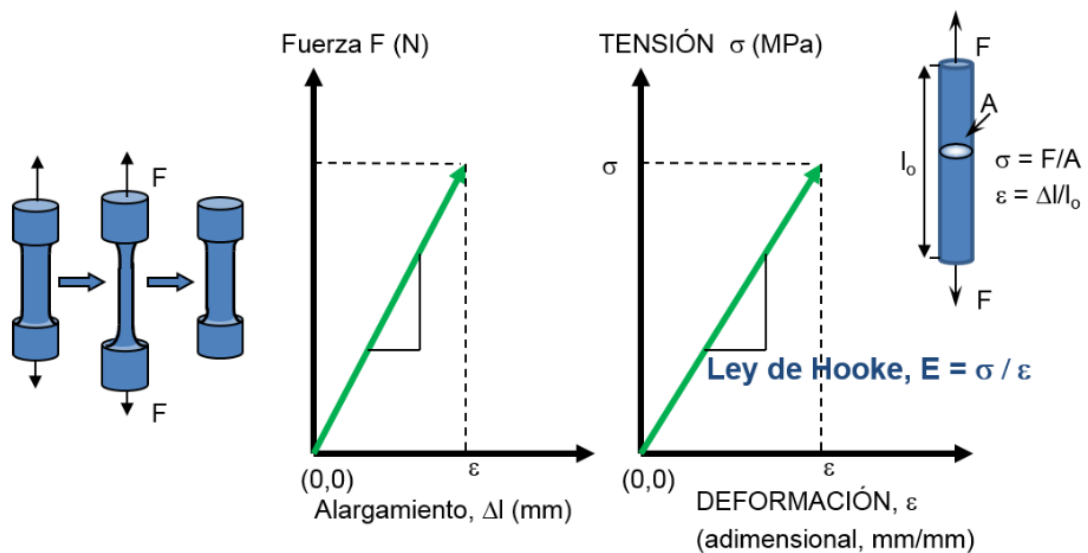


Ilustración 2-20: Deformación elástica de un material.

Fuente: García Romero y Monasterio Guisasola, 2018.

2.18. Deformación plástica

El metal sufre una deformación a causa de fuerzas externas, al momento de quitarle la fuerza, los átomos del metal no han regresado completamente a las dimensiones originales, por lo que han experimentado una deformación plástica. Dicho de otra manera, los átomos del metal son desplazados permanentemente de sus posiciones originales y toman nuevas posiciones (Coloma Morales, 2017, p. 35; Rodríguez, 2022).

Cabe recalcar que la deformación plástica está acompañada de una división de los bloques del mosaico dentro de los granos, si los grados de deformación son considerables, se observa un cambio notable en la forma de los granos y de su distribución en el espacio, lo que genera que se produzcan grietas entre estos. En la Ilustración 2-20 se observa el desplazamiento de los átomos del metal, causado por la acción de una Fuerza P, se observa cómo van cambiando de la posición a, hasta la posición c (Rodríguez, 2022).

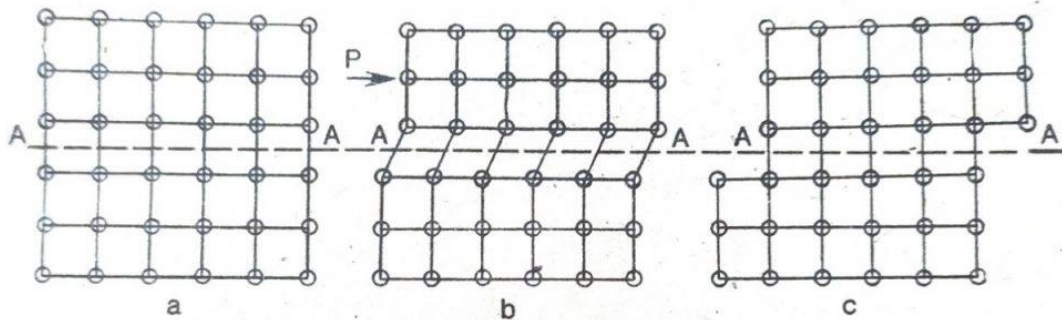


Ilustración 2-21: Desplazamiento de los átomos del metal.

Fuente: Rodríguez, 2022.

El esfuerzo σ_{desp} que se aplica para efectuar el desplazamiento observado, se puede calcular teóricamente. La fórmula que se utilizó se visualiza en la Ecuación:

$$\sigma = \frac{P}{A} \rightarrow \frac{\text{Carga o Fuerza}}{\text{Área determinada}}$$

2.19. Deformación convencional

Se produce una deformación convencional cuando a una barra de metal se le aplica una fuerza de tracción uniaxial, lo que genera un alargamiento en la barra en dirección de la fuerza. En otras palabras, la deformación convencional es la relación entre el cambio en la longitud de una muestra

en la dirección en que se aplica la fuerza y la longitud original de la muestra considerada (Coloma Morales, 2017). En la Ecuación se puede observar esta relación:

$$\text{Deformación convencional} \rightarrow \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \rightarrow \frac{\text{cambio de la longitud de la muestra}}{\text{longitud original de la muestra}}$$

2.20. Propiedades mecánicas de los metales

Las propiedades mecánicas de los materiales se refieren a aquellas características que describen cómo responden los materiales a las fuerzas externas o cargas. Estas propiedades incluyen la resistencia, la ductilidad, la tenacidad, la rigidez, la dureza, la fatiga y la fragilidad, entre otras. La comprensión de estas propiedades es fundamental para el diseño y la selección de materiales en aplicaciones específicas, ya que determinan cómo un material se comportará bajo diferentes condiciones de carga y temperatura.

2.20.1. Coeficiente de Poisson

Cuando un material se estira elásticamente en la dirección de la fuerza, va unido a un estrechamiento en la dirección perpendicular a la misma. El coeficiente de Poisson es la relación entre lo que el material se contrae en dicha dirección y lo que se alarga en el eje de aplicación de la fuerza (García Romero y Monasterio Guisasola, 2018).

2.20.2. Ley de Hooke

La ley de Hooke indica la relación entre la deformación producida y la tensión que la provoca es lineal. La pendiente de la recta tensión/deformación se denomina Módulo de Young o Módulo de Elasticidad E ; este mide la rigidez del material, cuando mayor es el módulo E más rígido es el material; de la misma manera, cuando mayor es E menor es la deformación elástica bajo un nivel de carga dado, como se observa en la Ecuación 3 (García Romero y Monasterio Guisasola, 2018).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

2.20.3. Límite elástico

El límite elástico es un valor importante, porque es el nivel de tensión al que un metal o aleación muestra una deformación plástica significativa. Debido a que no hay un punto definido de la

cuerva tensión-deformación donde acaba la deformación elástica y empieza la deformación plástica, se determina el límite elástico como la tensión a la que se produce una deformación elástica definida (Coloma Morales, 2017).

2.21. Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción es la máxima tensión que se alcanza en la curva tensión-deformación. Si la probeta desarrolla un crecimiento localizado de la sección transversal, la tensión convencional decrecerá con el incremento de la deformación hasta producirse la fractura, por lo que la deformación convencional se determina utilizando el área original de la sección transversal de la probeta. Cuanto más dúctil es el metal, mayor es la estricción antes de la fractura y más descendente la tensión alejándose del valor de resistencia a la tracción. En aleaciones de aluminio de alta resistencia, con curvas tensión-deformación, sólo hay un pequeño descenso de la tensión convencional desde el valor resistencia a la tracción porque este tipo de material tiene una ductilidad relativamente baja (Coloma Morales, 2017).

2.21.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se utiliza para evaluar la resistencia de metales y aleaciones. Para hacerlo, una muestra de metal se estira a velocidad constante hasta la fractura, esto se produce en un tiempo relativamente corto. A partir del ensayo, se puede obtener las propiedades mecánicas de los metales, como son el módulo de elasticidad, el límite elástico, la resistencia, el porcentaje de alargamiento a fractura y el porcentaje de estricción a fractura. En la Ilustración 2-21 se observa un cuerpo sometido a tensión de tracción (Coloma Morales, 2017).

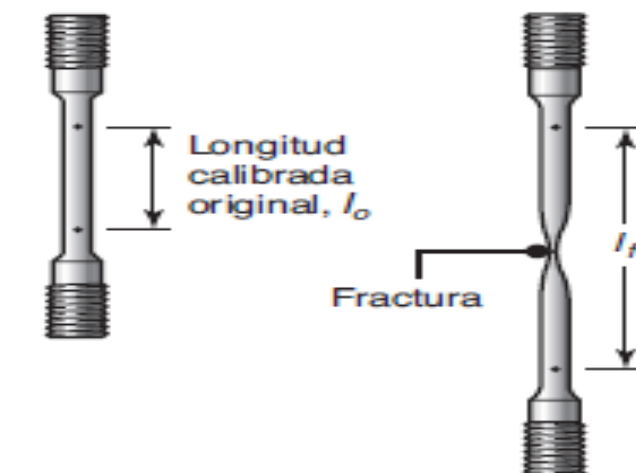


Ilustración 2-22: Fractura de un elemento

Fuente: Koteski, 2014.

2.22. Comparación entre el Método de Elementos Discretos y el Método de Elementos Finitos

El Método de los Elementos Discretos (DEM) y el Método de los Elementos Finitos (MEF) son dos técnicas utilizadas en el análisis y la simulación de sistemas físicos. En la Tabla 2-4, se observa las características de cada uno de los métodos:

Tabla 2-4: Comparación entre el método de elementos discretos (DEM) y el método de elementos finitos (MEF).

Métodos de Elementos Discretos (DEM)	Método de Elementos Finitos (MEF)
El DEM se utiliza para modelar y simular sistemas compuestos por partículas individuales que interactúan entre sí.	El MEF se utiliza para modelar y simular sistemas continuos, como estructuras sólidas y fluidos.
Se basa en la discretización de las partículas y el modelado de las fuerzas de interacción entre ellas.	Se basa en la discretización del dominio en elementos finitos y la aproximación de soluciones mediante funciones de interpolación.
Es especialmente útil para el estudio de sistemas granulares y fenómenos como la fragmentación de materiales y la dinámica de partículas.	Se utiliza ampliamente en el análisis estructural, la mecánica de fluidos y otros campos de la ingeniería.
Permite una representación detallada de la interacción entre partículas, pero puede requerir un tiempo de cálculo considerable para sistemas grandes o complejos.	El método de los elementos finitos es una técnica matemática utilizada para resolver problemas relacionados con estructuras y materiales. Esto permite a los ingenieros y científicos comprender cómo se comportará una estructura o material en diversas condiciones, como la tensión, el calor o las vibraciones.

Realizado por: Lemache J. & Martínez B, 2024

2.23. Ventajas y desventajas del Método de Elementos Discretos

El método de elementos discretos tiene varias ventajas y desventajas. En la Tabla 2-5, se exponen algunas de estas:

Tabla 2-5: Ventajas y desventajas del método de elementos discretos

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Permite modelar y simular sistemas granulares y partículas individuales, lo que resulta útil en una amplia gama de aplicaciones, como la industria minera, la ingeniería de materiales y la ingeniería química.	La simulación DEM puede requerir un tiempo de cálculo considerable, especialmente para sistemas grandes o complejos, lo que puede limitar su aplicabilidad en algunos casos.
Proporciona una representación detallada de la interacción entre partículas, lo que permite estudiar fenómenos como la fragmentación de materiales, la deformación de sólidos y la dinámica de fluidos.	La precisión de los resultados puede depender de la calidad de los datos de entrada y de los parámetros utilizados en el modelo, lo que requiere una validación cuidadosa y una calibración adecuada.
Permite analizar el comportamiento de sistemas complejos en condiciones realistas, lo que ayuda a comprender mejor su respuesta y optimizar su diseño y funcionamiento.	La gran cantidad de datos generados y la interacción entre múltiples partículas pueden requerir un análisis detallado y experiencia en la interpretación de los resultados.
Es una herramienta versátil que puede adaptarse a distintos tipos de problemas y condiciones, lo que la hace aplicable en una gran variedad de campos.	

Realizado por: Lemache J. y Martínez B, 2024

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Metodología

En el siguiente proyecto se empleó varias metodologías de investigación para el análisis de los puntos más críticos de la cuchara de una retroexcavadora, utilizando un análisis mediante el método de elementos discretos (DEM) con un software CAE.

Se empezó con una investigación preliminar donde se implica el análisis de libros artículos científicos y fuentes bibliográficas con la finalidad de analizar las propiedades mecánicas de deformación, fractura, de la cuchara de una retroexcavadora.

3.1.1. *Método Descriptivo*





Se utilizó una investigación descriptiva debido a la evaluación de la resistencia estructural y la deformación que sufre la cuchara mediante el análisis computacional implementando el método de elementos discretos (DEM). Se analiza y estudia los puntos más propensos a deformarse en la cuchara al momento de encontrarse operativa la retroexcavadora en el campo de trabajo.



3.1.2. *Método Cuantitativo*

Se estableció una investigación cuantitativa debido a la deformación crítica, evaluación de tensiones máximas e implementación de mallado en la cuchara que sea suficientemente aceptable para capturar detalles importantes y manejables para el punto de vista computacional.

3.2. Instrumentos de investigación

Tabla 3-1: Herramientas y maquinas utilizadas

Instrumentación	Descripción	Ilustración
Amoladora	Es una herramienta eléctrica o manual que se emplea para realizar operaciones de corte, pulido y desbaste en una variedad de materiales, incluyendo metal, madera, plástico y piedra.	
Papeles abrasivos	Son hojas de papel que incorporan recubrimientos de abrasivos como óxido de aluminio, carburo de silicio o esmeril. Se emplean para el lijado y pulido de superficies, adheridos mediante resina o adhesivo.	
Desbastadora	Es una herramienta eléctrica que emplea un disco abrasivo giratorio para eliminar material de una superficie de manera rápida y eficiente.	
Maquina pulidora	Es un equipo que emplea el proceso de pulido para suavizar, mejorar y dar brillo a superficies. Utiliza discos giratorios o almohadillas con abrasivos para trabajar una variedad de materiales, como metales, plásticos, madera, vidrio y piedra.	
Zona de ataque químico	Se emplea en áreas como metalurgia, ingeniería de materiales y nanotecnología para procesos de grabado, corrosión o deposición química con el fin de modificar propiedades materiales.	

Microscopio óptico	Es un dispositivo que emplea luz visible y sistemas de lentes para aumentar y examinar objetos pequeños tanto a nivel macroscópico.	
Espectrómetro de emisión	Es un dispositivo científico que analiza la composición química de una muestra mediante la detección y análisis de las longitudes de onda específicas de la radiación electromagnética emitida por los átomos o moléculas de la muestra cuando se excitan.	

Realizado por: Lemache J. & Martínez B, 2024

3.3. Resultados de la espectrometría

3.3.1. Principales aceros y aleaciones

3.3.2. Acero AISI-1045 estirado en frío

El material del cual está formada la cuchara es de un acero AISI-1045 estirado en frío y se conforma por las siguientes propiedades.

Tabla 3-2: Propiedades del acero AISI-1045 estirado en frío

Propiedades	
Resistencia a la tracción	600 a 800 MPa
Límite de fluencia	345 a 430 MPa
Dureza	170 a 220 Brinell
Elongación	10% al 20% de su longitud original

Realizado por: Lemache J. & Martínez B, 2024

3.3.3. Acero AISI-4340 normalizado

El material del cual está formada los dientes de la cuchara es de un acero AISI-4340 normalizado y se conforma por las siguientes propiedades.

Tabla 3-3: Propiedades del acero AISI-4340 normalizado

Propiedades	
Resistencia a la tracción	1080 a 1440 MPa
Límite de fluencia	930 a 1270 MPa
Dureza	370 a 450 Brinell
Elongación	10% al 13 % de su longitud original

Realizado por: Lemache J. & Martínez B, 2024

3.3.4. Probeta de acero AISI-1045 y 4340

3.3.4.1 Placa de acero AISI-1045 estirado en frio

Para el estudio del proyecto de investigación se realizó una extracción de un cubo de la parte de la cuchara con las dimensiones de 2cm de altura, 2cm de base y 2cm de profundidad.

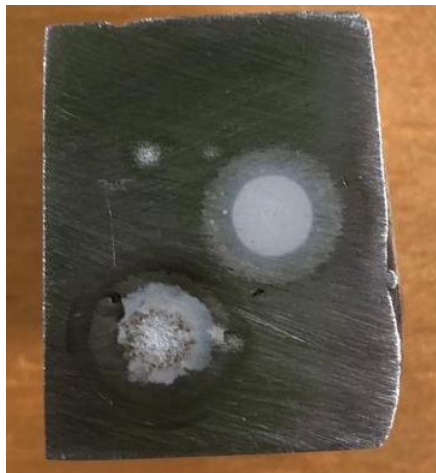


Ilustración 3-1: Muestra del material-cuchara

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.3.4.2 Placa de acero AISI-4340 normalizado

Mediante la amoladora se realizó una extracción del material, que está elaborada las uñas de la cuchara.



Ilustración 3-2: Muestra de material-uña de la cuchara

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.3.4.3 *Desgaste superficial de la muestra de los aceros*

Al obtener la extracción se procede al desgaste de la superficie para eso se determina distintos papeles abrasivos como: 220, 320, 400, 600, 1000, 1200, 1500, 2000 y 2500, los cuales se ocuparon para el proceso de desgaste de la superficie del acero a examinar empezando desde el papel abrasivo más grueso hasta el más fino.



Ilustración 3-3: Tipos de papeles abrasivos para el desgaste del acero.

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.3.4.4 *Forma de desgaste de los aceros AISI-1045 y 4340*

Mediante la realización del desgaste a un solo sentido y a un ritmo moderado del acero con los papeles abrasivos de la superficie a examinar el equipo posee un sistema de refrigeración por agua que permite que el elemento no se caliente al momento de realizar el desgaste con eso evitar el cambio microestructural que se va a analizar, se debe tener en cuenta que debe quedar la cara del acero AISI-1045 estirado en frío en forma de espejo.



Ilustración 3-4: Desbastadora

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.3.4.5 *Limpieza de la muestra*

Una vez finalizado el proceso de desgaste del acero, se procede a una fase de pulido con alúmina para optimizar el acabado de la superficie del material. Este procedimiento de pulido tiene una duración de alrededor de 5 minutos. A continuación, la muestra se limpia con agua y se seca utilizando un secador, preparando así el material para la etapa siguiente, que consiste en aplicar un ataque químico.



Ilustración 3-5: Pulidora

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.3.4.6 *Zona de ataque químico*

En el proceso de ataque químico, se induce una corrosión dirigida en la muestra con el objetivo de análisis. Para ello, es esencial que la muestra haya sido preparada de antemano. Para el examen del acero AISI-1045 estirado en frío y AISI-4340 normalizado, se emplea Nital como agente químico, de acuerdo con la normativa ASTM E12 destinada a la preparación metalúrgica.

3.3.5. *Microestructura del acero*

El espectrómetro de emisión tiene como objetivo permitir visualizar la microestructura basándose en las longitudes de onda de las líneas espectrales y sus intensidades, se pueden identificar los elementos presentes en la muestra y, en muchos casos, cuantificar su concentración.



Ilustración 3-6: NIKO Eclipse E200 LED

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

Tabla 3-4: Características del microscopio NIKO Eclipse E200 LED

Sistema óptico	
Ocular	10 (10x/20mm gran campo)
Tipo de objetivo	Plana cromática
El objetivo 1	5x/0.10
El objetivo 2	10x/0.25
El objetivo 3	20x/0.65
El objetivo 4	50x/1.25
Tipo de lampara	LED (LED 3 W)
Fuente de alimentación	100-240 V
En general	
Peso (g)	7300
Anchura (mm)	189
Longitud (mm)	258
Altura (mm)	407
Serie	Eclipse E200
Mecánica	
Tipo de construcción	Trinocular
Enfoque	Movimiento bruto y fino
Postura de observación (°)	30
Mesa de objetivo	Mesa en cruz (78x54 mm)
Revólver	4

Realizado por: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.3.5.1 Placas de acero AISI – 1045 y 4340 en estado puro.

Una vez preparado el ataque químico adecuado para tratar la placa junto a su estado natural, se procede a colocar la muestra bajo el microscopio para observar adecuadamente su estructura cristalina.

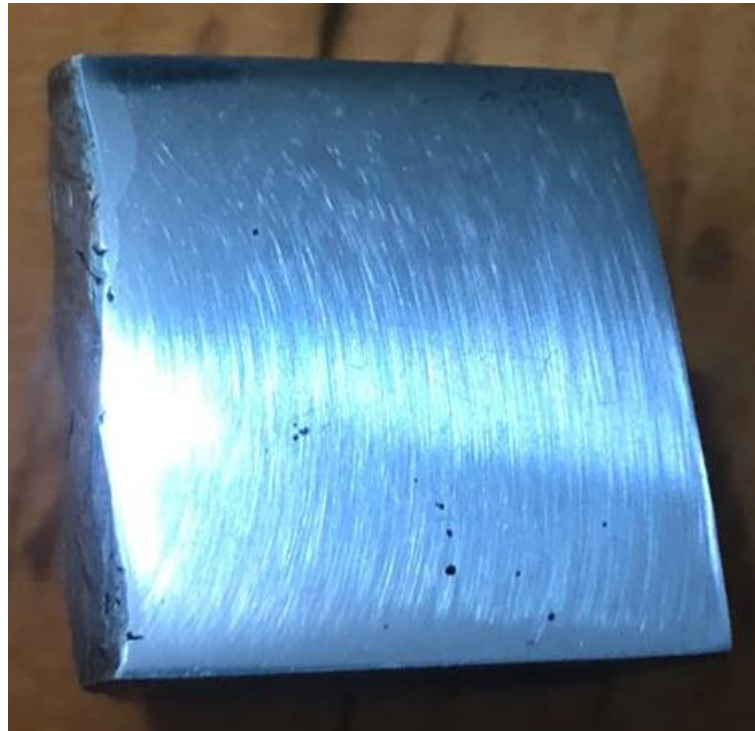


Ilustración 3-7: Placa de acero en su estado natural AISI-1045

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.



Ilustración 3-8: Microestructura del acero AISI-1045.

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

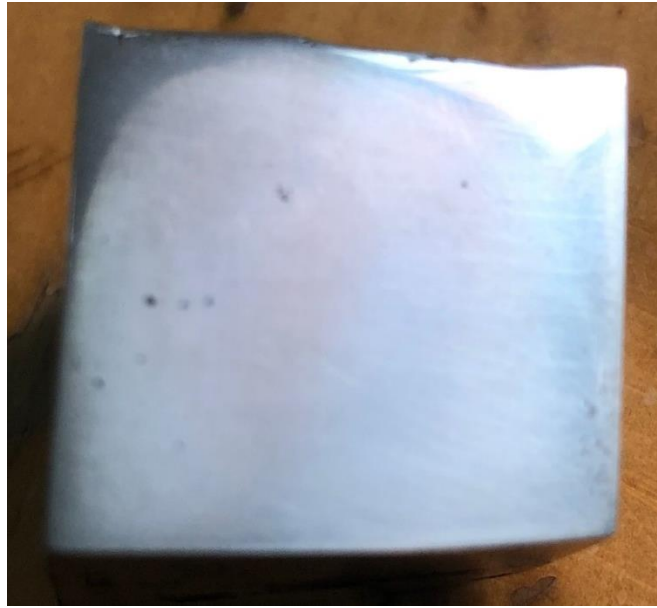


Ilustración 3-9: Placa de acero en su estado natural AISI-4340

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.



Ilustración 3-10: Microestructura del acero AISI-4340

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.4. Espectrometría

El ensayo de espectrometría se realizó, en el laboratorio de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, para la realización de este ensayo se usó la norma NTE INEN 0118, esta norma establece el método adecuado para la determinación de Manganeseo del acero usando el método espectrofotométrico. (INEN 0118, 1975)

La muestra de los porcentajes químicos que contiene la probeta de la cuchara de maquinaria de minería, se concluye que para la fabricación de este cucharón de retroexcavadora se utilizó un acero AISI 1045 y un AISI-4340, ya que los componentes químicos encontrados son iguales a los que encontramos en las siguientes tablas.

Tabla 3-5: Composición química del material (cuchara).

Nombre	%	Promedio
C	%	0.539
Cl	%	0.116
Mn	%	0.646
P	%	<0.0100
S	%	<0.0100
Cr	%	<0.0100
Mo	%	0.017
Ni	%	0.032
Cu	%	0.078
Al	%	0.019
Co	%	0.014
Mg	%	<0.0050
Nb	%	0.030
Ti	%	<0.0030
V	%	<0.0050
W	%	<0.100
Fe	%	98.48

Realizado por: Lemache J. & Martínez B, 2024.

Tabla 3-6: Composición química del material (uñas)

Nombre	%	Promedio
C	%	0.510
Si	%	0.153
Mn	%	0.683
P	%	<0.0100
S	%	<0.0100

Cr	%	<0.0100
Mo	%	0.016
Ni	%	0.030
Cu	%	0.082
Al	%	0.024
Co	%	0.015
Mg	%	<0.0050
Nb	%	0.029
Ti	%	<0.0030
V	%	<0.0050
W	%	<0.100
Fe	%	98.43

Realizado por: Lemache J. & Martínez B, 2024

3.4.1. *Propiedades del material presentes en el acero AISI – 1045*

- Carbono: El carbono es el principal elemento de aleación en el acero, determinando su dureza y resistencia. En la proporción encontrada en el AISI 1045, proporciona un buen balance entre resistencia y ductilidad, permitiendo que el acero sea relativamente fácil de mecanizar y soldar, a la vez que mantiene una buena capacidad de ser templado.
- Manganeso: El manganeso mejora la templabilidad del acero, lo cual es crucial para el proceso de endurecimiento. También actúa como un agente desoxidante y ayuda a aumentar la resistencia del acero al impacto y la tracción, sin comprometer significativamente su ductilidad.
- Fósforo: Aunque el fósforo puede aumentar la resistencia y la dureza del acero, en altas concentraciones puede hacer que el material sea más frágil. Por lo tanto, se mantiene en niveles bajos en el AISI 1045 para evitar la fragilidad.
- Azufre: El azufre es generalmente considerado un contaminante en el acero porque puede formar inclusiones de sulfuro de hierro, las cuales pueden reducir la ductilidad y la tenacidad del material. Sin embargo, en pequeñas cantidades, puede mejorar la maquinabilidad del acero, facilitando su corte y mecanizado.
- Hierro: El hierro es el componente base del acero AISI 1045, sirviendo como el metal principal en el cual se disuelven los demás elementos de aleación. Proporciona la matriz metálica que define muchas de las propiedades físicas fundamentales del acero, como su conductividad térmica, densidad y capacidad de formación de aleaciones con otros elementos.

3.4.2. *Propiedades del material presentes en el acero AISI – 4350*

- **Carbono:** El carbono es un elemento fundamental en el acero AISI 4340, contribuyendo significativamente a su resistencia, dureza, capacidad de endurecimiento, y las características generales del material. Su papel es esencial para las aplicaciones industriales exigentes en las que se utiliza este tipo de acero.
- **Silicio (Si):** El silicio en el acero AISI 4340 contribuye de manera significativa a mejorar la resistencia, dureza, tenacidad y estabilidad térmica del material, al tiempo que actúa como un desoxidante eficaz durante su fabricación.
- **Manganeso:** El manganeso desempeña varias funciones clave en el acero AISI 4340, incluido el fortalecimiento, la mejora de la templabilidad, la desoxidación, la mejora de la tenacidad y la resistencia al impacto, el control de la microestructura, la reducción de la fragilidad y la mejora de la soldabilidad. Estas funciones son fundamentales para asegurar que el acero cumpla con los requisitos de resistencia, dureza y tenacidad para una amplia gama de aplicaciones industriales.
- **Fósforo:** el fósforo en el acero AISI 4340 tiene algunas funciones beneficiosas, como mejorar la maquinabilidad y aumentar la resistencia y dureza en pequeñas cantidades. Sin embargo, debido a sus efectos negativos en la ductilidad y la tenacidad, su contenido se mantiene estrictamente controlado dentro de límites bajos.
- **Azufre:** Aunque el azufre puede mejorar la maquinabilidad del acero AISI 4340 en pequeñas cantidades, su presencia debe controlarse cuidadosamente debido a sus efectos negativos en la fragilidad, la soldabilidad y las propiedades mecánicas del material. Por lo tanto, en la fabricación del AISI 4340, se mantiene su contenido tan bajo como sea posible para garantizar las propiedades mecánicas óptimas del acero.
- **Cromo:** El cromo desempeña varias funciones clave en el acero AISI 4340, incluida la mejora de la resistencia a la corrosión, la dureza, la resistencia al desgaste, la estabilidad estructural y la soldabilidad. Estas propiedades hacen que el acero AISI 4340 sea adecuado para una variedad de aplicaciones que requieren alta resistencia mecánica y resistencia a la corrosión en ambientes exigentes.
- **Níquel:** El níquel desempeña varias funciones clave en el acero AISI 4340, incluida la mejora de la tenacidad, la resistencia al impacto, la resistencia a la fatiga, la estabilidad estructural, la soldabilidad y, en cierta medida, la resistencia a la corrosión
- **Molibdeno:** El molibdeno desempeña varias funciones clave en el acero AISI 4340, incluida la mejora de la dureza, la resistencia al desgaste, la resistencia a la fatiga, la resistencia a la temperatura, la soldabilidad y la resistencia a la corrosión. Estas propiedades hacen que el

AISI 4340 sea adecuado para una variedad de aplicaciones que requieren alta resistencia mecánica y resistencia a las condiciones ambientales adversas.

3.5. Selección del acero para la cuchara y uñas de la retroexcavadora Komatsu.

Después de realizar todos los ensayos, para poder determinar el tipo de material adecuado para la cuchara y uñas de la retroexcavadora se realizó una comparación con los datos químicos obtenidos en las pruebas y los del libro, como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 3-7: Comparación de las propiedades químicas de los aceros

Aceros	%	C	Mn	P, Max	S, Max	Si	Ni	Cr	Mo
1040	%	0.37- 0.44	0.60- 0.90	0.040	0.050	----- -	----- -	----- -	----- -
1045	%	0.43- 0.50	0.60- 0.90	0.040	0.050	----- -	----- -	----- -	----- -
1050	%	0.48- 0.55	0.60- 0.90	0.040	0.050	----- -	----- -	----- -	----- -
4140	%	0.38- 0.43	0.60- 0.80	0.035	0.040	0.20- 0.35	----- -	0.80- 1.10	0.15- 0.25
4340	%	0.38- 0.43	0.60- 0.80	0.035	0.040	0.20- 0.35	1.65-2.0	0.70- 0.90	0.20- 0.30
4350	%	0.48- 0.53	0.60- 0.80	0.305	0.040	0.20- 0.35	1.65-2.0	0.70- 0.90	0.20- 0.30

Realizado por: Lemache J. & Martínez B, 2024.

Se realizó las comparaciones de los diferentes materiales que tenían la mayor aproximación a los datos obtenidos por los ensayos químicos y se llegó a una conclusión. El material para la cuchara se identificó un acero AISI-1045 y el material para las uñas de la cuchara de la retroexcavadora se seleccionó un acero AISI-4340.

3.6. Rango de trabajo de la retroexcavadora

Para el análisis computacional se utilizó la fuerza de excavación de la retroexcavadora Komatsu PC28UU-1 lo cual encontramos en el manual de operación, como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 3-8: Rango de trabajo de la retroexcavadora.

Rango de trabajo	
Máxima altura de excavación	4800 mm
Máxima altura de descarga	3450 mm
Máxima profundidad de excavación	2700 mm
Máximo alcance de excavación a nivel del suelo	4130 mm
Máximo alcance de excavación	4200mm
Fuerza de excavación de cucharón	2140 kg

Realizado por: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.7. Modelado de la cuchara

Para la modelación de la cuchara se tomó de referencia la maquina adquirida por los estudiantes de la carrera de ingeniería automotriz una Komatsu PC28UU-1 y para su modelación se utiliza un software CAE en este caso SOLIDWORKS. Para el análisis estático que se realizará, nos permite tener una gran versatilidad y factibilidad, se empezará desde el punto ingenieril, en este caso será la ingeniería inversa, tomando en cuenta el diseño que para este caso será la cuchara de la retroexcavadora Komatsu del laboratorio de maquinaria pesada.

En las siguientes ilustraciones se presenta el modelo de la cuchara a diseñar donde tomaremos en cuenta las vistas principales para el modelado en el software CAE y realizar el análisis respectivo para el proyecto de investigación.



Ilustración 3-11: Vista isométrica de la cuchara (Komatsu PC28UU-1)

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.



Ilustración 3-12: Vista frontal de la cuchara (Komatsu PC28UU-1)

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.



Ilustración 3-13: Vista superior de la cuchara (Komatsu PC28UU-1)

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.



Ilustración 3-14: Vista lateral de la cuchara (Komatsu PC28UU-1)

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024,



Ilustración 3-15: Dientes de la cuchara (Komatsu PC28UU-1)

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.7.1. *Diseño de la cuchara SolidWorks*

En el modelado de la cuchara (bucket) en 3D se consideró en cuenta las dimensiones obtenidas del elemento real con la finalidad de obtener una geometría de calidad que se observara en las siguientes ilustraciones 3-35, 3-36, 3-37, 3-38.

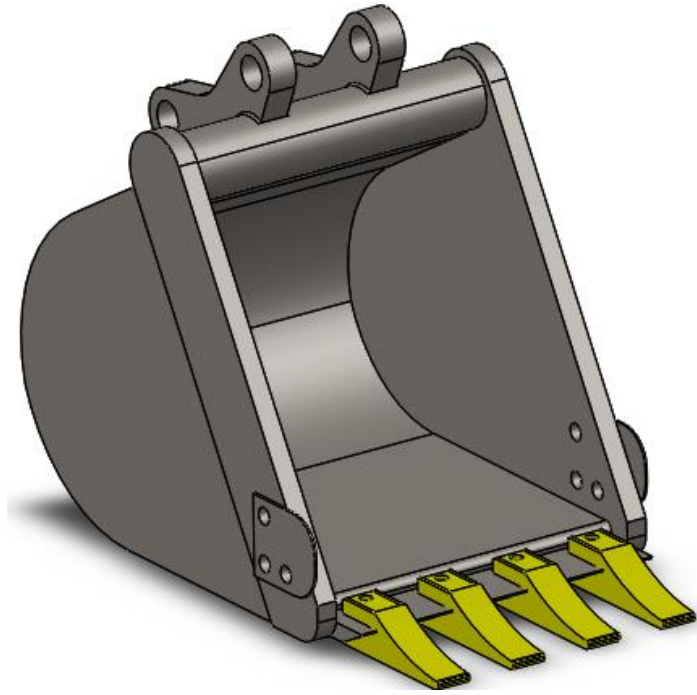


Ilustración 3-16: Vista isométrica de la cuchara en software CAE

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

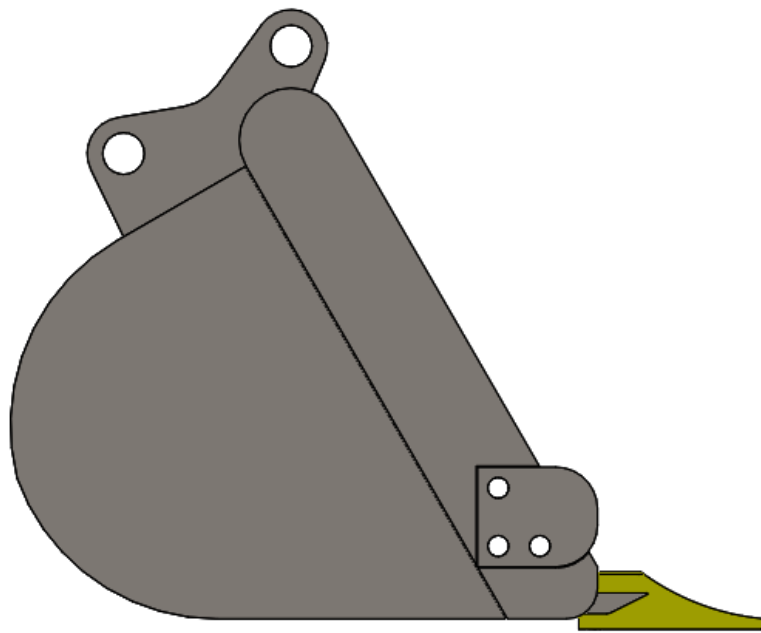


Ilustración 3-17: Vista lateral de la cuchara en software CAE

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

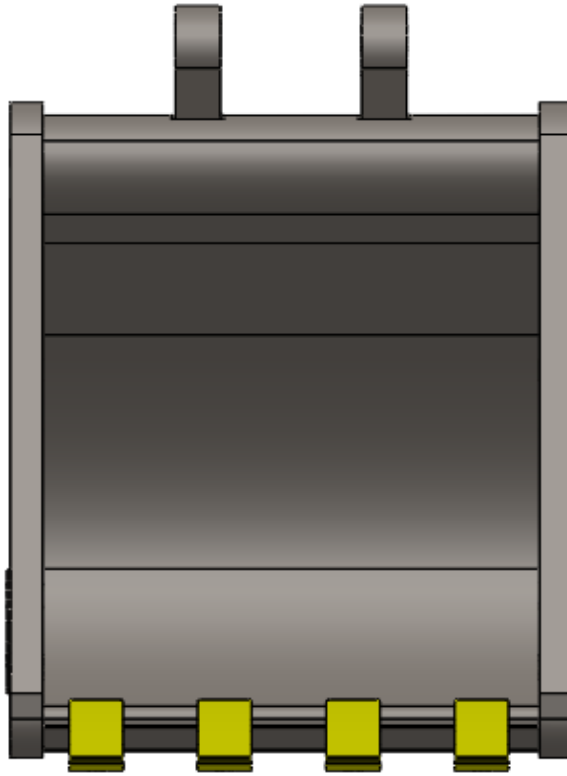


Ilustración 3-18: Vista frontal de la cuchara en software CAE

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

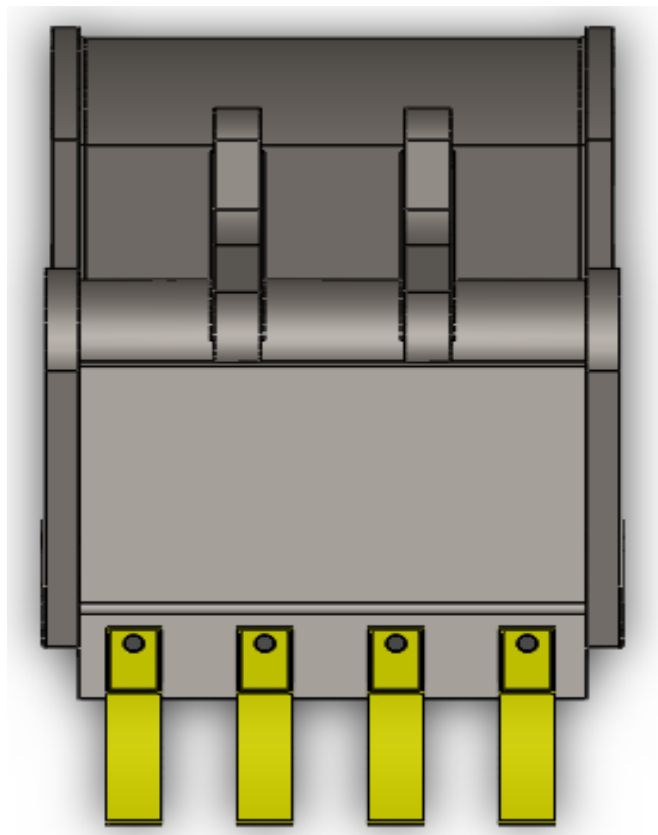


Ilustración 3-19: Vista superior de la cuchara en software CAE

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.7.2. Croquis de la cuchara de la Komatsu PC28UU-1

Se comenzó a realizar el modelado en el software SolidWorks mediante varios croquis, empezando con líneas trazadas en 2D, 3D, circunferencias y cuadrados para obtener la geometría final. Como se observa en las siguientes ilustraciones 3-39, 3-40, 3-41, 3-42, 3-43, 3-44, 3-45.

Diseño:

- Se empezó por el diseño de los protectores laterales de la cuchara, teniendo como referencia las dimensiones obtenidas del elemento real. Para la extrusión del croquis del protector lateral, se seleccionó una medida de 2.5 cm.

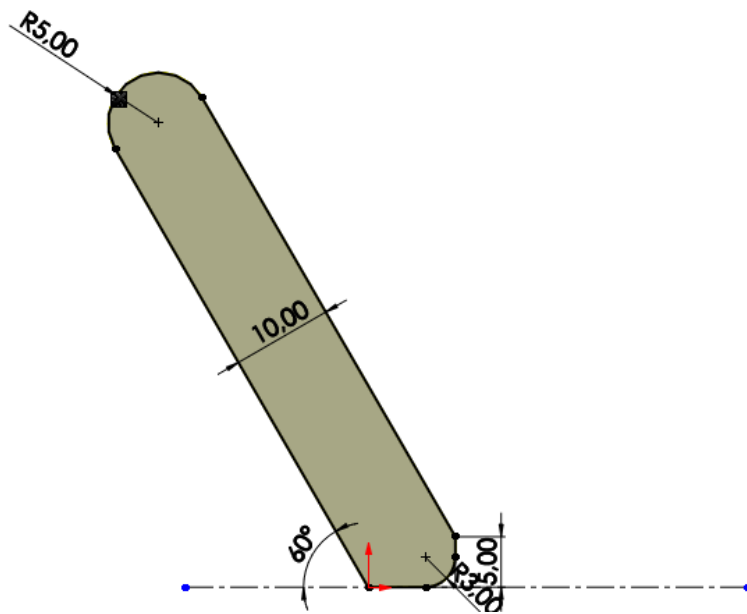


Ilustración 3-20: Croquis- Protectores laterales de la cuchara.

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

- Para el diseño del croquis de la plancha lateral de la cuchara se tomo como referencia el protector lateral ya realizado anteriormente. En la extrusión de esta parte del elemento se selección una medida de 2 cm.

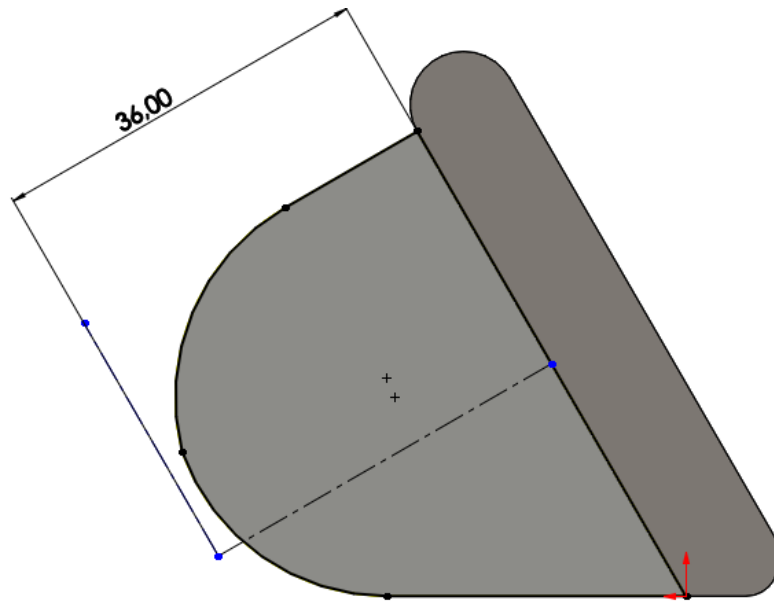


Ilustración 3-21: Croquis- Plancha laterales de la cuchara.

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

- Se realizo un croquis en 3D para diseñar la parte interior de la cuchara teniendo como referencia los elementos ya diseñados anteriormente y se selecciona una medida de extrusión de 38.70 cm

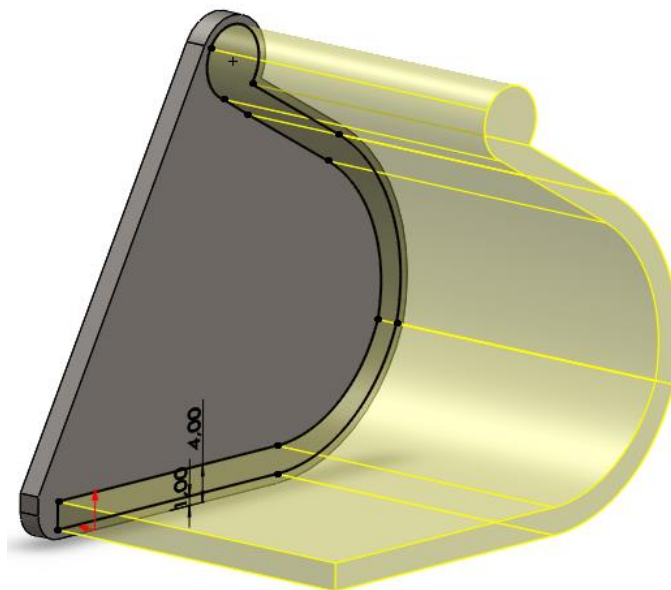


Ilustración 3-22: Croquis-Interior de la cuchara

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

- Para realizar el lado contrario de la cuchara se utilizaron herramientas del mismo software, se creó un plano adicional con la finalidad de usar la operación de simetría de identidades.

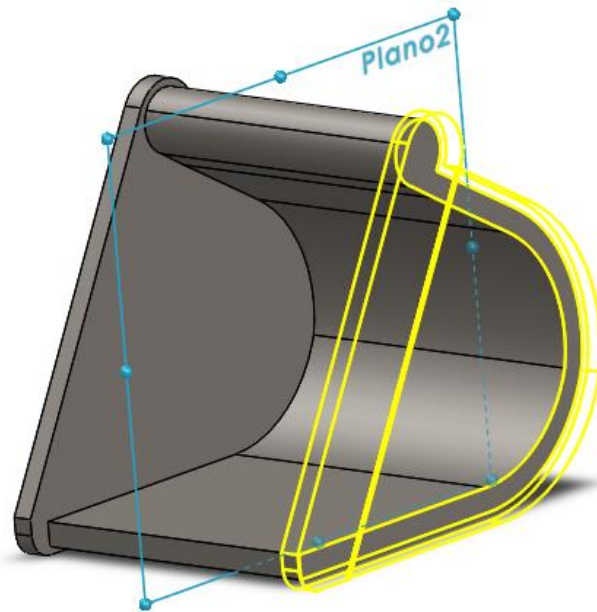


Ilustración 3-23: Simetría de identidades

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

- Las planchas de desgaste se modelaron en base a las dimensiones obtenidas de la cuchara de la retro excavadora. Se diseño una plancha lateral como se muestra en la ilustración 3-43 con una extrusión de 0,25 cm, luego se utilizó la herramienta simetría de identidades para obtener la otra plancha lateral.

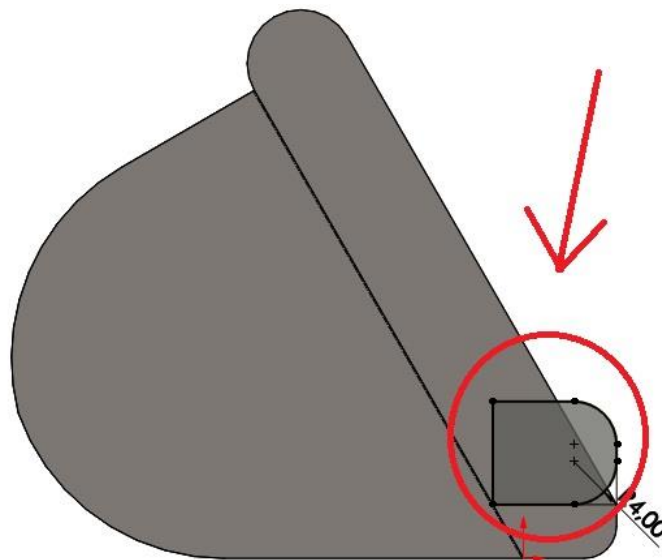


Ilustración 3-24: Plancha de desgaste

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

- Se diseñó la horquilla en base a las dimensiones obtenidas de la cuchara de la retroexcavadora y mediante la herramienta simetría de identidades se modeló la siguiente horquilla dándonos como resultado final dos elementos como se observa en la siguiente ilustración.

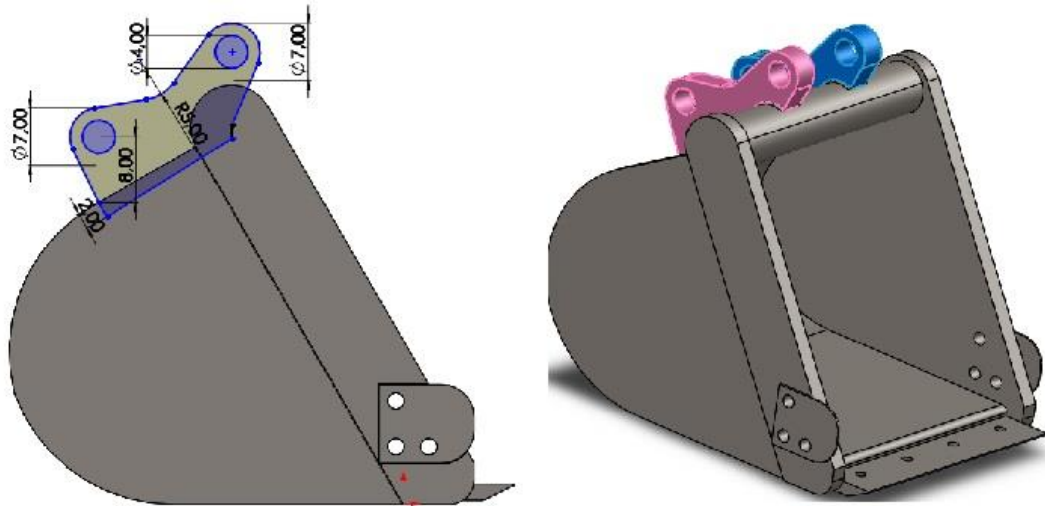


Ilustración 3-25: Horquilla de la cuchara (retroexcavadora)

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

- Se modeló las uñas de la cuchara de acuerdo con las dimensiones obtenidas, luego se realizó una extrusión de 4,20 cm, como se observa en las siguientes ilustraciones 3-45, 3-46.

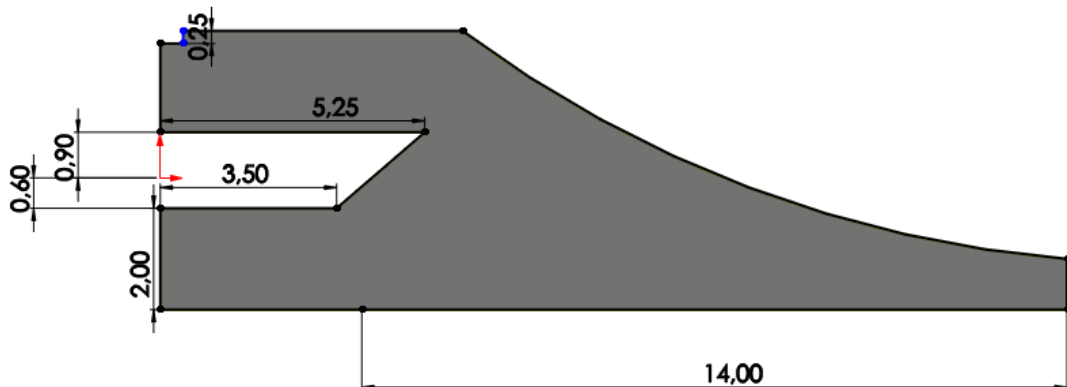


Ilustración 3-26: Croquis de la uña de la retroexcavadora.

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

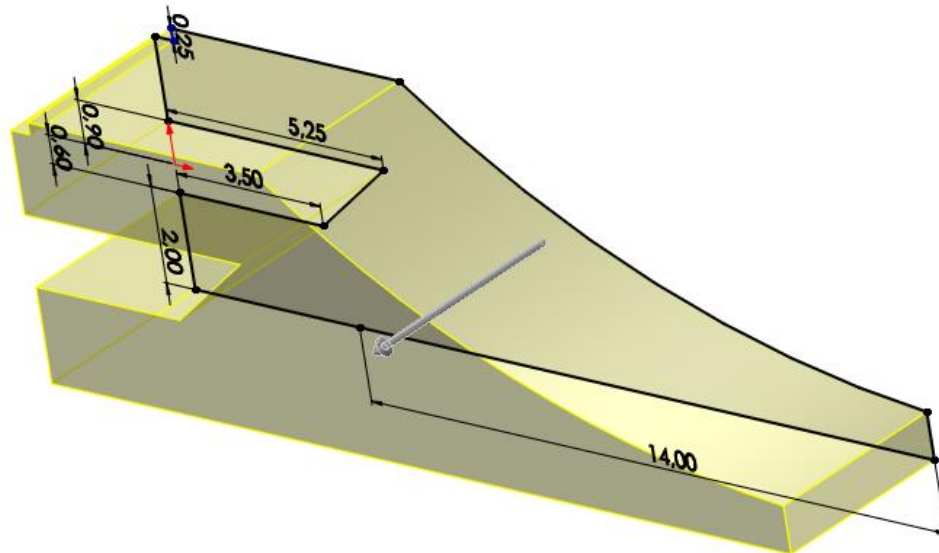


Ilustración 3-27: Extrusión de la uña de la retroexcavadora.

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.7.3. Elección del material para la cuchara de la Komatsu PC28UU-1

Al definir completamente el elemento, el siguiente paso es seleccionar el material adecuado para su simulación. En este caso, se optará por el acero AISI 1045 estirado en frío y el AISI 4340 normalizado. Al elegir estos materiales, aparecerá una tabla detallada que muestra todas sus características esenciales.

Tras revisar minuciosamente estos parámetros y asegurarse de que cumplen con los requisitos del proyecto, se procederá a confirmar la selección del material. Este proceso garantiza que la pieza no solo cumpla con las especificaciones de diseño, sino que también posea las propiedades mecánicas adecuadas para su aplicación prevista, como se observa en las siguientes ilustraciones.

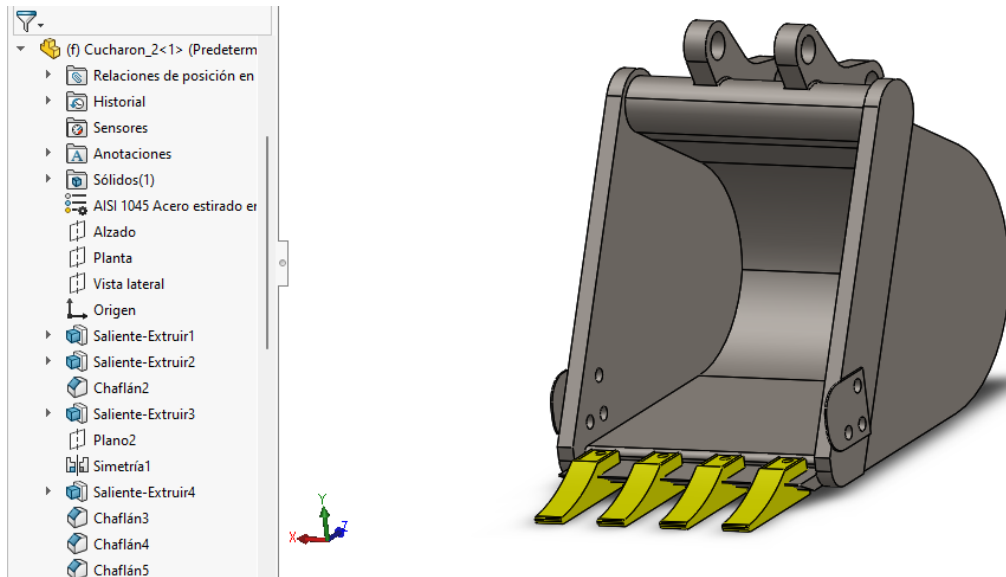


Ilustración 3-28: Material Aplicado a la cuchara

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

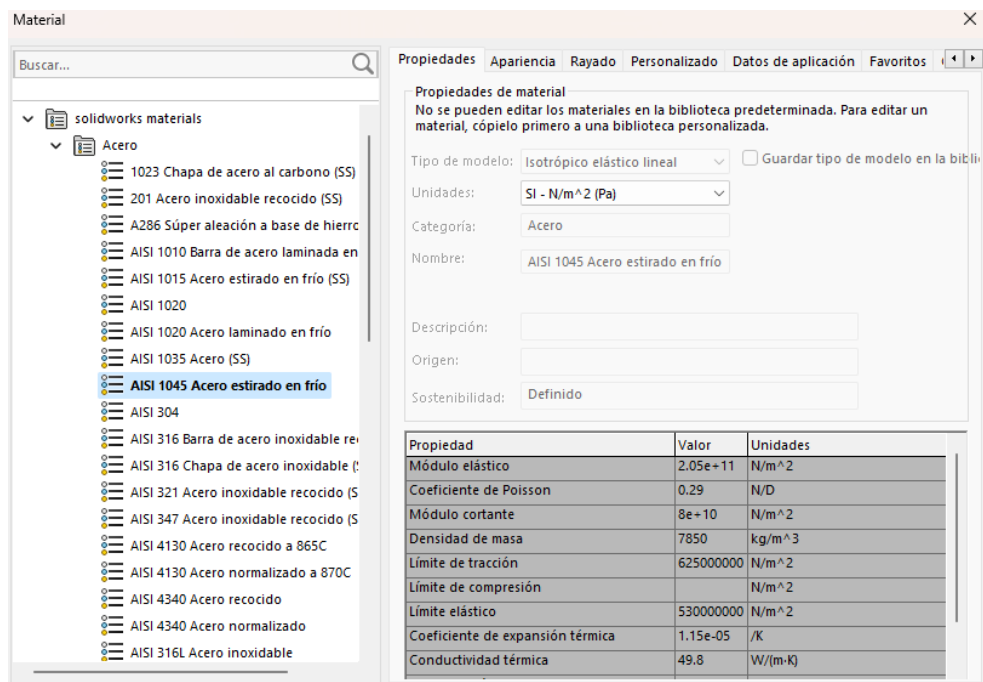


Ilustración 3-29: Selección del material en SolidWorks (AISI-1045)

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

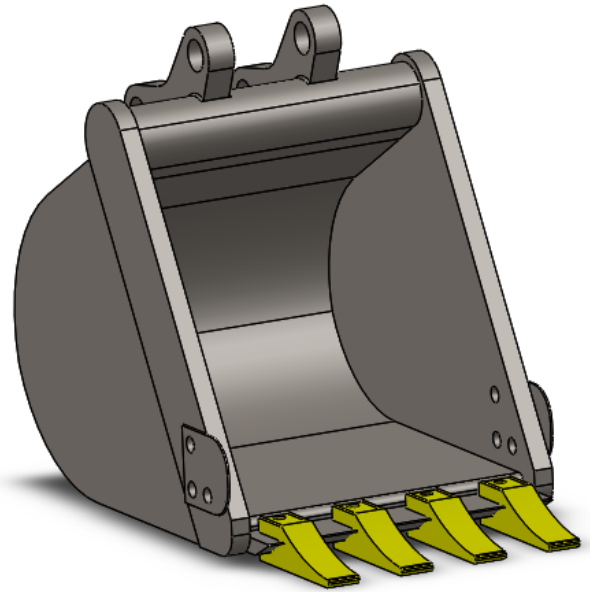
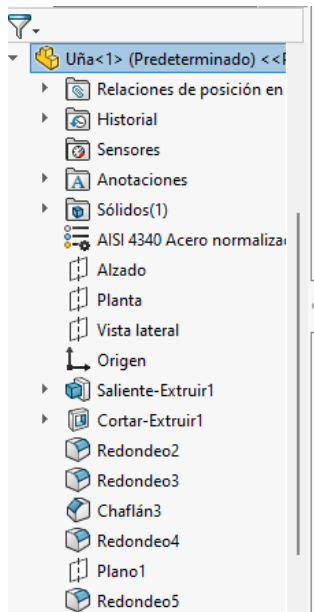


Ilustración 3-30: Material aplicado a las uñas.

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

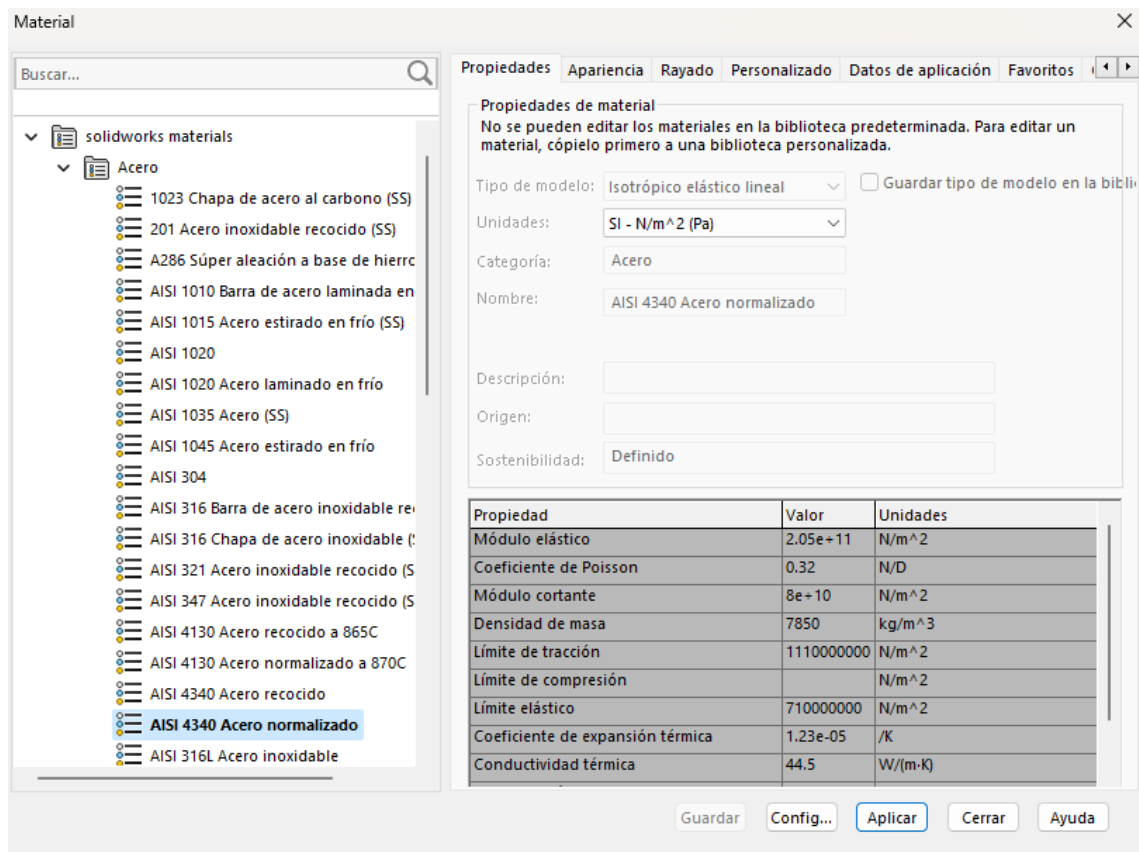


Ilustración 3-31: Selección del material en SolidWorks (AISI-4340)

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.7.4. Exportación del archivo de la cuchara de la Komatsu PC28UU-1

Al terminar de realizar la modelación de la cuchara de la retroexcavadora y los acabados correspondiente se procederá a guardar dicho documento en los siguientes formatos STEP y STL.

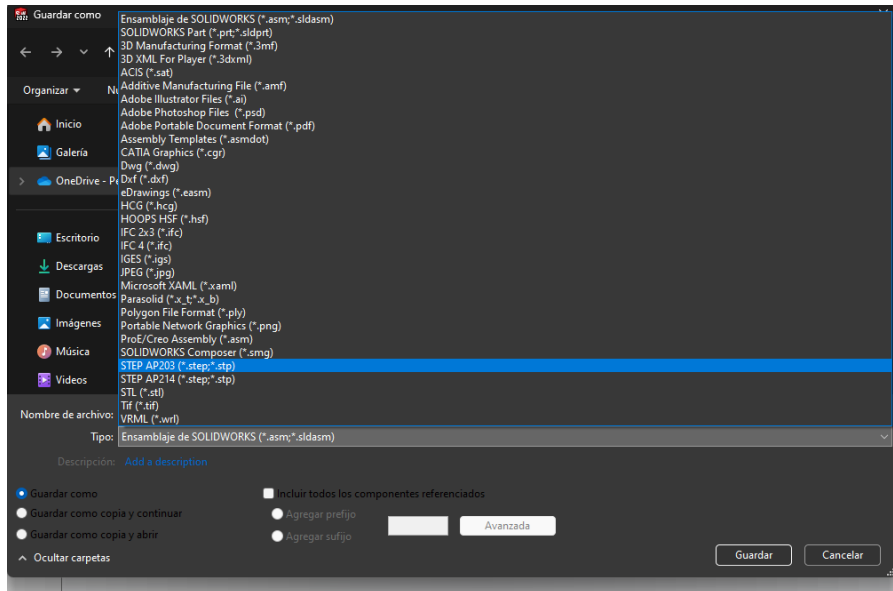


Ilustración 3-32: Archivo en formato STEP - Cuchara

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024

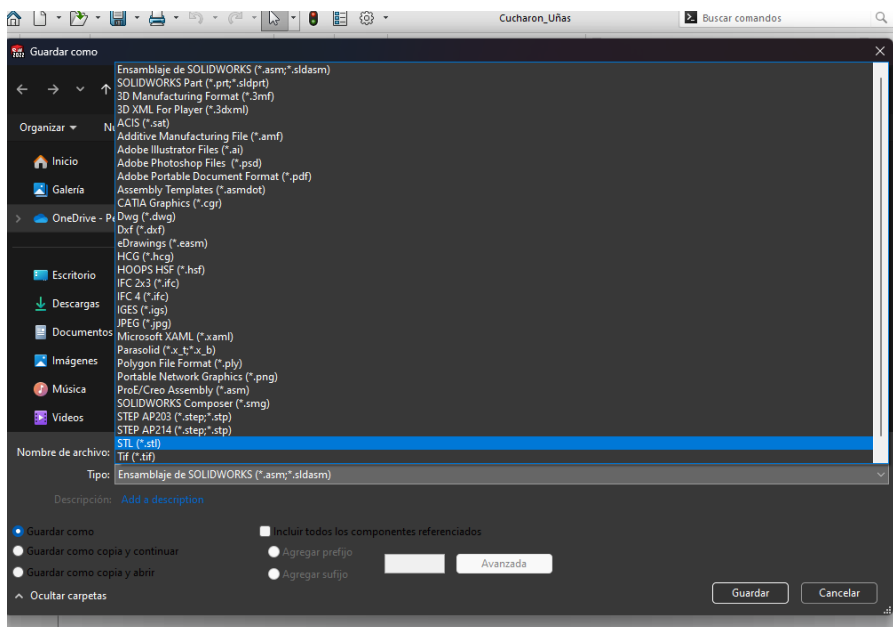


Ilustración 3-33: Archivo en formato STL - Cuchara

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024

3.8. Análisis por método de elementos finitos

Utilizando el software ANSYS, se llevó a cabo un análisis de elementos finitos para una pieza que fue diseñada previamente mediante una herramienta CAE, la cual facilita el diseño asistido por computadora. Este análisis tiene como objetivo orientarnos a través de un procedimiento paso a paso, con el fin de generar un informe detallado o una evaluación exhaustiva del diseño en cuestión. El proceso se desarrolló siguiendo una serie de instrucciones claras y concisas en ANSYS, destacando su utilidad significativa y sus amplias funcionalidades en el campo del análisis de elementos finitos.

Para un análisis estático más detallado se utilizará el programa de ANSYS, al momento de abrir el programa se presenta un interfaz, se selecciona la opción de Static Structural, por lo tanto, una vez guardado el modelado en formato STEP se procede a importar el archivo al programa luego se procede a la selección de modelado que se presentará varias opciones para el desarrollo del estudio.

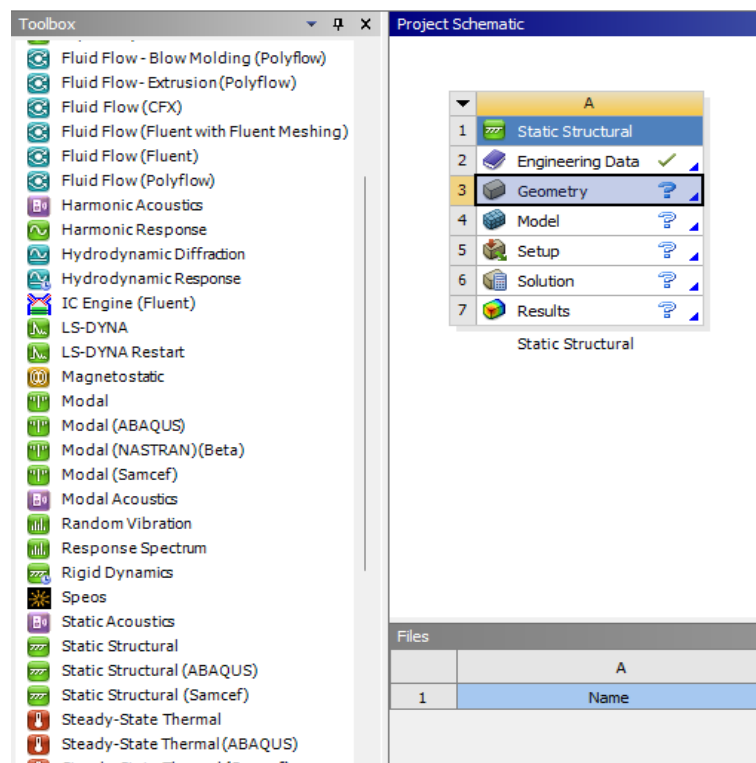


Ilustración 3-34: Selección Static Structural en ANSYS

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024

3.8.1. Configuración del material en ANSYS para su respectivo análisis

Se pueden examinar los datos introducidos en ANSYS, utilizados para configurar los nuevos materiales destinados al análisis de la cuchara de una retroexcavadora hidráulica, como se puede observar en las siguientes ilustraciones.

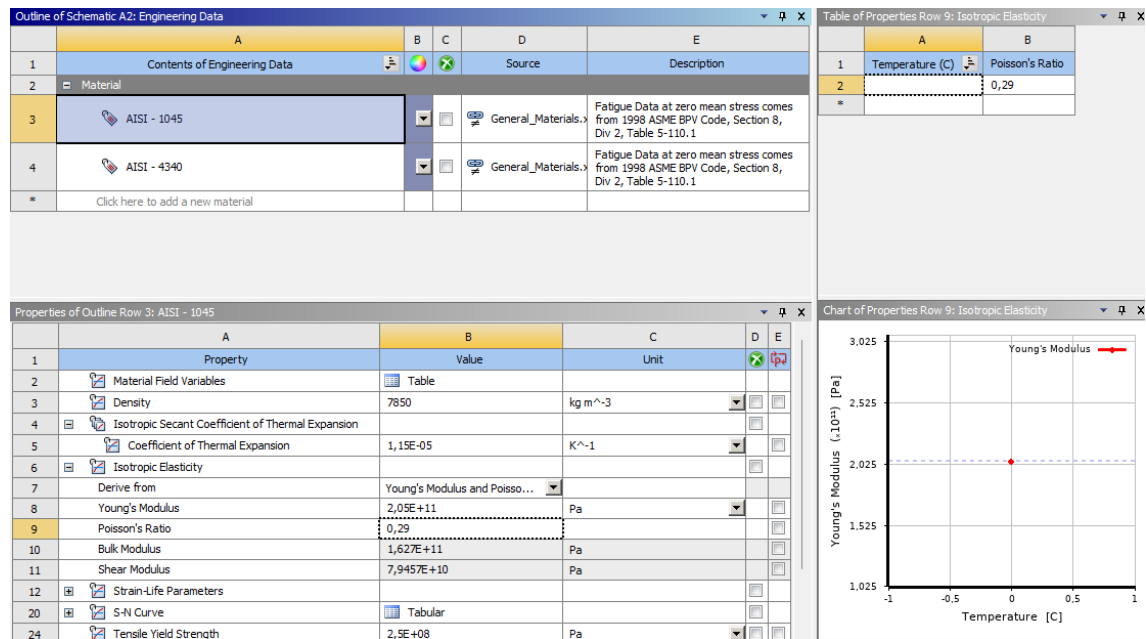


Ilustración 3-35: Configuración del nuevo material (AISI-1045)

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

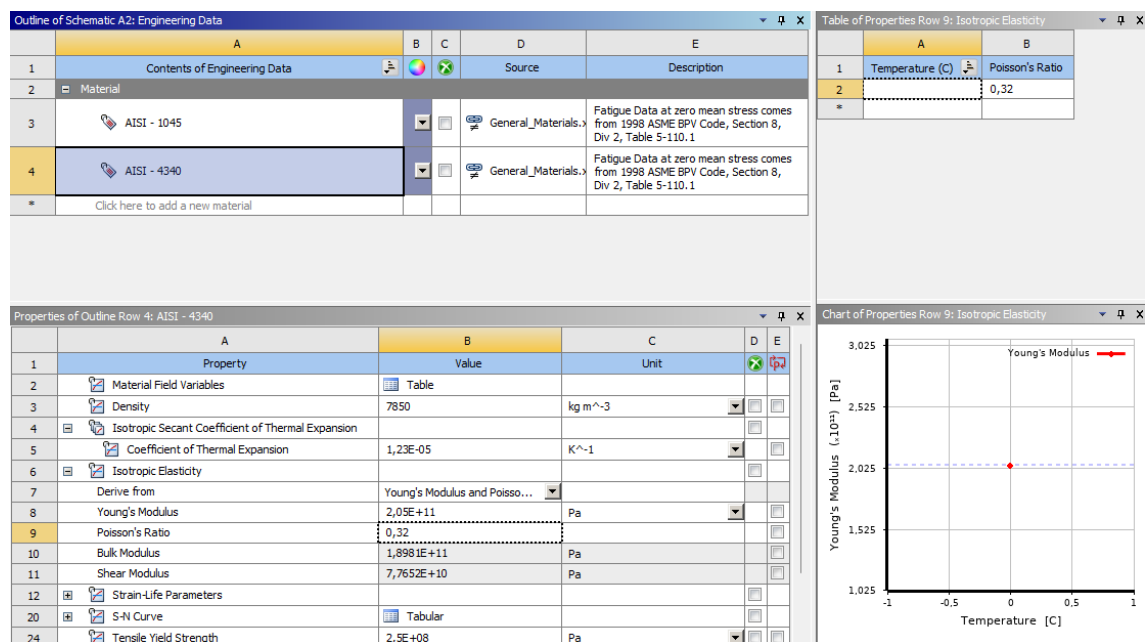


Ilustración 3-36: Configuración del nuevo material (AISI-4340)

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.8.2. Selección del material en la cuchara y uñas de la retroexcavadora Komatsu.

Para determinar el material adecuado para la pieza en cuestión, se comienza examinando la geometría de la cuchara. Luego, se evalúa el tipo de material, enfocándose especialmente en su comportamiento en términos de rigidez. Finalmente se asignará como material el AISI-1045 y AISI-4340.

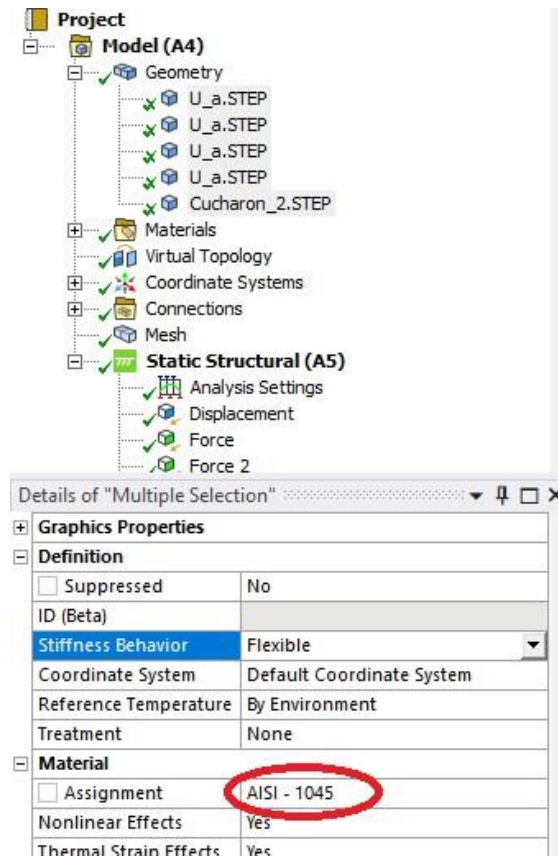


Ilustración 3-37: Asignación del material a la cuchara

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024

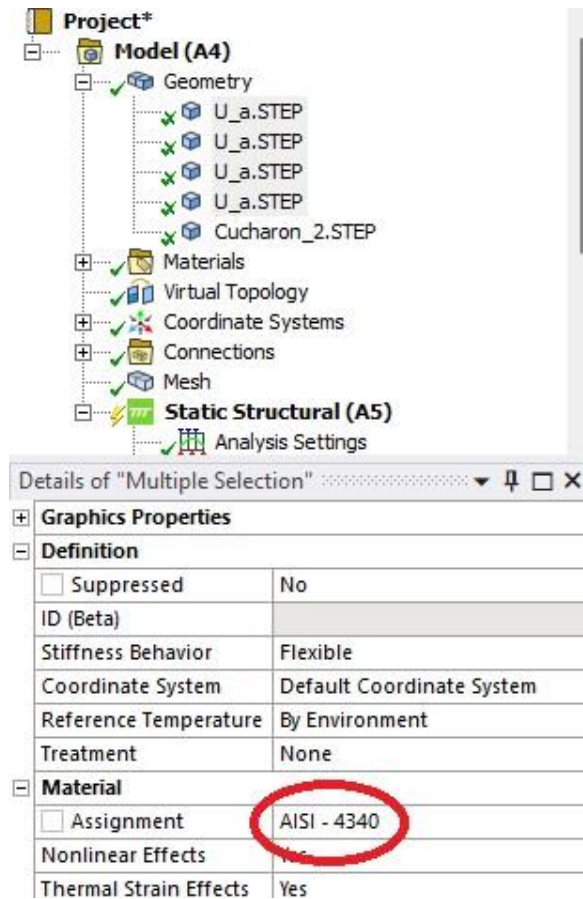


Ilustración 3-38: Asignación del material a las uñas

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.8.3. *Parámetros del mallado*

Para poder determinar un mallado adecuado primero se debe determinar el tamaño del elemento, de acuerdo con las dimensiones se escogió un mallado de 5 mm el cual se obtuvo resultados aceptables tanto en velocidad de cálculo de las matrices internas que resuelve el programa y la calidad del resultado. En la ilustración 3-51, se pueden observar las propiedades y configuraciones ingresadas del mallado en ANSYS.

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	5, mm
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	Default (2)
Mesh Defeaturing	Yes
<input checked="" type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	1038, mm
Average Surface Area	9877,5 mm ²
Minimum Edge Length	0,5 mm

Ilustración 3-39: Propiedades de la malla

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024

Uno de los aspectos importantes que se debe tomar en cuenta es la calidad de la malla por lo cual se verifico en el software ANSYS y se comprobó que el mallado escogido es adecuado, en la ilustración 3-27, se indica la calidad del mallado. Se obtuvo un promedio de 0,82242 por lo cual garantiza la fiabilidad en la obtención de los resultados.

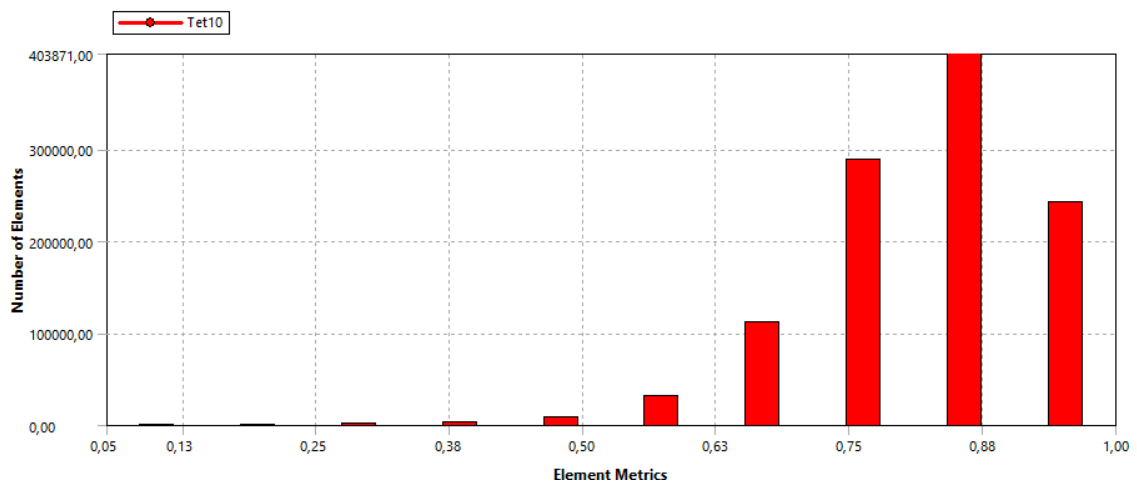


Ilustración 3-40: Calidad de la malla

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024

3.8.4. Restricciones físicas para el análisis de la cuchara de la retroexcavadora

El cucharón de la excavadora hidráulica está conectado al brazo de la excavadora mediante pasadores y se mueve gracias al cilindro hidráulico. Para asegurar el soporte del cucharón, se empleó una operación de fijación llamado FIX SUPPORT.

A: Static Structural

Fixed Support

Time: 1, s

4/5/2024 13:09

■ Fixed Support

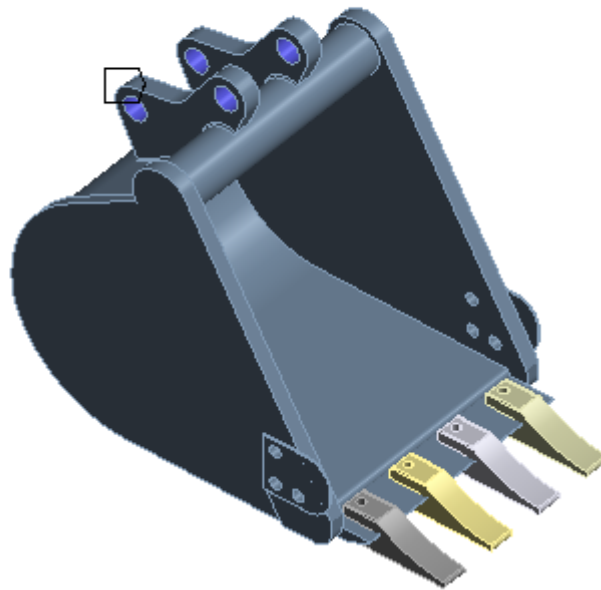


Ilustración 3-41: Restricciones físicas de la cuchara de la retroexcavadora.

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024

3.8.5. Fuerzas aplicadas en la cuchara de la retroexcavadora.

El movimiento que es producido por el cilindro hidráulico sobre la cuchara de la retroexcavadora produce una fuerza de 2140 kg que viene a ser la fuerza de excavación de la cuchara este dato se puede encontrar en el manual de la máquina. (Komatsu, 1994)

A: Static Structural

Force
Time: 1, s
12/6/2024 13:04

Force: 20972 N
Components: 0,0,20972 N

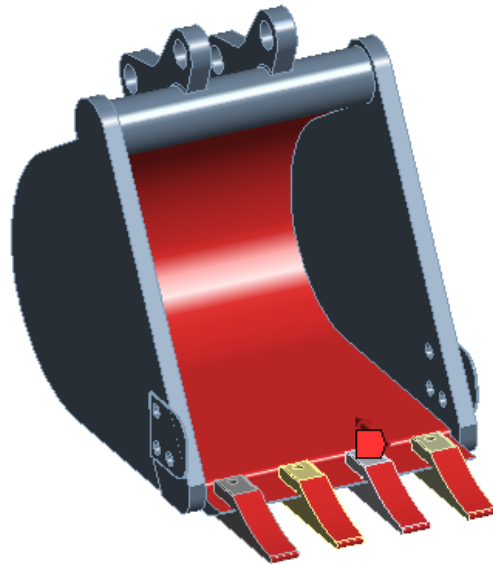


Ilustración 3-42: Fuerza de excavación

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024

3.8.6. Estudios relevantes para la cuchara de la retroexcavadora hidráulica.

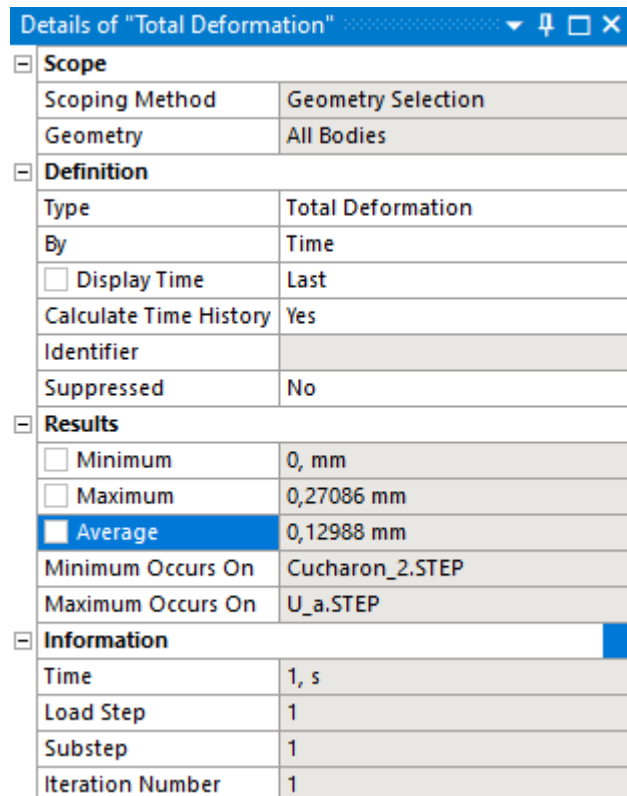
La operación cíclica del cucharón de una excavadora hidráulica, al entrar en contacto con el suelo, genera una deformación que varía según el tipo de suelo y la fuerza aplicada por el cilindro neumático. Esta deformación debe ser considerada en relación con la resistencia estructural del cucharón para evitar fracturas. La geometría del cucharón influye significativamente en cómo esta deformación afecta su resistencia, ya que determina las áreas donde se concentran los esfuerzos y donde la fractura es más probable.

Además, el contacto repetido del cucharón con el suelo genera esfuerzos alternantes que pueden debilitar el material con el tiempo, lo que afecta la vida útil del cucharón y los ciclos máximos de trabajo que puede soportar. Tanto el material utilizado como el diseño del cucharón son cruciales para su confiabilidad, lo que garantiza que cumplirá con su función sin comprometer la seguridad.

Para evaluar los aspectos mencionados anteriormente, se requiere llevar a cabo un análisis utilizando métodos de elementos finitos a través del software ANSYS. Estos análisis ayudarán a comprender mejor la resistencia estructural de la cuchara de la excavadora hidráulica y a garantizar su confiabilidad y seguridad en su funcionamiento.

3.8.7. Análisis de deformación mediante software CAE.

El análisis que se llevará a cabo de la evaluación de la magnitud de la deformación generada por las fuerzas aplicadas y los soportes fijos en el cucharón de la maquinaria minera. Se dará especial atención a la selección previa del material para el cucharón, en este caso, el acero AISI-1045 estirado en frío y el acero AISI-4340 normalizado, el cual fue previamente incorporado al programa ANSYS ya que no estaba disponible en su biblioteca estándar.



Details of "Total Deformation"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Total Deformation
By	Time
<input type="checkbox"/> Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	0, mm
<input type="checkbox"/> Maximum	0,27086 mm
<input checked="" type="checkbox"/> Average	0,12988 mm
Minimum Occurs On	Cucharon_2.STEP
Maximum Occurs On	U_a.STEP
Information	
Time	1, s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

Ilustración 3-43: Detalles del análisis de deformación en ANSYS

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024

3.8.8. Esfuerzo de Von Mises.

Demuestra el punto en el cual la cuchara de la excavadora alcanza su máxima resistencia a la tensión antes de que el material comience a ceder debido a la fuerza aplicada.

Details of "Equivalent Stress"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time
<input type="checkbox"/> Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	8,1732e-004 MPa
<input type="checkbox"/> Maximum	218,43 MPa
<input type="checkbox"/> Average	3,239 MPa
Minimum Occurs On	U_a.STEP
Maximum Occurs On	Cucharon_2.STEP
Information	
Time	1, s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

Ilustración 3-44: Detalles del análisis de esfuerzos en ANSYS

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024

3.8.9. Factor de seguridad.

El análisis que determinará el factor de seguridad de la cuchara de la excavadora es lo que permitirá verificar su confiabilidad en el desempeño de su trabajo.

Details of "Safety Factor"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Safety Factor
By	Time
<input type="checkbox"/> Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	2,4264
Minimum Occurs On	Cucharon_2.STEP
Information	

Ilustración 3-45: Detalles del análisis del factor de seguridad en ANSYS

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024

3.9. Análisis por el método de elementos discretos (DEM)

Utilizando la ayuda de un software CAE, se pudo realizar el análisis de elementos discretos para la pieza que fue diseñada previamente. El análisis tiene como objetivo comparar los resultados del método de elementos discretos (DEM) con el método de elementos finitos (MEF) que se realizó previamente con el programa ANSY, con la finalidad de generar una evaluación completa del diseño de la pieza en cuestión y priorizando la utilidad significativa, las funcionalidades mediante el método de elementos discretos.

El análisis que se llevara a cabo se utilizara un programa CAE que pueda trabajar con el método de elementos discretos, se pueda crear partículas que simulen el material necesario para la interacción con la pieza diseñada anteriormente que es la cuchara de un retroexcavadora Komatsu. El tipo de archivo que se necesitara para la simulación variara según el software, en este caso es necesario trabajar con un archivo STL el cual previamente ya se lo exporto desde el software en el que se diseñó la pieza el cual es SolidWorks.

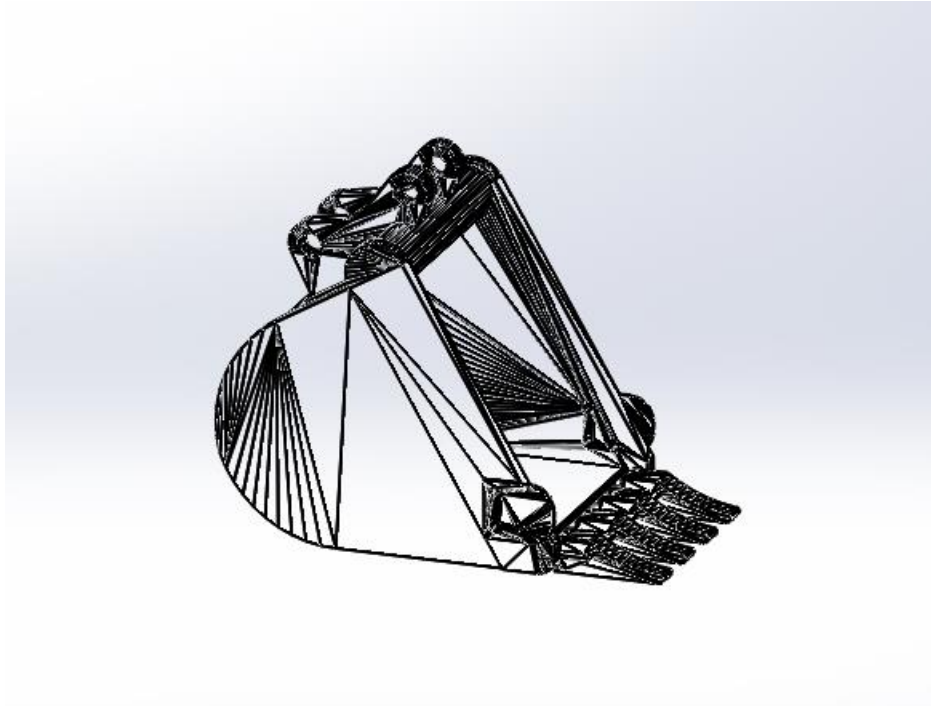


Ilustración 3-46: Pieza exportada en archivo STL- Cuchara Komatsu

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.9.1. Configuración del material para su respectivo análisis en el software CAE

La configuración del material se realizó en base a la necesidad de la simulación, se escogió para las partículas que van a interactuar con la cuchara, un material que simule la tierra y el de la pieza diseñada.

Material	
Name:	Tierra
Use Bulk Density	<input type="checkbox"/>
Density:	1540 kg/m3
Bulk Density:	924 kg/m3
Young's Modulus:	200 MPa
Thermal Conductivity:	0,1 W/m.K
Specific Heat:	1000 J/kg.K
Poisson's ratio:	0,4 -

Ilustración 3-47: Configuración del material - Partículas

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

Material	
Name:	Cuchara
Use Bulk Density	<input type="checkbox"/>
Density:	7850 kg/m3
Bulk Density:	4710 kg/m3
Young's Modulus:	2,05e+11 N/m2
Thermal Conductivity:	0,1 W/m.K
Specific Heat:	1000 J/kg.K
Poisson's ratio:	0,32 -

Ilustración 3-48: Configuración del material - Cuchara

Fuente: Martínez. B & Lemache.J, 2024.

3.9.2. *Parámetros del mallado*

Para determinar el mallado adecuado primero se debe determinar el tamaño del elemento, de acuerdo con las dimensiones se escogió un mallado de 0,1 m el cual se obtuvo resultados aceptables. En la ilustración 3-34, se puede observar las propiedades y configuraciones ingresadas del mallado en el software CAE.

Name:	Cucharon_Uñas
	Load File
Motion Frame	Cuchara_Mov
Material	Cuchara
Enable Time:	0 s
Disable Time:	1e+06 s
Geometry Mass Wear Replication	
Triangle Size:	0,1 m
Offset	
Horizontal:	2 m
Vertical:	1.5 m
Out-of-Plane:	0 m

Ilustración 3-49: Propiedades de la malla

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.9.3. *Movimiento de traslación aplicado para la cuchara*

Se realizara un estudio de traslación para que así puedan interactuar de un manera correcta la cuchara con las particulas de tierra en la simulación. En la siguiente ilustracion 3-35 se indica la configuracion del movimiento de la cuchara.

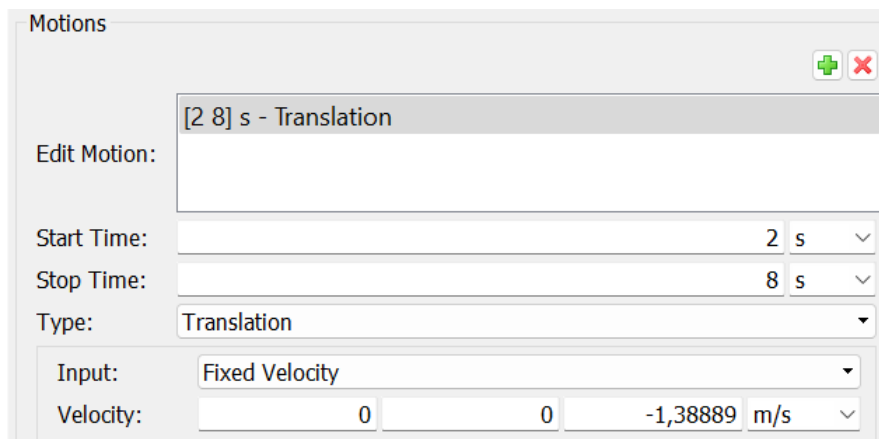


Ilustración 3-50: Datos de traslación - Cuchara

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.9.4. Estudios relevantes para la cuchara mediante el método de elementos discretos (DEM)

La operación que realiza la cuchara mediante todo el conjunto de la retroexcavadora hidráulica al entrar en contacto una superficie genera una deformación que varía según el tipo de suelo. Esta deformación se relaciona con la resistencia estructural de la cuchara para evitar fracturas. La geometría de la cuchara influye significativamente en como la deformación afecta su resistencia, ya que se determina las áreas donde se concentran los esfuerzos y lugares donde pueda existir fracturas más probables.

Para evaluar los elementos mencionados anteriormente, se llevará a cabo un análisis utilizando el método de elementos discretos (DEM) a través de un software CAE. Este análisis ayudara a comprender mejor la resistencia estructural de la cuchara de la retroexcavadora hidráulica.

3.9.5. Análisis de deformación mediante software CAE

El análisis que se llevara a cabo para evaluar la magnitud de la deformación generada por la interacción de la pieza previamente diseñada, con el material de tierra. En este caso tenemos como el estudio echo previamente el material ya fue seleccionado para la cuchara y el suelo como se observará en la siguiente ilustración.

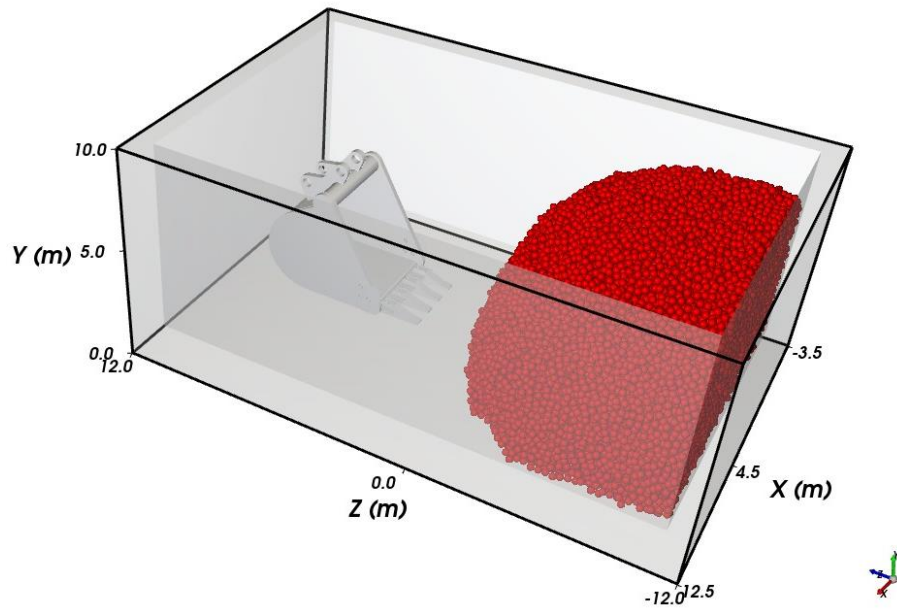


Ilustración 3-51: Conjunto Cuchara - Suelo

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

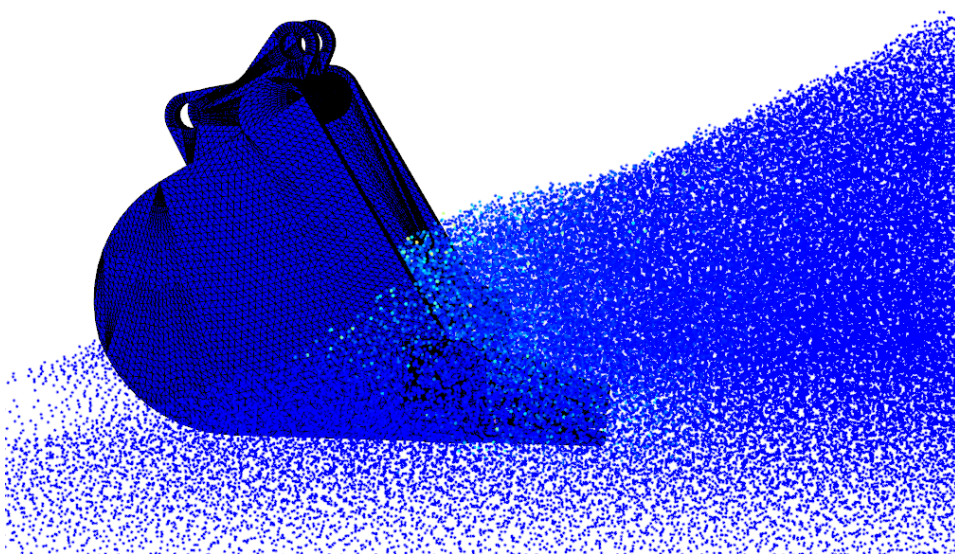


Ilustración 3-52: Contacto Cuchara - Suelo

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.9.6. *Esfuerzo de Von Mises (DEM).*

En este apartado se observará los puntos en el cual la cuchara de la retroexcavadora alcanza su máxima resistencia a la tensión con la interacción al suelo. Si se puede observar en el histograma en la siguiente ilustración.

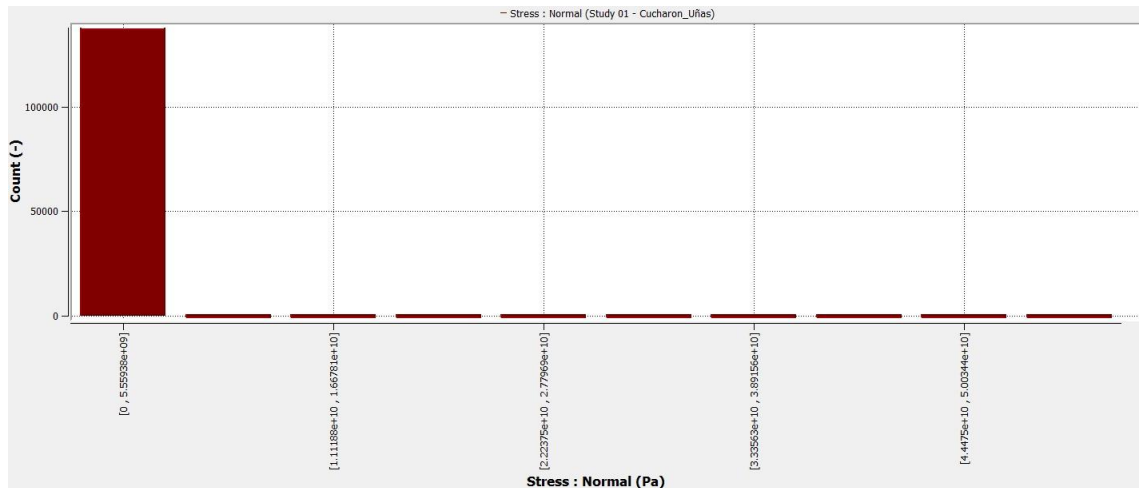


Ilustración 3-53: Histograma de esfuerzo software CAE (DEM)

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

3.9.7. *Análisis de la deformación de la cuchara*

Aquí podremos observar los niveles a los que llega la deformación de la cuchara cuando hace contacto con las partículas de tierra.

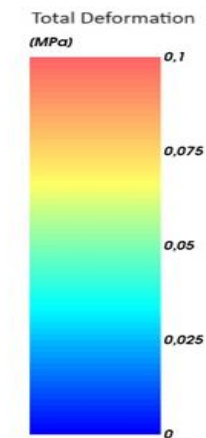


Ilustración 3-54: Niveles-deformación total.

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024

3.9.8. *Análisis de la tensión tangencial.*

Podemos observar los niveles a los que llega y como las partículas de tierra afectan a la cuchara de una manera tangencial cuando empieza arrastrar el material del suelo.

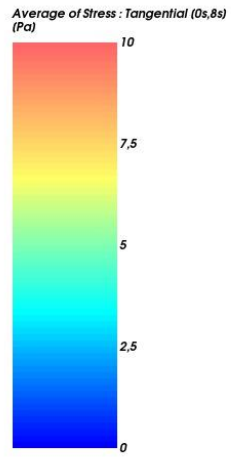


Ilustración 3-55: Niveles-deformación tangencial.

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024

CAPÍTULO IV

4. CUADRO ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Mediante las pruebas realizadas anteriormente y tomando en cuenta los procesos en la metodología, se obtuvo los siguientes resultados tanto del material de la cuchara como de los análisis mediante un software CAE dando una correlación y análisis para la interpretación de los resultados entre el método de elementos finitos (MEF) y el método de elementos discretos (DEM).

4.1. Análisis de resultados de la simulación MEF.

4.1.1. Deformación en la cuchara de la retroexcavadora hidráulica Komatsu

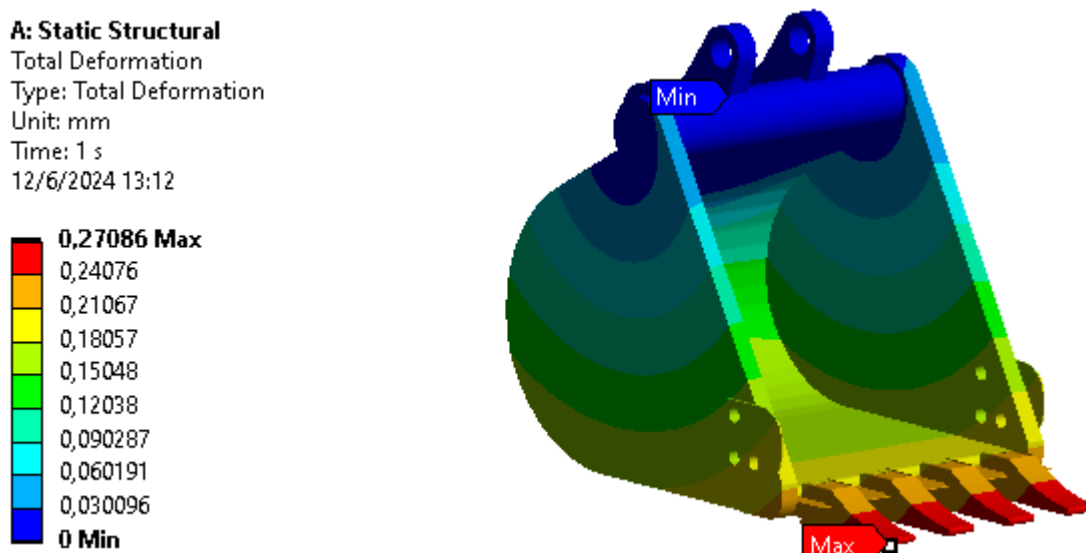


Ilustración 4-1: Deformación total de la cuchara

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024

Mediante los soportes fijos colocados y la fuerza ejercida en la cuchara se producirá una deformación en todo el elemento.

El resultado del estudio de la deformación total de la cuchara se puede apreciar previamente en la ilustración 4-36, que nos dio un resultado de 0,07 mm el cual se puede evidenciar en la parte de color rojo, la deformación tan bien se puede observar como “Max”, de igual manera como “Min” se tiene que la deformación es 0 mm, este resultado de la deformación total es el esperada debido a que la deformación máxima se puede localizar en el extremo más alejado de los soportes fijos.

4.1.2. Tensión de Von Mises en la cuchara de la retroexcavadora hidráulica Komatsu

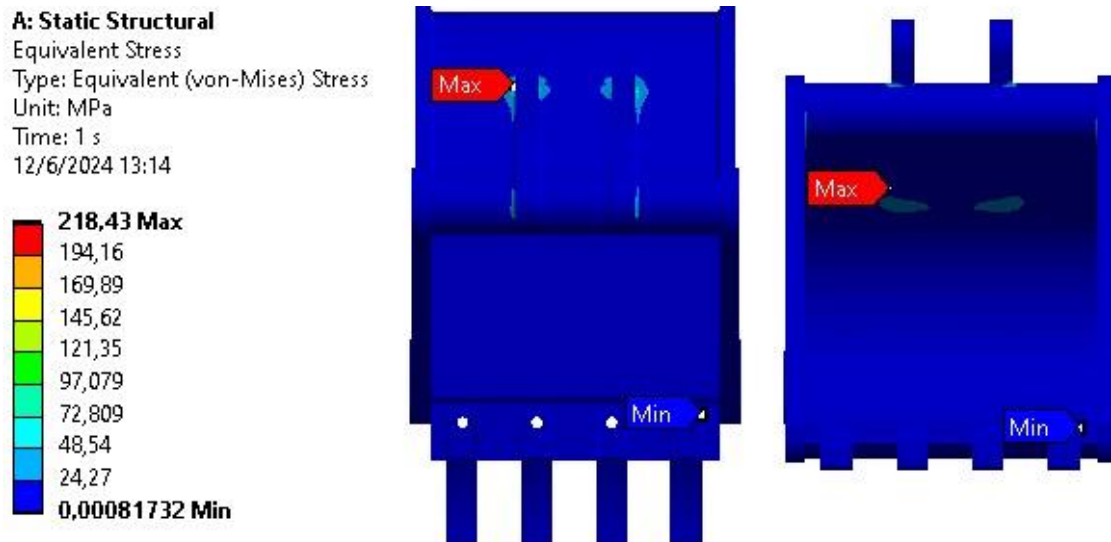


Ilustración 4-2: Tensión de Von Mises de la cuchara

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024

La cuchara de la retroexcavadora que se encuentra unida al brazo se toma como un elemento estático con referencia al acople con el brazo, por lo tanto, es necesario saber si ocurrirá algún fallo elástico. Como resultado del estudio realizado y que se tiene una energía de distorsión elástica con un máximo de 74,777 MPa y un mínimo de $1,7413 \times 10^{-6}$ MPa. Analizando el resultado de la simulación podemos observar la ubicación del esfuerzo máximo en la parte superior de la cuchara donde se unen los protectores laterales y el protector trasero de la cuchara de la retroexcavadora.

4.1.3. Factor de seguridad en la cuchara de la retroexcavadora



Ilustración 4-3: Factor de seguridad de la cuchara

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

Del análisis realizado a la cuchara de la retroexcavadora Komatsu se obtuvo como resultado de la simulación el factor de seguridad mínimo de 3.3433, el cual nos brinda seguridad y confianza para realizar trabajos de minería con cucharas del material asignado. Ya que el factor de seguridad nos indica que dicho elemento es capaz de soportar las cargas esperadas con un margen de seguridad.

4.2. Análisis de resultados de la simulación DEM.

4.2.1. Colisión entre la cuchara de la retroexcavadora y partículas de tierra.

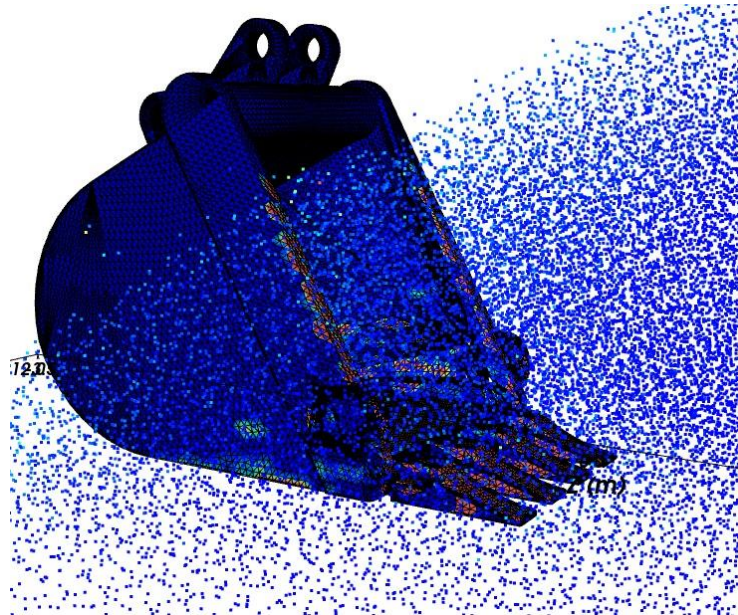


Ilustración 4-4: Colisión de partículas

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

En el resultado del análisis se puede observar la colisión entre las partículas de tierra y la cuchara de la retroexcavadora Komatsu, esto nos permite observar cómo trabaja esta estructura desde un punto más amplio con la ayuda de un software CAE, como se puede observar en la ilustración 4-69.

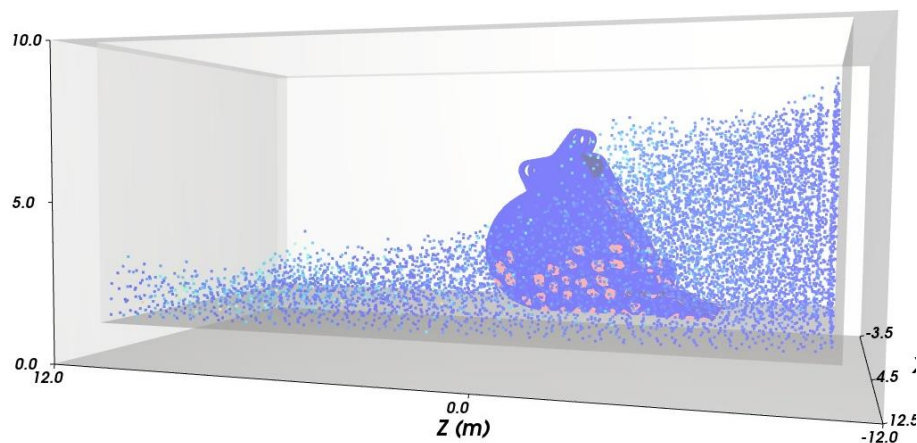


Ilustración 4-5: Conjunto de la simulación DEM

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

En el proceso para crear la simulación, a partir de un software CAE se diseñó la estructura en la cual se realizará el análisis, de igual manera se creó un depósito que simule un hueco en el suelo de tierra, con el fin de poder crear y utilizar las partículas de tierra necesarias para la simulación, con todos estos apartados realizados se pudo completar la simulación mediante el método de elementos discretos (DEM), como se puede observar en la ilustración 4-70.

4.2.2. *Tensión de Von Mises en la cuchara de la retroexcavadora hidráulica Komatsu*

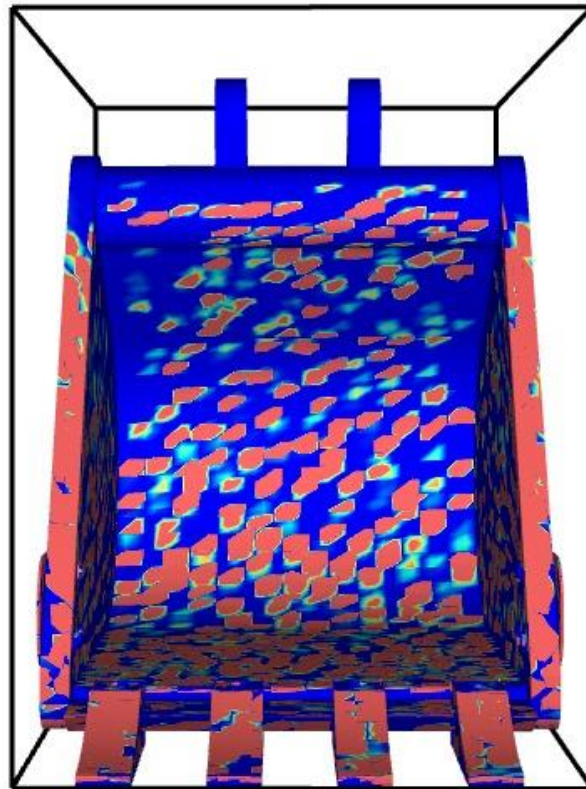


Ilustración 4-6: Tensión de Von Mises-Vista frontal

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

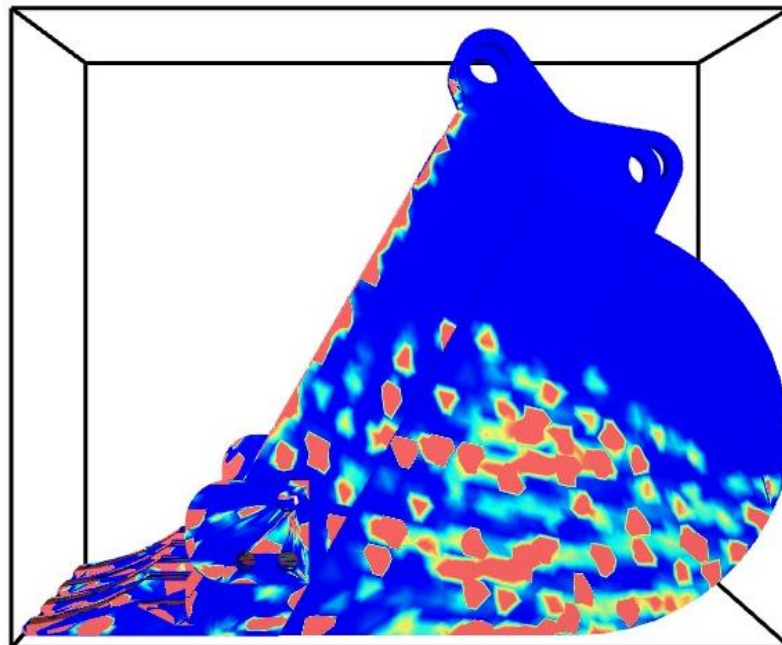


Ilustración 4-7: Tensión de Von Mises-Vista lateral

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

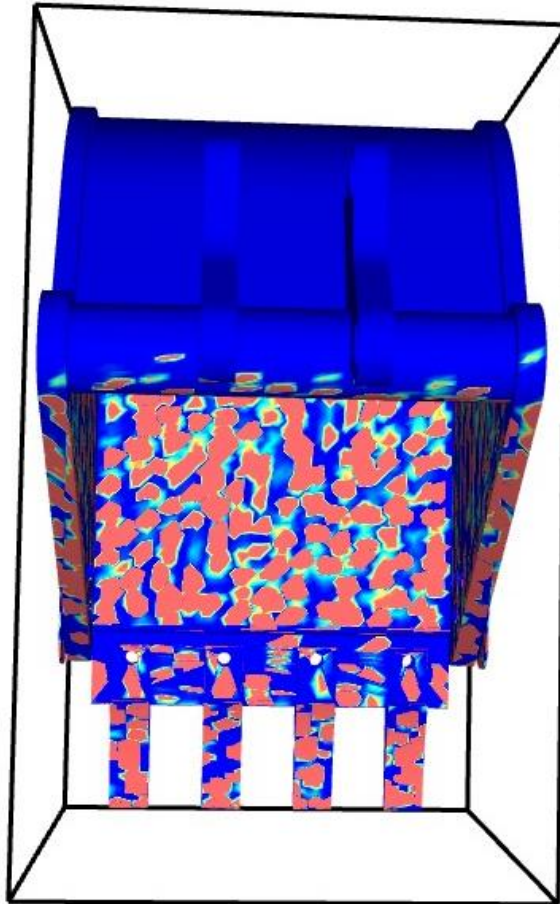


Ilustración 4-8: Tensión de Von Mises-Vista superior

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

4.2.3. Deformación Total de la cuchara.

La deformación de la cuchara debido a la interacción con las partículas de tierra nos indico los siguientes resultados con un valor máximo de 0,1 mm

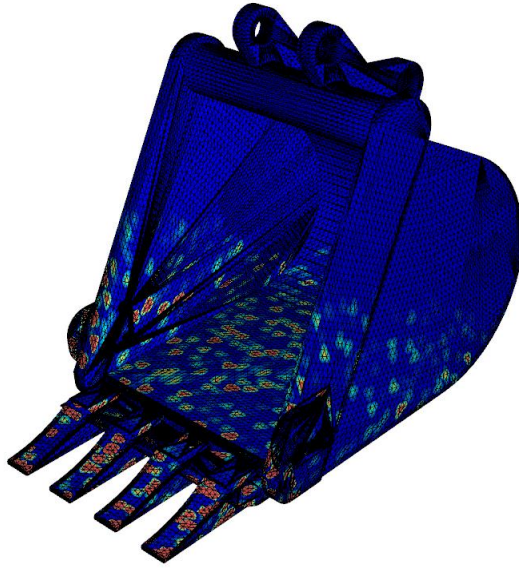


Ilustración 4-9: Deformación total- vista isométrica.

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

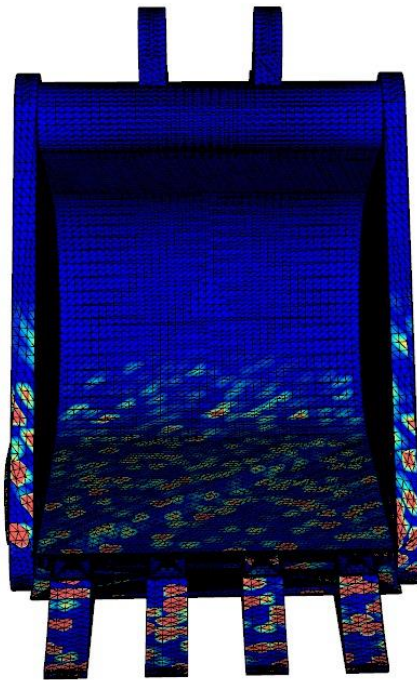


Ilustración 4-10: Deformación total- vista frontal.

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

4.2.4. *Tensión tangencial de la cuchara.*

Este momento ocurre cuando la cuchara realiza el trabajo de excavación y como las partículas de tierra afectan directamente al arrastre de la cuchara.

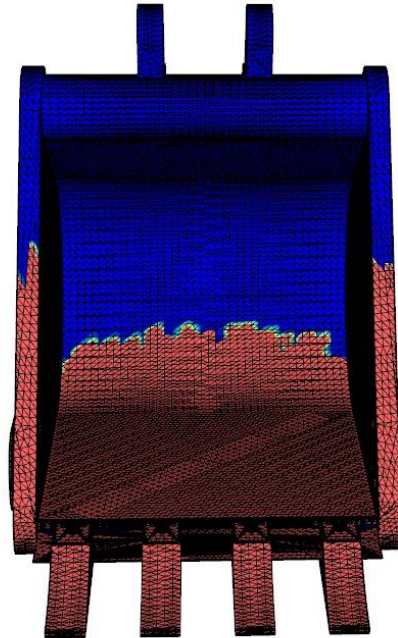


Ilustración 4-11: Tensión tangencial- vista frontal.

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

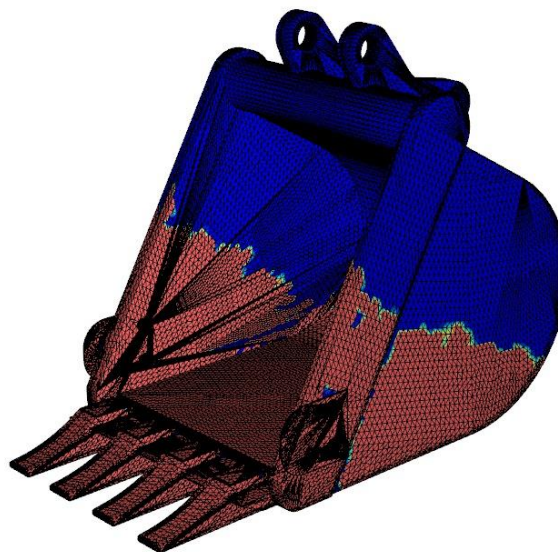


Ilustración 4-12: Tensión tangencial- vista frontal.

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

Reconociendo los puntos más críticos en donde será afectado el material de la cuchara, con estos datos de la simulación se puede realizar un mantenimiento preventivo en los lugares más afectados de acuerdo con el estudio realizado y así evitar un posible paro de maquinaria por daños excesivamente ocasionados por falta de mantenimiento.

4.2.5. Comparación entre la simulación MEF y DEM

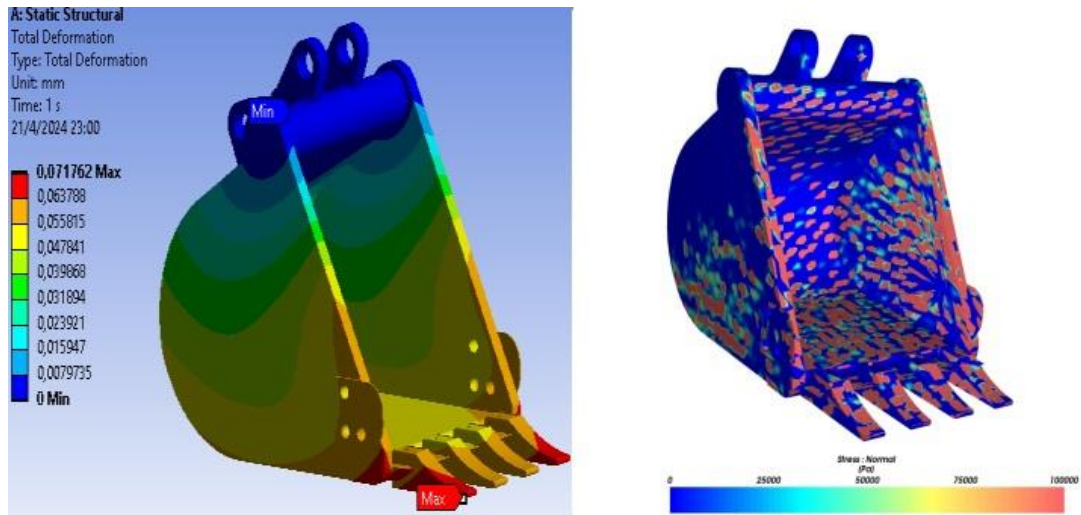


Ilustración 4-13: Simulación MEF y DEM

Fuente: Lemache J. & Martínez B, 2024.

Se puede identificar en la ilustración 4-74 la simulación de los dos tipos de métodos utilizados el MEF y el DEM, el cual nos indica el proceso de como realiza el análisis cada método y software CAE. En el primer análisis se puede evidenciar que se está utilizando el método de elementos finitos (MEF) y como de la fuerza aplicada a la cuchara en un análisis estático se distribuye de manera continua a través de toda la estructura. De igual manera se puede evidenciar como es el proceso en un software que trabaja con el método de elementos discretos (DEM), que las partículas creadas se distribuyen de uniformemente por toda le estructura con el detalle que nos facilita identificar los puntos más críticos de la deformación en la cuchara de la retroexcavadora Komatsu, como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 4-1: Comparación de resultados de deformación

DEM	MEF
Deformación	Deformación
0,1 (mm)	0,2 (mm)

Realizado por: Lemache J. & Martínez B, 2024

CAPÍTULO V

5. MARCO PROPOSITIVO

5.1. Propuesta

En el área de la fabricación de las cucharas para trabajos de minería, es decisivo comprender las afectaciones que sufren estas estructuras al contacto con diferentes tipos de superficies y contratiempos de una mala operación de la maquinaria. Con el objetivo de plantear esta problemática, se propone llevar a cabo un estudio detallado que permita analizar y comprender de manera exhaustiva los efectos de las fuerzas que son aplicadas al momento en que la cuchara interactúa con una superficie, de igual manera explorar métodos para identificar de manera preventiva los puntos más críticos en la cuchara de una retroexcavadora hidráulica.

Los trabajos de investigación a futuro se enfocarán en indagar estrategias que ayuden a profundizar de una mejor manera, los fundamentos teóricos y los principios básicos del método de elementos discretos (DEM). Se comprenderá sus ventajas y desventajas, considerando también el método de elementos finitos (MEF) para el estudio de las cucharas de una retroexcavadora hidráulica.

Un aspecto fundamental del estudio será como es afectada la cuchara de una retroexcavadora hidráulica y cuáles son los puntos más críticos en dicha estructura al momento de realizar su trabajo de campo. Se utilizará varios métodos de estudio, como el método de elementos finitos (MEF) y el método de elementos discretos DEM, con la ayuda de un software CAE que utilicen uno de estos estudios para la simulación correspondiente a la deformación de la cuchara y las fuerzas ejercidas del elemento.

El estudio también tiene como objetivo comparar e interpretar los resultados obtenidos, de los métodos utilizados en la simulación, así como el método de elementos finitos y el método de elementos discretos. Cada uno realiza un análisis de exhaustivo de acuerdo con los parámetros establecidos en el software CAE, por lo que se debe tener un conocimiento detallado del manejo del software que utilice uno de los dos métodos.

El trabajo realizado con la ayuda de las simulaciones y los resultados obtenidos nos permitirá emplear técnicas de mantenimiento preventivo, ya que se podrá identificar los puntos más críticos de deformación en la cuchara de un retroexcavadora hidráulica.

CONCLUSIONES

La búsqueda de referencias bibliográficas relacionadas con el estudio de la deformación en la cuchara de una retroexcavadora hidráulica, aplicando el método de elementos discretos (DEM) ha proporcionado una base sólida para comprender el principio teórico de este sistema que utiliza las diferentes superficies en forma de partículas, que interactúan con la estructura ya mencionada previamente.

El modelado del elemento seleccionado para el análisis se lo pudo lograr utilizando un software CAE en este caso llamado SolidWorks. La pieza se diseñó de acuerdo con la ficha técnica obtenida de la retroexcavadora hidráulica Komatsu, de igual manera con la ayuda de instrumentos de medición se obtuvo datos del elemento que se utilizara, con todos estos parámetros aplicados se pudo obtener una estructura en 3D que cumpla con los requisitos para la simulación respectiva.

Se realizó ambas simulaciones utilizando un software que pueden trabajar aplicando tanto el método MEF como DEM. En este caso se utilizó dos programas uno para cada método dándonos como resultado una simulación que cumpla con el objetivo de la investigación de la deformación que sufre la cuchara de una retroexcavadora hidráulica al momento de ser operada en trabajos de minería.

Con el objetivo de comparar los dos métodos utilizados, de acuerdo con los datos obtenidos de las dos simulaciones, se ha utilizado para ambos casos un acero AISI-1045 como material seleccionado para la cuchara de la retroexcavadora hidráulica. En el método convencional (MEF) se utilizó datos de la ficha técnica, como la fuerza de excavación en kg. De igual manera en el método planeado (DEM), para el segundo análisis se utilizó dos materiales el de la cuchara que es el mismo acero del primer método y el segundo material utilizado fue la superficie de tierra. Con estos parámetros y los resultados obtenidos de ambos métodos nos permitió comprender como trabajan los dos métodos, se observó minuciosamente que el método MEF al momento de realizar la simulación, los datos que nos entrega y se visualiza son aceptables dependiendo la necesidad del caso de estudio. El método DEM nos permite realizar un estudio dinámico más allegado a la realidad ya que el software que se utilizó nos permite observar a través de la simulación y los datos obtenidos como interactúa la cuchara de la retroexcavadora hidráulica con las partículas de tierra al momento de realizar su trabajo de minería.

Los resultados obtenidos de la simulación mediante el método MEF y DEM nos permite determinar hasta qué punto los modelos computacionales pueden replicar condiciones de trabajo reales y predecir el comportamiento de los elementos que interactuaran entre si visualizando los puntos más críticos en cuanto a deformaciones de la estructura. Al momento de comparar los dos métodos, mediante los resultados obtenidos de la simulación se ha llegado a una conclusión que el método de elementos finitos (MEF) y el método de elementos discretos (DEM) tienen diferentes enfoques. El método de elementos finitos se utiliza principalmente para resolver problemas estructurales sólidos y continuos, es ampliamente utilizado en las industrias como la aeroespacial, automotriz, civil. En cuanto al método de elementos discretos se centra más en el comportamiento de un sistema de partículas, para simular materiales granulares como suelos, polvos, se utiliza en industrias como la minería, farmacéutica, agricultura. Como conclusión de la comparación de los dos métodos, no se podría decir cuál de los dos métodos es apropiado para el análisis de la deformación de la cuchara de una retroexcavadora hidráulica, ya que dependerá del tipo de problema que se esté abordando. Y los dos métodos nos entregaron resultados ingenieriles aceptables.

RECOMENDACIONES

Se recomienda considerar nuevas referencias bibliográficas, para tener una revisión periódica de la literatura, ya que se pueda considerar esencial para estructurar de una manera adecuada el marco teórico del proyecto de investigación y garantizar que la habilidad educativa este informada por las ultimas participaciones académicas relevantes.

Con la finalidad de tener un modelo 3D que cumpla con los parámetros necesarios para la simulación, se debe utilizar un software en el cual se tenga un conocimiento más avanzado a la hora de diseñar cualquier elemento mecánico en este caso se utilizó el software llamado SolidWorks.

Para lograr maximizar el impacto que debe tener el proyecto es necesario impartir mayor conocimiento sobre el uso del método de elementos discretos (DEM), que se lo puede lograr a través de cursos especializados, pueden ser particulares o implementarse en la malla curricular de carreras afines, asociadas con el diseño asistido por computadora. Ya que uno de los métodos más estudiados en las diferentes entidades educativas es el método de elementos finitos (MEF).

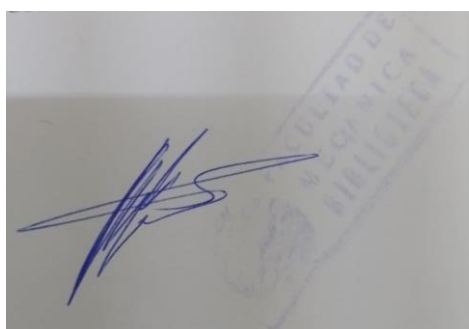
Se recomienda realizar varias simulaciones de los dos métodos para garantizar la confiabilidad de los datos, así como utilizando parámetros importantes como lo son datos de fuerza de trabajo que se pueden encontrar en la ficha técnica de la maquinaria o en documento que tengan un estudio similar, de igual manera utilizar el material apropiado y la configuración de sus características.

Se recomienda realizar investigaciones más profundas sobre el uso del método de elementos discretos (DEM), con el fin de tener mayor conocimiento y las ventajas que nos ofrece en las diferentes áreas especialmente en la ingeniería automotriz. Ya que los resultados obtenidos de los dos métodos son satisfactorios y el método de elementos discretos es una buena opción para resolver los diferentes problemas en dicha área, y nos ayuda a comprender mejor como trabaja en el área de minería este elemento al momento de realizar una excavación o remover material de un lugar en específico.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 **BABU, Sekhar, & VENU Y.** Optimización del diseño del cucharón de excavadora mediante el método de elementos finitos. *Revista Internacional de Investigación e Innovación*, [En línea]. [Consulta: 2024-01-07]. Disponible en: https://www.academia.edu/15207920/Design_optimization_of_excavator_bucket_using_Finite_Element_Method
- 2 **BRAJA M., Das.** *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. [En línea] 4ª edición. México, Cengage Learning, 2013. [Consulta: 2024-02-18]. Disponible en: https://www.academia.edu/37854899/Fundamentos_de_Ingenieria_Geotecnica_Braja_M_Das
- 3 **COLOMA, Saúl.** Simulación de recuperación por método de elemento finito de cucharones para maquinaria de minería. [En línea]. (Trabajo de titulación) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2017. [Consulta: 2024-01-25]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6993>
- 4 **GOVINDA, B. & VENU, P.** Análisis estructural de cucharón de excavadora con diferentes modificaciones de diseño. *Ijmetmr.com*. [En línea], 2018, Vol. 5 (2). [Consulta: 2024-03-05], Disponible en: <http://www.ijmetmr.com/olfebruary2018/BGovindaReddy-PVenuBabu-16.pdf>
- 5 **HENRIKSSON Felix & MINTA Joanna.** *Bucket-soil interaction for wheel loaders*. [En línea]. 2016. [Consulta: 2024-01-07]. Disponible en: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:935535/FULLTEXT01.pdf>
- 6 **MORALES, M.** Formulación de elementos finitos y elementos discretos. [En línea]. Centro de investigación en Matemáticas. 2013. [Consulta: 2021-01-23]. Disponible en: https://cimat.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1008/468/1/TE_1523.pdf
- 7 **PESADAS, M.** Material: Partes de un Cucharón de Excavadora y Retroexcavadora. *Maquinaria Pesada*. [En línea]. 2015. Disponible en: <https://www.maquinariaspesasdas.org/blog/1714-material-partes-cucharon-excavadora-retroexcavadora>

- 8 **QUINCATCOMPANY.** Consejos de seguridad para la retroexcavadora - cómo manejar una retroexcavadora. *Quincatcompany*. [En línea]. 2020. [Consulta: 2024-01-07] Disponible en: <https://www.quinncompany.com/es/backhoe-loader-safety-tips-how-to-operate-a-backhoe/>
- 9 **REHMAN, A.** Uso de la teoría de la similitud y el modelado de elementos discretos para comprender los efectos de los parámetros de excavación en los examinadores del rendimiento de la excavación para el rendimiento del caucho para cargadores y cargadores de neumáticos de caucho. [En línea], Missouri University of Science and Technology. Estados Unidos, 2021. [Consulta: 2024-01-07]. Disponible en: https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4026&context=doctoral_dissertations
- 10 **SASTRA, R.** Optimization of bucket tooth excavator design using topology optimization and finite element method. *Journal of physics. Conference series*, Vol. 1858 (1), 2021. [En línea]. [Consulta: 2024-03-04]. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1858/1/012081>
- 11 **SURYO, S; et al.** Simulation of excavator bucket pressuring through finite element method. [En línea] *Civil Engineering Journal*, Vol. 4 (3), pp. 478. 2018. [Consulta: 2024-02-13] Disponible en: <https://doi.org/10.28991/cej-0309107>
- 12 **TASEVSKI, Alexander & HEDLUND, Cristine.** Diseño de dientes de cuchara. [En línea] 2016. [Consulta: 2023-12-12], Disponible en: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962999/FULLTEXT02>
- 13 **WANG, Y; et al.** Optimization of excavator bucket structure by a coupled simulation method. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, [En línea], Vol.13 (20), 2023. [Consulta: 2024-01-07] Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app132011336>
- 14 **WOODS, C.** Guía rápida: Selección de la retroexcavadora adecuada. *Booandbucket*. [En línea]. 2024. [Consulta: 2024-01-07]. Disponible en: <https://www.boomandbucket.com/es/blog/quick-guide-selecting-the-right-backhoe-attachment>



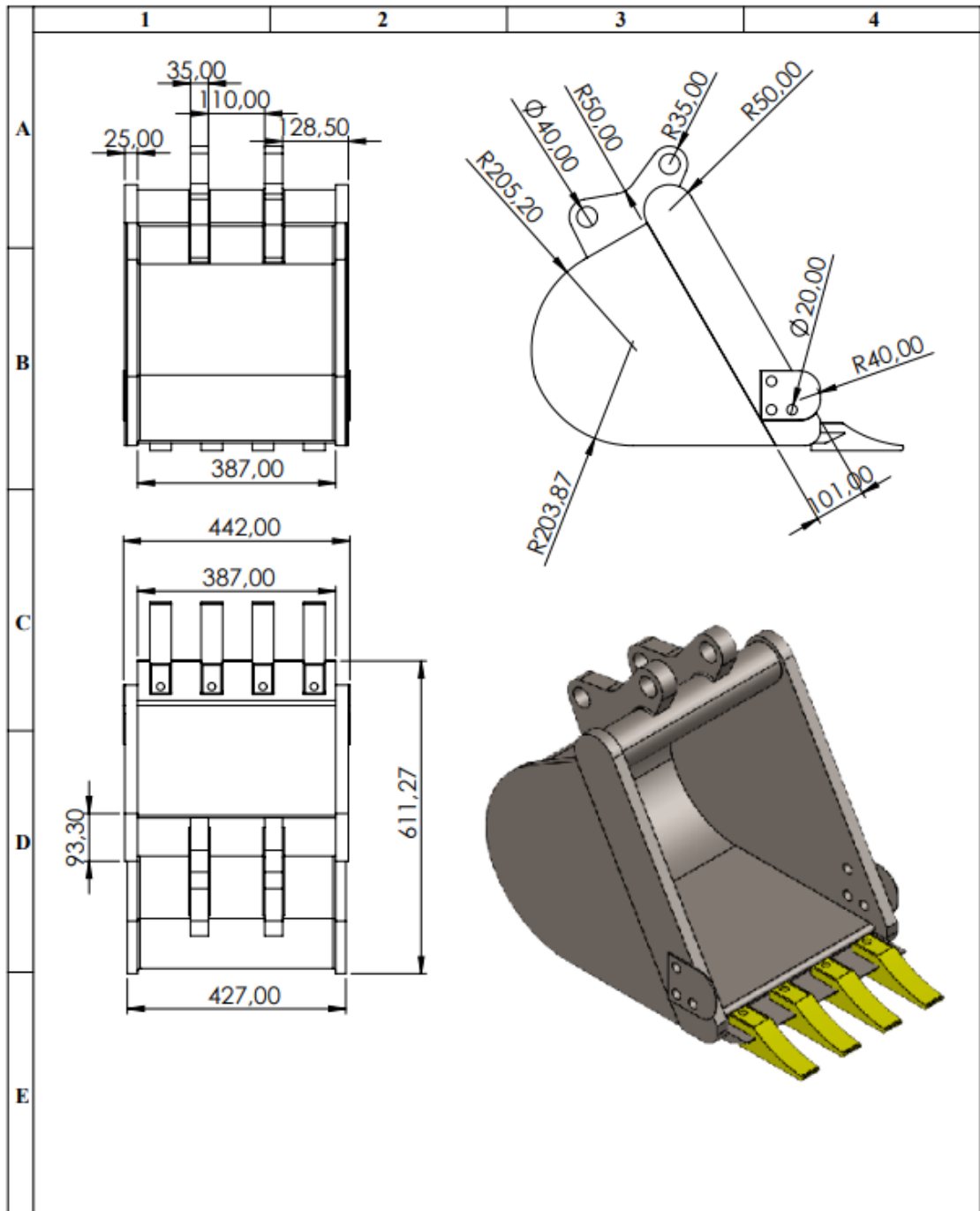
Total 14 referencias bibliográficas



ANEXOS

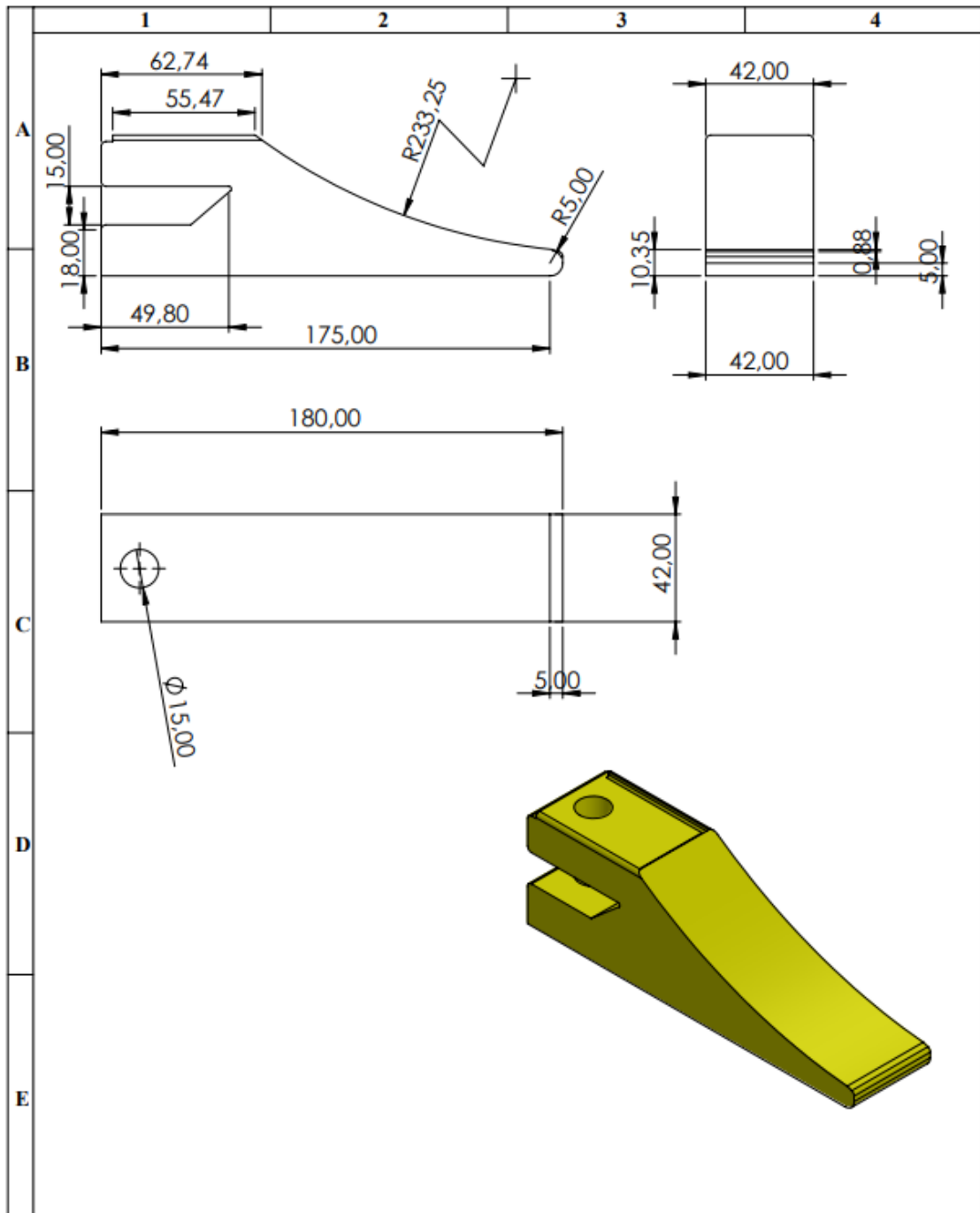
ANEXO A: DIMENSIONES OBTENIDAS DEL ELEMENTO



ANEXO B: PLANOS OBTENIDOS DEL DISEÑO DE LA CUCHARA

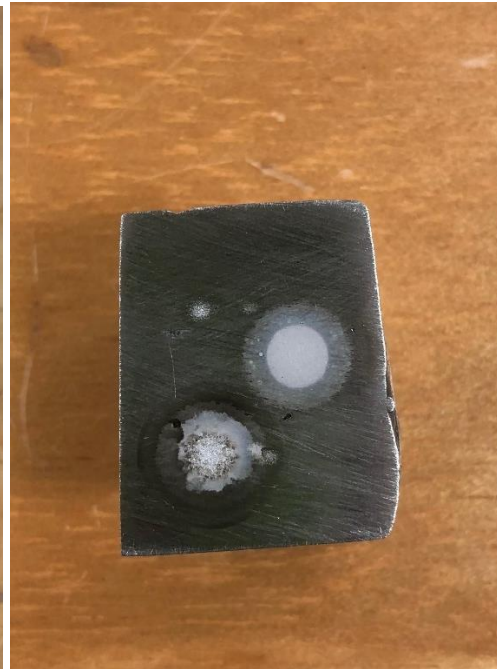


N° Lámina: 1 de 2		N° Hojas: 2		Denominación:		ESPOCH			
Teléfonos: 0992756917 0969600546				VISTAS DE LA CUCHARA DE UNA RETROEXCAVADORA KOMATSU		CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ			
Datos	Nombre:	Firma:	Fecha:			Peso (Kg)	Tolerancia	ESCALA	Registro
Proyectó	LEMACHE-MARTÍNEZ		Nov/19/23			185.71		1:10	
Dibujó	LEMACHE-MARTÍNEZ		Dic/10/23						
Revisó	Ing. Miguel Aquino		Ene/12/24						
Aprovó	Ing. Edwin Pazo		Feb/17/2024	Materiales:					
				AISI-1045, AISI-4340		 			

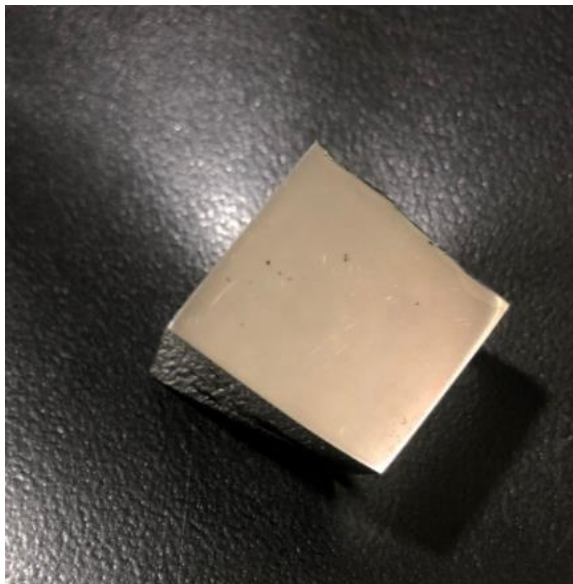


N° Lámina: 1 de 2		N° Hojas: 2		Denominación:		ESPOCH			
Teléfonos: 0992756917 0909600546				VISTAS, UÑA DE LA CUCHARA DE UNA RETROEXCAVADORA KOMATSU		CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ			
Datos	Nombre:	Firma:	Fecha:			Peso (Kg)	Tolerancia	ESCALA	Registro
Proyectó	LEMACHE- MARTÍNEZ		Nov/19/23	Materiales: AISI-1045, AISI-4340		185.71		1:10	
Dibujó	LEMACHE- MARTÍNEZ		Dic/10/23						
Revisó	Ing. Miguel Aquino		Ene/12/24			Grupo Ingeniería Automotriz			
Aprovó	Ing. Edwin Pozo		Feb/17/2024						

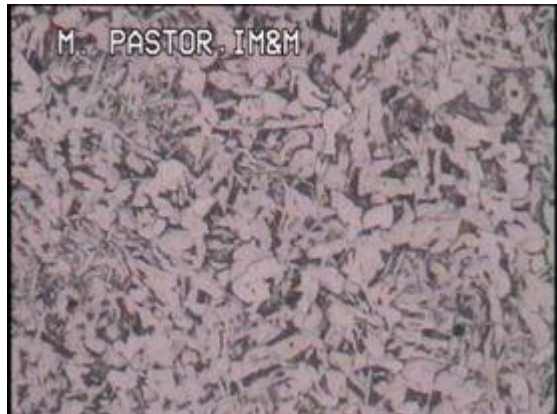
ANEXO C: OBTENCIÓN DE PROBETAS



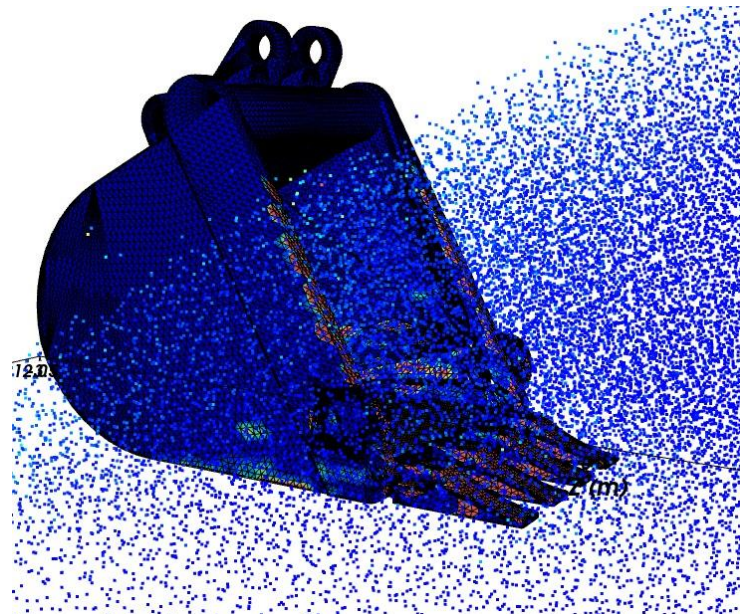
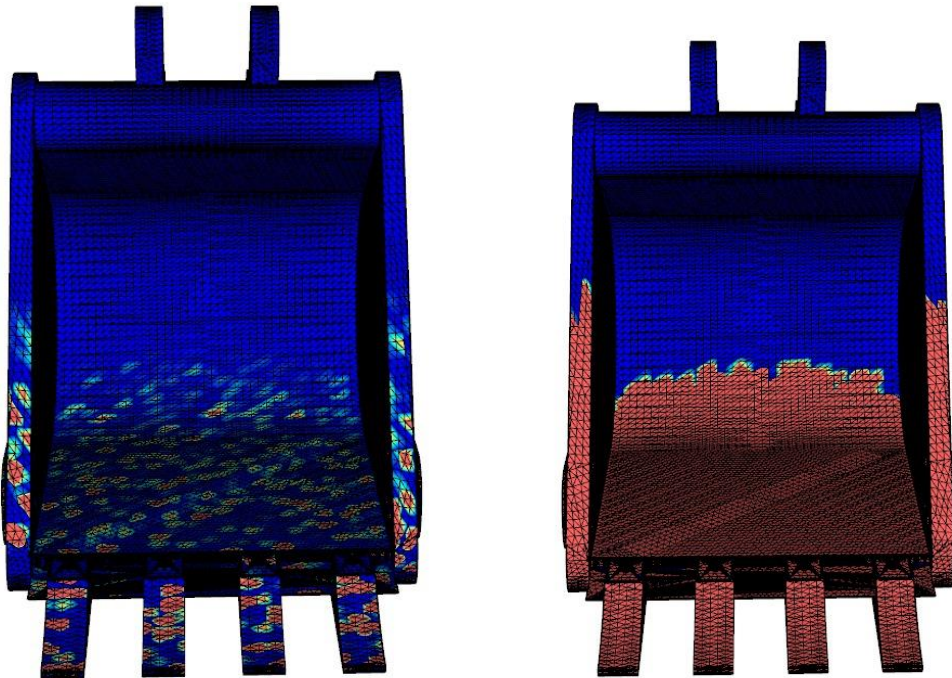
ANEXO D: PROCESO DE ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL



ANEXO E: MICROESTRUCTURA DEL ACERO AISI 1045 Y AISI 4340



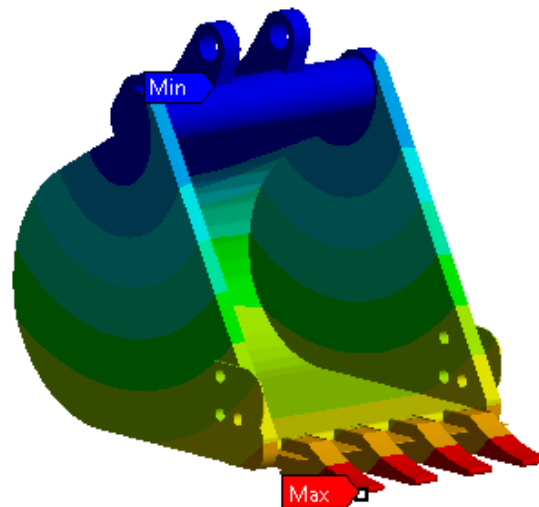
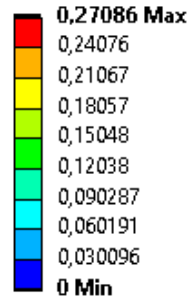
ANEXO F: RESULTADOS DEL MÉTODO DEM



ANEXO G: RESULTADOS DEL MÉTODO MEF

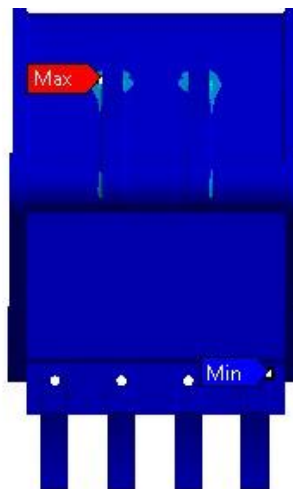
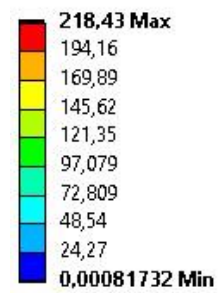
A: Static Structural

Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
12/6/2024 13:12



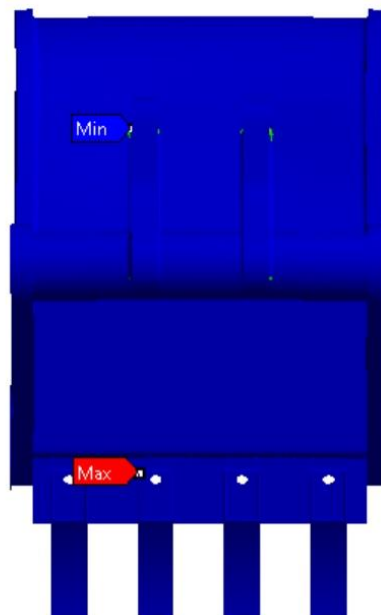
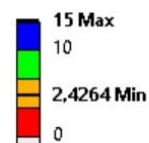
A: Static Structural

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
12/6/2024 13:14



A: Static Structural

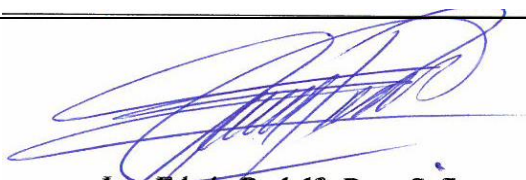

Safety Factor
Type: Safety Factor
Time: 1
14/6/2024 18:29





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA
NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO

Fecha de entrega: 24/06/2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: Juan Carlos Lemache Auquilla - Bryan Jefferson Martínez Reyes
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Mecánica
Carrera: Ingeniería Automotriz
Título a optar: Ingeniero Automotriz
 Ing. Edwin Rodolfo Pozo Safla Director del Trabajo de Titulación  Ing. Sócrates Miguel Aquino Arroba Asesor del Trabajo de Titulación