



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

ANÁLISIS MECÁNICO Y DE DESGASTE EN UN ARADO DE VERTEDERA UNIVERSAL POR MEDIO DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias Mecatrónica

Presenta:

José Villagómez Moreno

Dirigido por:

Dr. Ángel Pérez Cruz

Querétaro, Qro. a 30 de mayo de 2022



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Mecatrónica

**ANÁLISIS MECÁNICO Y DE DESGASTE EN UN ARADO DE VERTEDERA
UNIVERSAL POR MEDIO DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias Mecatrónica

Presenta:

José Villagómez Moreno

Dirigido por:

Dr. Ángel Pérez Cruz

Dr. Ángel Pérez Cruz

Presidente

Firma

Dr. Juan José Saucedo Dorantes

Secretario

Firma

Dr. Carlos Gustavo Manríquez Padilla

Vocal

Firma

Dr. Aurelio Domínguez González

Suplente

Firma

Dr. Juan Primo Benítez Rangel

Suplente

Firma

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Mayo, 2022

México

DEDICATORIAS

Dedico esta investigación principalmente a mis padres José Villagómez Estrada y Ma. De Jesús Moreno Arce, quienes son mis pilares de vida y además fueron los principales que me apoyaron incondicionalmente a lo largo de la carrera, ya que siempre me brindaron su apoyo tanto emocional como económico, todos sus consejos sirvieron para crecer personalmente, gracias por siempre confiar en mí y observar cada uno de los pasos que daba para no caer, guiándome por el buen camino y buscando siempre que llegara al éxito en mis ideas.

De igual forma a mis hermanas Miriam y Abril, las cuales me brindaron apoyo y comprensión, además que me orientaron a siempre luchar por lo que soñaba y confiar en mí para lograrlo, haciendo realidad cada una de mis metas escalando hasta el punto en donde me encuentro actualmente.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a la Universidad Autónoma de Querétaro, campus San Juan del Río, Facultad de Ingeniería y su Posgrado en Mecatrónica, por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios y concluirlos favorablemente.

A mis profesores durante el ciclo que estuve enrolado en el Posgrado, por haberme dotado de las herramientas necesarias y el conocimiento oportuno para crecer tanto académica como personalmente.

Al Dr. Ángel Pérez Cruz por confiar en mí y tener esa visión de compañerismo y trabajo en equipo, logrando este trabajo de investigación, conjuntando ideas para poder tener un trabajo de calidad.

A mi sínodo, Dr. Juan José Saucedo Dorantes, Dr. Carlos Gustavo Manríquez Padilla, Dr. Aurelio Domínguez González y Dr. Juan Primo Benítez Rangel, ya que me apoyaron en todo sentido para aclarar dudas y revisiones de esta tesis para de este modo poder concluirla de la mejor forma.

También al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca recibida (Apoyo 763055) y su arduo trabajo para la formación de cada uno de los alumnos que pueden contar con su apoyo y financiamiento en los trabajos de investigación y divulgación científica.

ÍNDICE

| | |
|------------------------|-----|
| DEDICATORIAS..... | i |
| AGRADECIMIENTOS..... | ii |
| ÍNDICE..... | iii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | vi |
| ÍNDICE DE TABLAS | xi |
| RESUMEN..... | xii |
| SUMARY..... | xiv |

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 ANTECEDENTES | 2 |
| 1.2 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS | 8 |
| 1.2.1 <i>Hipótesis</i> | 8 |
| 1.2.2 <i>Objetivo general</i> | 9 |
| 1.2.3 <i>Objetivos particulares</i> | 9 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN | 10 |
| 1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA | 12 |
| 1.5 PLANTEAMIENTO GENERAL..... | 14 |
| 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA..... | 16 |
| 2.1 LABOREO PRIMARIO Y CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DEL ARADO | 16 |
| 2.2 TIPOS DE SUELO | 19 |
| 2.3 TIPOS DE ARADOS | 21 |
| 2.4 INTERACCIÓN DE FUERZAS..... | 25 |
| 2.5 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL..... | 28 |
| 2.6 DESGASTE POR EROSIÓN | 31 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 34 |
| 3.1 ESTUDIO MULTIFÍSICO | 34 |
| 3.1.1 <i>Modelado de la vertedera universal a escala y mallado</i> | 36 |
| 3.1.2 <i>Modelado de la vertedera universal y mallado</i> | 41 |
| 3.2 FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO ESCALA | 46 |
| 4. RESULTADOS | 50 |
| 4.1 VALIDACIÓN DEL MODELO MULTIFÍSICO A ESCALA | 50 |
| 4.1.1 <i>Estudio mecánico multifísico a escala</i> | 50 |
| 4.1.2 <i>Flujo de partículas y erosión en el modelo a escala</i> | 54 |
| 4.1.3 <i>Validación experimental en la vertedera universal a escala</i> | 60 |
| 4.2 ANÁLISIS VIRTUAL DE LA VERTEDERA UNIVERSAL | 66 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.2.1 | <i>Estudio mecánico multifísico</i> | 67 |
| 4.2.2 | <i>Flujo de partículas y erosión en el modelo</i> | 70 |
| 4.2.3 | <i>Estudio de velocidad</i> | 76 |
| 4.3 | COMPARACIÓN DE DESGASTE ENTRE LA VALIDACIÓN Y ANÁLISIS VIRTUAL DE LA VERTEDERA A ESCALA . | 79 |
| 5. | CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS | 84 |
| 6. | REFERENCIAS | 87 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1-1. Elementos que componen el cuerpo de un arado 1) Bastidor 2) Vertedera 3) Reja 4) Timón (Rehkugler, 2011). | 2 |
| Figura 1-2. Diagrama del planteamiento general. | 15 |
| Figura 2-1. Clases texturales de los suelos adaptado de Crespo (2004). | 20 |
| Figura 2-2. Parámetros físicos de la tierra y características geométricas del arado para el cálculo de las fuerzas en la cara de la vertedera universal (Ahmadi, 2016). | 21 |
| Figura 2-3. Arados de vertedera. Sonalika® | 22 |
| Figura 2-4. Tipos de arado de vertedera (Rehkugler, 2011)..... | 23 |
| Figura 2-5. Arados de disco. John Deere® | 24 |
| Figura 2-6. Arados de cincel. Montana® | 25 |
| Figura 2-7. Comportamiento del suelo al ser cortado: Traducido de Ahmadi (2016). | 26 |
| Figura 2-8. Comportamiento del suelo a lo largo de la vertedera: Traducido de Ahmadi (2016)..... | 26 |
| Figura 2-9. Cálculo de las fuerzas de interacción en el fondo y cara de la vertedera. | 27 |
| Figura 2-10. Las funciones de interconectividad de los tres elementos principales dentro de un análisis CFD: Traducido de Tu et al. (2018)..... | 30 |
| Figura 2-11. Características de erosionado en materiales dúctiles y frágiles (Oka, 2005). | 32 |

| | |
|--|----|
| Figura 3-1. Metodología seguida..... | 34 |
| Figura 3-2. Vertedera a escala usada para estudio mecánico. | 37 |
| Figura 3-3. A) Recinto para el estudio fluidodinámico y B) Recinto y vertedera a escala unidos. | 38 |
| Figura 3-4. A) Mallado de la vertedera a escala y B) Vertedera a escala en aluminio 6061 establecido en ANSYS. | 39 |
| Figura 3-5. A) Mallado externo del volumen de control a escala y B) Mallado interno del volumen de control a escala. | 40 |
| Figura 3-6. A) Entorno fluidodinámico a escala con vista interna y B) Selección del fluido a usar (Aire). | 41 |
| Figura 3-7. Vertedera usada para estudio mecánico..... | 42 |
| Figura 3-8. A) Recinto para el estudio fluidodinámico y B) Recinto y vertedera unidos..... | 43 |
| Figura 3-9. A) Mallado de la vertedera y B) Vertedera en acero 1045 establecido en ANSYS. | 43 |
| Figura 3-10. A) Mallado externo del volumen de control y B) Mallado interno del volumen de control. | 44 |
| Figura 3-11. A) Entorno fluidodinámico con vista interna y B) Selección del fluido a usar (Agua)..... | 45 |
| Figura 3-12. A) Base impresa en 3D para elaborar el molde de yeso B) Molde de yeso para realizar el vaciado C) Fabricación del crisol para la fundición y D) Crisol listo para iniciar el proceso de fundición de aluminio. | 47 |

| | |
|--|----|
| Figura 3-13. A) Precalentado de la mufa a 670°C y B) Aluminio fundido previo al vaciado..... | 48 |
| Figura 3-14. A) Molde listo para realizar el vaciado B) Manejo del crisol previo al vaciado C) Aluminio fundido en el crisol (Sobrante) D) Vaciado realizado en el molde de yeso E) Desmolde de la pieza vaciada y F) Pruebas realizadas para obtener el mejor prototipo. | 49 |
| Figura 4-1. Bloques del flujo de trabajo utilizados en ANSYS para resolver la simulación a escala. | 51 |
| Figura 4-2. Factor de seguridad calculado para la vertedera a escala. | 52 |
| Figura 4-3. Esfuerzos calculados por el choque de partículas en la vertedera a escala. | 53 |
| Figura 4-4. Ciclos de fatiga calculados por el choque de partículas en la vertedera a escala. | 54 |
| Figura 4-5. Puntos de mayor desgaste en la vertedera a escala y densidad de la tasa de erosión. | 55 |
| Figura 4-6. Velocidad del choque de las partículas sobre la vertedera a escala. . | 56 |
| Figura 4-7. Presión absoluta ejercida por las partículas en la cara de la vertedera a escala. | 57 |
| Figura 4-8. Simulación del trayecto de las partículas por la vertedera a escala (salida de partículas de la boquilla de la pistola de sandblasteo). | 58 |
| Figura 4-9. Simulación del trayecto de las partículas por la vertedera a escala (impacto del óxido de aluminio). | 59 |
| Figura 4-10. Simulación del trayecto de las partículas por la vertedera a escala (movimiento a lo largo de la cara). | 60 |

| | |
|---|----|
| Figura 4-11. A) Prototipo pulido con el uso de mototool B) Pulido con lija de 600 Grit C) Pulido con lija de 1200 Grit y D) Acabado final de la pieza previo al método de erosionado..... | 61 |
| Figura 4-12. A) Taladrado de los orificios en la pieza y B) Machueleado del prototipo para fijar el modelo en una base de soporte. | 62 |
| Figura 4-13. A) Pistola de <i>Sandblast</i> utilizada y B) Pesaje del óxido de aluminio (erosionante). | 63 |
| Figura 4-14. A) Cabina de sandblasteo B) Prototipo fijo en la base de soporte C) Alineación a 30° previo a la aplicación del erosionante y D) Pieza erosionada. ... | 64 |
| Figura 4-15. A) Prototipo sin erosionar B) Primera experimentación y sandblasteo C) Zona erosionada por la aplicación el óxido de aluminio y D) Zona de mayor incidencia de desgaste. | 65 |
| Figura 4-16. A) Pesaje del primer experimento de sandblasteo B) Exposición de la zona afectada del primer experimento de erosión C) Pesaje final del prototipo desgastado y D) Exposición de la zona desgastada final. | 66 |
| Figura 4-17. Bloques del flujo de trabajo utilizados en ANSYS para resolver la simulación. | 67 |
| Figura 4-18. Factor de seguridad calculado para la vertedera. | 68 |
| Figura 4-19. Esfuerzos calculados por el choque de partículas en la vertedera. . | 69 |
| Figura 4-20. Ciclos de fatiga calculados por el choque de partículas en la vertedera. | 70 |
| Figura 4-21. Puntos de mayor desgaste en la vertedera y densidad de la tasa de erosión. | 71 |
| Figura 4-22. Velocidad del choque de las partículas sobre la vertedera. | 72 |

| | |
|--|----|
| Figura 4-23. Presión absoluta ejercida por las partículas en la cara de la vertedera. | 73 |
| Figura 4-24. Simulación del trayecto de las partículas por la vertedera (inicio del trayecto). | 74 |
| Figura 4-25. Simulación del trayecto de las partículas por la vertedera (corte del suelo). | 75 |
| Figura 4-26. Simulación del trayecto de las partículas por la vertedera (suelo volteado)..... | 76 |
| Figura 4-27. Representación del consumo contra la velocidad en los 2 casos de estudio y el límite de operación. | 78 |
| Figura 4-28. Comparación de la zona de desgaste entre la validación del arado de vertedera a escala y la simulación a escala. | 79 |
| Figura 4-29. Principales zonas de aparición prematura del desgaste por erosión debido al choque de partículas de óxido de aluminio en el modelo a escala. | 80 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2-1. Especificaciones de operación del arado de vertedera (Catalán, 2008). | 17 |
| Tabla 2-2. Prestaciones del arado de vertedera (Catalán, 2008). | 18 |
| Tabla 4-1. Resultados de la validación experimental de desgaste..... | 83 |

RESUMEN

El uso de herramientas para trabajar el suelo es una de las actividades agrícolas predominantes en gran parte de México y se ha utilizado por muchos años atrás para la producción de alimentos, el arado de vertedera universal, al igual que otros tipos de arados, son instrumentos usados para iniciar el laboreo primario del suelo, el cual consiste en arrastrar el arado para cortar la tierra y limpiar el terreno de rocas y materia orgánica, obteniendo un terreno listo para ser sembrado. Una de las principales complicaciones que el agricultor presenta es el deterioro de su instrumento de trabajo, causado por la humedad y fuerzas de arrastre del suelo, ocasionando desgaste por erosión en el cuerpo y zonas específicas del arado. Dependiendo de la velocidad y profundidad de arrastre y los ciclos de trabajo, el arado se verá afectado por la aparición prematura del desgaste, observando pérdida de masa en el instrumento, el hecho es que dicha pérdida conlleva a fallas mecánicas las cuales afectarán en la productividad y un mayor esfuerzo para el trabajador al mover el arado.

Es por eso que actualmente existen herramientas virtuales que por medio de la Simulación por Elementos Finitos y Fluidodinámica Computacional sea posible visualizar el comportamiento de los factores físicos que intervienen en el proceso de desgaste, además es más rápido poder identificar las zonas de falla y estado mecánico de la herramienta, reduciendo el trabajo de validación experimental y evitando realizar varios prototipos. Una solución es la creación de bancos de pruebas multifísicos en los cuales se puede calcular la interacción de un fluido contra un objeto de estudio, comprobando su integridad mecánica y observando el comportamiento del flujo de partículas actuando en su estructura para calcular la tasa de erosión presente, además se pretende comparar el modelo virtual con un modelo experimental a escala, obteniendo un modelo viable para las tareas del

campo y que presente una resistencia mecánica capaz de asegurar un uso constante, disminuir el peso del modelo y aumentar su vida útil.

(Palabras clave: Arado de vertedera, Desgaste por erosión, Simulación por Elementos Finitos, Fluidodinámica Computacional, Vida útil.)

SUMMARY

The use of tools to work the soil is one of the predominant agricultural activities in much of Mexico and has been used for many years for the production of food, the universal moldboard plow, like other types of plows, is an instrument used to start the primary tillage of the soil, which consists of dragging the plow to cut the earth and clean the land of rocks and organic matter, obtaining a land ready to be sown. One of the main complications that the farmer faces is the deterioration of his work instrument, caused by humidity and dragging forces of the soil, causing erosion wear on the body and specific areas of the plow. Depending on the speed and depth of drag and the work cycles, the plow will be affected by the premature appearance of wear, observing the loss of mass in the instrument; the fact is that this loss leads to mechanical failures that will affect productivity and a greater effort for the worker when moving the plow.

That is why there are currently virtual tools that use Finite Element Simulation and Computational Fluid Dynamics, it is possible to visualize the behavior of the physical factors that intervene in the wear process, it is also faster to be able to identify the fault zones and mechanical state of the tool, reducing the experimental validation work and avoiding making several prototypes. One solution is the creation of multiphysics test benches in which the interaction of a fluid against an object of study can be calculated, checking its mechanical integrity and observing the behavior of the flow of particles acting on its structure to calculate the erosion rate present. In addition, it is intended to compare the virtual model with an experimental scale model, obtaining a viable model for field tasks and that presents a mechanical resistance capable of ensuring constant use, reducing the weight of the model, and increasing its useful life.

(Key words: Moldboard Plow, Erosion Wear, Finite Element Simulation, Computational Fluid Dynamics, Useful Life.)

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo de la tierra ha sido realizado desde tiempos remotos, de igual manera la utilización de herramientas para facilitar la labranza del suelo ha evolucionado a lo largo de la historia, sin embargo, tanto los materiales como la resistencia de éstos han sido seleccionados por el hombre de una manera no estructurada, ya sea por trabajar con la maquinaria de forma constante o por recomendaciones de familiares que adquieren experiencia a lo largo de los años. La selección del utensilio correcto es una tarea difícil ya que no se sabe con seguridad las características del tipo de suelo en el que se va a trabajar (Shrestha et al., 2000), esto implica que ciertas particularidades físicas del suelo tales como, materiales, su distribución, humedad y cohesión de las partículas, no sean iguales en las diferentes regiones del país e incluso en otros países del mundo.

El cálculo de las fuerzas que están involucradas al momento que se está labrando el suelo son importantes, ya que se desconoce si el implemento está cortando el suelo dentro de sus límites de trabajo, llevándolo a un punto de falla, ya sea por las cargas dinámicas o por el constante laboreo y el choque de materia orgánica de la misma tierra, de este modo sufre desgaste y tiende a ya no brindar el desempeño ideal para el cual está fabricado (Catalán, 2008). Esta es una de las principales razones por las que se deben de conocer las características fundamentales del arado de vertedera, como su geometría y parámetros permisibles de operación.

El laboreo primario es indispensable para el tratamiento de los suelos, éste debe hacerse con mucha precaución, ya que el suelo es muy delicado, las herramientas utilizadas, como la vertedera (ver Figura 1-1) son muy agresivas contra el terreno a la hora de prepararlo si no se hace de la forma correcta; provocando en ocasiones que el espacio quede infértil por el desbalance de

nutrientes en la tierra, ya que los utensilios que se usan no son los adecuados. Por otro lado, la persona que realiza el trabajo debe ser muy precavido y debe tener conocimiento del uso apropiado de dichos aparatos para evitar llevar la herramienta a sus límites de trabajo.



Figura 1-1. Elementos que componen el cuerpo de un arado 1) Bastidor 2) Vertedera 3) Reja 4) Timón (Rehkugler, 2011).

Cuando una herramienta agrícola presenta un gran deterioro se debe comúnmente por medio del desgaste por erosión, esto causado por el constante trabajo que se le dedica al suelo, la erosión aumenta cuando el terreno contiene mayor humedad, representando un peligro tanto para la tierra como para la integridad del utensilio, ya que al no presentar un estado estructural sano, es posible que se proceda a desecharla o dejar de brindar el flujo de trabajo con el que está acostumbrado el agricultor a rendir en un ciclo de trabajo, provocando un aumento en el tiempo de producción.

1.1 Antecedentes

Es muy difícil tener un arado perfecto, ya que las características del suelo donde se va a trabajar nunca son similares (Shrestha et al., 2000) ni tampoco se sabe con seguridad si se ha de interponer alguna roca o residuos de mayor tamaño

en su trayecto, de este modo se pone en riesgo la integridad de alguna de las partes que componen el arado, principalmente si se someten a un constante laboreo provocando una degradación o desgaste que conducen a su reemplazamiento.

La mayoría de las ocasiones la selección de los aperos, que son los instrumentos para trabajar el suelo (ver Figura 1-1), se hace basada en la experiencia del trabajador, recomendaciones o herencia familiar; el cálculo de las fuerzas que actúan sobre ese apero y la potencia requerida para moverlo son importantes para conocer si en verdad el apero que se está utilizando es el adecuado. Una calculadora que haga esto de una forma más fácil es práctica para la futura selección de nuevos implementos, en este sentido, Ahmadi (2016) muestra una forma de hacerlo de una manera muy funcional, por medio de ecuaciones que implican el uso de parámetros mecánicos, al igual que parámetros físicos del suelo de cada región, resultando en un cálculo de las fuerzas implicadas en la acción del corte del suelo.

Como ya se mencionó las fuerzas que el suelo genera sobre el arado tienen gran impacto en función de la forma que tenga el mismo arado, pero eso no indica que el desgaste constante al que está sometido se disminuirá ya que las características de los suelos tienen un amplio impacto sobre el desgaste de las partes del mismo implemento, el desgaste incrementa por el área de suelo recorrido por la vertedera, afectando principalmente la planeación de producción, calidad de la labranza y el consumo energético, esto debido a la degradación de los componentes que conforman el arado de vertedera.

Se han realizado estudios completos para la vertedera, la cual es la parte del arado que voltea la tierra cortada por la reja (ver Figura 1-1, números 2 y 3), haciendo uso de sus características operacionales de forma simulada y experimental, esto para comparar los resultados de desempeño y el grado de error con el cual se trabaja el modelo virtual y el modelo físico (Ibrahmi et al., 2015, a y b), esto permite tener una amplia información sobre los esfuerzos que sufre dicho

artefacto y observar las fuerzas que se producen al hacer el paso del corte por el suelo. Las simulaciones por elemento finito, con el software adecuado, son por lo general utilizadas para reducir los tiempos de validación experimental y las grandes cantidades de material que se necesita para generar un estudio con un prototipo, acercándose a resultados similares a los de situaciones reales.

Una de las principales fallas que a diario está presente en los materiales es el desgaste, el cual se genera por el constante contacto de dos materiales. El desgaste es la causa más importante de las fallas mecánicas prematuras (Singh et al., 2017), esto debido al material que se está utilizando y las labores en las que dicho objeto está participando, lo que lleva a su deterioro. Una alternativa que puede ser más competitiva en el mercado que comprar repuestos o accesorios nuevos es la aplicación de recubrimientos en las partes de los objetos que están realizando una tarea específica. Una idea es aplicar por medio de soldadura con electrodo revestido una capa de material con porcentajes altos en cromo, esto ayuda para aumentar la dureza del material. Horvat et al. (2008) generaron de igual manera una técnica de endurecimiento por medio de soldadura por inducción que modifica las propiedades mecánicas del material, inicialmente, una capa más dura por el tratamiento térmico de la inducción del calor y una segunda capa por la aplicación de acero al cromo por medio de la soldadura. Pero no sólo es bueno saber cómo proteger a los materiales con capas de soldadura, sino que también se deben conocer las características del suelo, ya que la humedad es la principal en afectar la dureza del suelo y hacer más próxima la aparición de desgaste, ya que a mayor humedad la cohesión de las partículas de la tierra aumenta y la fuerza debido al corte es por consiguiente más grande (Natsis et al., 2008).

Desde hace algunas décadas el modelado y simulación mediante el método de elementos finitos ha representado un papel sumamente importante ya que permite calcular el comportamiento de algunos de los materiales o sistemas con aproximaciones a resultados semejantes a los de la vida real. Por ejemplo, la

simulación Fluidodinámica, con la cual se puede observar el comportamiento de un fluido en específico y evaluar sus características, de este modo es que se pueden validar experimentos y comparar resultados con eventos físicos reales. Un ejemplo es el trabajo elaborado por Li et al. (2019), quienes realizaron una experimentación para observar la erosión en aluminio, las partículas se inyectan en conjunto con agua desde la parte inferior de una tubería y con el uso de un microscopio electrónico de barrido se comprueban las zonas de mayor afectación, así como las velocidades del flujo donde la erosión es más grave. El método de Dinámica de Fluidos Computacional (del inglés Computational Fluid Dynamics) se presenta como una herramienta alternativa para validación de los resultados, lo cual genera un entorno similar al volumen donde se inyectan las partículas de forma física. Además, los autores proporcionan las características necesarias para que la simulación sea cercana al comportamiento del sistema de forma experimental; comprobando entonces que la inyección de partículas se presenta desde la parte inferior y afecta principalmente en el primer choque en la cara de la curva del tubo, siendo la entrada de la curva y la velocidad de las partículas los factores importantes en la formación de erosión, la cual disminuye en la salida del tubo.

Otro tipo de simulaciones que se realizan con el método CFD se centran en el impacto de las partículas a diversas velocidades para comprobar la tasa de erosión que se presenta en el material usando las ecuaciones de Finnie (Oka et al., 2005, a), las cuales relacionan las características de la partícula, como su tamaño y forma con la velocidad y ángulo de impacto para generar un entorno en el cual se pueda calcular la erosión. De aquí parte la brecha de investigación del impacto de las partículas y su relación con la dureza del material que está siendo afectado. Nguyen et al. (2015) desarrollaron un dispositivo de *Sandblast* creado por ellos para determinar el ángulo de impacto con mayor incidencia en el proceso de erosionado de un acero al carbón, lo que se realizó fue que por medio de experimentación y con la máquina construida se pudo validar la pérdida de masa y la indentación que

se deja en el material por medio de microscopía electrónica de barrido de emisión de campo, indicando entonces que el ángulo de mayor incidencia ante el impacto es el de 40°. Para la comparación de la experimentación, con la ayuda de la simulación en CFD es posible comprobar la afectación de las partículas, por lo tanto, mediante una caracterización adecuada se puede replicar el estudio en un entorno computacional, demostrando entonces zonas de daño en el material usado muy similares a la experimentación física.

En fechas más recientes la evaluación del desgaste usando la simulación por el método CFD ha crecido, teniendo nuevos enfoques para la realización de experimentos en el ámbito del movimiento de partículas en un flujo líquido, donde los ángulos de impacto y velocidad de las partículas son las principales características que afectan en el crecimiento de la erosión (Arabnejad et al., 2017), en su mayoría las ecuaciones usadas para calcular la tasa de erosión son de gran uso, ya que la simulación ayuda de una manera más rápida a verificar daños en tuberías (Domagala et al., 2018), dichas ecuaciones dentro del software modelan el comportamiento de las partículas que emulan los resultados generados de forma física, de este modo es que la capacidad computacional también debe aumentar para obtener resultados más concretos (Adedeji et al., 2019).

De forma general los trabajos revisados están ligados a flujos en tuberías, hay muy pocos desarrollos enfocados en el flujo de partículas de la tierra, siendo más específicos en el ámbito de la agricultura. Recientemente Wei et al. (2019) han realizado una experimentación y simulación Fluidodinámica para validar la acción del desgaste en la pala de un arado reversible a diferentes velocidades, esto para observar las afectaciones de la velocidad y la profundidad de trabajo en la punta de corte del implemento. Los autores realizan la visualización de la variación del desgaste por medio de un microscopio electrónico de barrido, comparando los puntos de desgaste con los resultados de los esfuerzos de la simulación causados por las partículas.

Para el caso de México, la investigación y desarrollo de métodos ligadas al desgaste han sido muy pocas, por ejemplo, González (2013) realizó una máquina con la cual se puede evaluar el desgaste por medio de un mecanismo recíproco en el cual se coloca el material y por medio del movimiento constante y la fricción entre las dos piezas se genera desgaste, evaluando la pérdida de masa en el material base.

En el desarrollo de simulación de implementos agrícolas realizados en la Universidad Autónoma de Querétaro, Villagómez (2020) realizó un banco de pruebas de simulación para comprobar las fallas en un arado de vertedera universal, contando con un modelo CAD el cual puede ser modificado de forma geométrica para comprobar la afectación de los esfuerzos causados por las fuerzas generadas en el corte del suelo y establecer un modelo factible que pueda ser usado en la labranza de la tierra, usando como variables de entrada las características físicas del suelo y características operacionales del arado como velocidad y profundidad de corte. Otro de los estudios realizados ha sido enfocado a maquinaria rotativa, tal es el caso de Saucedo (2014) quien estudió los efectos generados por el desgaste uniforme en cajas de engranes, la investigación que realizó estuvo basada en el análisis de componentes frecuenciales asociado con la frecuencia de engranaje logrando determinar que dependiendo del porcentaje de desgaste se produce una modificación frecuencial y además determinó que durante el contacto entre dientes de engrane se produce una concentración mayor de esfuerzos cuando los dientes de los engranes están más degradados. Por otro lado, se ha realizado el análisis del desgaste en herramientas de corte por medio de visión artificial, Trejo (2010) generó un monitoreo del desgaste en cortadores para el proceso de maquinado de torneado, el proceso de maquinado con cortadores desgastados provoca vibraciones y afecta a la velocidad del corte y profundidad, obteniendo maquinados deficientes, dichos indicadores son de gran ayuda al momento de generar una

estimación cuantitativa del desgaste presentado en las herramientas de remoción de material.

Por lo que el monitoreo o simulación previa del desgaste es importante para prevenir daños en los materiales y en las piezas con las que algún sistema está armado, de igual manera se puede predecir el daño sufrido por la erosión y posteriormente evaluar el comportamiento que de forma experimental provoca usar o tener elementos erosionados, en la mayoría de los casos son productos que son próximos a desecharse o sustituirse. Por lo tanto, la simulación puede servir para prevenir daños, además de poder determinar características físicas que se pueden modificar en los objetos en la etapa de diseño antes de construir prototipos, esto para ahorrar tiempo de trabajo o ahorro monetario debido a la sustitución tan continua que se presenta sin una previa evaluación de la vida útil del artefacto. De igual manera se pueden obtener bancos de prueba de simulación con los cuales sea más fácil determinar las fallas de algún sistema o dispositivo, esto sin realizar todo el desarrollo del diseño mecánico, obteniendo un sistema en el cual el diseñador pueda introducir sus datos de forma más sencilla y obtener resultados de igual manera en un periodo de tiempo corto.

1.2 Hipótesis y Objetivos

1.2.1 Hipótesis

Por medio de la simulación multifísica y la Dinámica de Fluidos Computacional es posible evaluar los puntos críticos de desgaste en un arado de vertedera y comprobar las principales causas de falla en el modelo virtual, debido al flujo de partículas y cargas a lo largo del implemento; esto para reducir el número de prototipos construidos en la etapa de diseño de un arado.

1.2.2 *Objetivo general*

Realizar el modelado de un implemento agrícola mediante el uso de herramientas computacionales y de Fluidodinámica para simular la influencia del flujo de partículas en su cara principal y calcular el desgaste presentado a lo largo de la estructura y detectar zonas críticas por el flujo continuo de partículas.

1.2.3 *Objetivos particulares*

- Realizar revisión de literatura para determinar características de desempeño del arado, así como las variables y necesidades del diseño para plantear el problema general.
- Modelar el arado de vertedera mediante el uso de un software de diseño CAD para contar con la geometría de estudio.
- Establecer características físicas de cada entorno CAD de trabajo de acuerdo con las propiedades del suelo y respecto al modelo (materiales y características del fluido, densidad, tamaños, velocidad, temperatura, etc.) para determinar las condiciones frontera y generar lo estudios correspondientes.
- Generar el estudio multifísico usando un software de Fluidodinámica Computacional basado en la teoría de los elementos finitos, que implica el estudio mecánico y fluidodinámico para obtener los esfuerzos principales, causas de falla y determinar el desgaste en la cara principal del modelo por las partículas presentes en el fluido.
- Analizar la simulación multifísica con el uso de un software de Fluidodinámica Computacional para obtener un resultado en conjunto de las afectaciones del flujo de partículas en la geometría del modelo.

- Evaluar los esfuerzos y puntos de desgaste calculados por medio de las gráficas de contorno y vectores del comportamiento del fluido para determinar las zonas críticas del arado.
- Construir un prototipo a escala del arado de vertedera usando las herramientas del laboratorio de la facultad de ingeniería para evaluar el desgaste de forma experimental.
- Realizar la medición del desgaste usando el prototipo a escala del arado para validar el modelo virtual.

1.3 Justificación

La selección de un arado para realizar determinado trabajo de la tierra es una tarea extenuante, más si no se sabe con seguridad las características del terreno en el que se va a trabajar, llevando al arado que se seleccionó al sometimiento de esfuerzos muy elevados, lo que provoca que éste se dañe o que se reduzca considerablemente su vida útil. Para el proceso de diseño es necesario la modificación de las diversas partes del modelo a consideración del diseñador, esto para determinar características geométricas específicas dependiendo de la influencia del suelo en la cara principal del arado. Aunado a esto, el desgaste es un fenómeno muy común en las herramientas fabricadas en acero, ya que al someterlas a trabajo constante se afecta la integridad del material y en ocasiones se puede presentar una deformación plástica por el impacto de rocas en los arados. También se llega a tener pérdidas considerables del material, apareciendo orificios en la cara principal del arado, generando entonces que el implemento se deseche por ser inservible. De igual forma las fallas mecánicas siempre están presentes en los aperos, como fallas por cargas estáticas, dinámicas y también por fatiga. Por lo cual se es necesario evaluar los puntos críticos en el arado de acuerdo con las afectaciones causadas por el impacto del flujo másico de partículas.

La forma más sencilla de evaluar el desgaste en las herramientas o de forma general en los materiales, es por medio de procesos experimentales de fricción entre dos piezas, una de ellas es el material de estudio y el otro es el que ocasiona el desgaste. El desgaste se presenta con la pérdida de masa del material por determinada área de trabajo recorrida, por lo que la validación que se realiza es el pesaje antes y después de la prueba para comprobar la cantidad de masa perdida. La validación del desgaste es un proceso largo ya que implica tener un laboratorio de experimentación con herramientas específicas, hasta el día de hoy no se tiene un laboratorio virtual para hacer estos análisis de una manera más sencilla, la simulación del desgaste en algún material o un sistema que está en contacto con partículas, con características físicas específicas de tamaño, forma, cantidad y velocidad de impacto, podría ser observada por medio de la Dinámica de Fluidos Computacional con un procedimiento más eficaz, esto para reducir los largos tiempos de experimentación y como una nueva herramienta para la validación de desgaste por erosión en las herramientas usadas en la planeación y trabajo del suelo agrícola, previniendo así futuros daños que se lleguen a presentar por el laboreo del suelo. Es por eso que la principal justificación de este trabajo es que por medio del entorno CFD se podrá realizar el análisis del desgaste en un arado de vertedera universal, de igual manera se podrá validar el desgaste en diversos sistemas dependiendo las características que se deseen modelar y aplicar a cada estudio conforme el diseñador lo decida. Interviniendo principalmente en el ahorro de trabajo experimental y ahorro económico de materiales excesivos en la construcción del arado, haciendo un modelo de menor masa que pueda ser usado de igual manera para las tareas del campo aumentando el flujo de trabajo por la disminución del peso de arrastre, además contribuyendo en la concientización de la degradación del suelo y sus nutrientes por el uso inadecuado de los implementos por la falta de la experiencia por parte de los productores agrícolas y campesinos. Obteniendo un modelo práctico y adecuado para cada tipo de zona en la que se requiera su uso, construyendo un modelo que pueda adaptarse a cada suelo de

diferentes regiones y evitar el desperdicio de material en la etapa de diseño del mismo.

1.4 Descripción del problema

La experimentación física para evaluar el desgaste de una herramienta agrícola en los largos ciclos de trabajo es una tarea complicada, ya que se necesita un espacio de experimentación controlado, de este modo se pueden establecer las características de los suelos de una región específica, pero como se sabe el suelo cambia diariamente y las propiedades físicas que se presentan de igual manera son diferentes a lo largo del año. La simulación por elementos finitos tiene un papel fundamental ya que se puede evaluar el comportamiento de un sistema con diferentes características físicas seleccionadas por el diseñador, sin embargo, hasta la fecha no se han realizado trabajos relacionados con la maquinaria agrícola, lo que lleva a desarrollar mayor trabajo experimental y mayor tiempo fabricando prototipos, de este modo obtener datos certeros del comportamiento del sistema se convierte en una búsqueda algo cansada al no tener fuentes de información confiables, de igual manera el medir variables por medio de sensores en ocasiones puede ser peligroso ya que las personas que hacen dichos estudios tienden a sufrir accidentes, porque algunas veces es difícil acceder a los lugares a tomar muestras o realizar alguna investigación de campo.

Anteriormente no era muy común utilizar la simulación por elementos finitos, más bien se realizaban trabajos de forma experimental, con dichos programas de simulación es posible realizar estudios físicos a un modelo, de este modo se pueden simular comportamientos del mundo real en el objeto para comprobar su integridad y su vida útil, pero está limitado al conocimiento técnico que se tenga sobre las características físicas del entorno a simular. La simulación Fluidodinámica, es de gran ayuda para determinar el comportamiento de algún sistema ante variables

específicas, de este modo es posible conocer la respuesta de dicho sistema u objeto en el mundo real.

Cabe mencionar que las simulaciones están enfocadas a un fenómeno en particular, ya sea para verificar cuestiones mecánicas, como fallas y esfuerzos de fluencia o comportamientos de fluidos en un entorno controlado, como velocidad del fluido, movimiento de partículas, etc., pero con la limitante de que se debe generar una simulación por modelo, requiriendo simulaciones multifísicas, dichas simulaciones involucran múltiples modelos físicos de forma simultánea, para una mejor respuesta cercana al mundo real.

Por lo tanto, el caso de estudio del arado de vertedera se desenvuelve en un entorno donde el flujo de partículas a lo largo de su cara principal está presente, de este modo se requiere una forma simple de evaluar el desgaste en la cara que se ve afectada por el choque de partículas del suelo, de igual manera es necesario reducir los tiempos de trabajo experimental, lo que conlleva a la realización de varios prototipos debido a la variedad de los tipos de suelo que existen. Además, es necesario tener un modelo base, con el cual se podrán realizar modificaciones geométricas dependiendo de las necesidades del diseñador y de las condiciones en las que el modelo estará involucrado. Por lo tanto, en el entorno de la simulación se necesita una interacción fácil por parte del usuario, en la cual se puedan introducir los datos del suelo y materiales del modelo, para generar resultados con los cuales sea posible seleccionar el utensilio correcto dependiendo de las características de cada zona. Para la validación se requiere un prototipo, el cual, cumpla con las características geométricas y físicas del modelo digital, esto para que la validación no sea tardada y los resultados tanto en simulación como en el modelo fabricado puedan coincidir.

1.5 Planteamiento general

Se pretende generar un banco de pruebas en un software de Fluidodinámica Computacional capaz de variar las características geométricas y físicas de un modelo de un arado de vertedera (ver Figura 1-2), en el cual se pueda ver reflejado el desgaste que presenta al realizar la simulación en un entorno donde interaccione un flujo de partículas impactando el diseño, mostrando las zonas más comunes y próximas a desgastarse y que puedan fallar mecánicamente, es así que se pueden establecer las velocidades de inyección de partículas y el ángulo de incidencia de las mismas antes y después de impactar ante el implemento agrícola. Es preciso mencionar que las simulaciones en la rama agroindustrial están muy limitadas y no son muy comunes al momento de validar sus productos, ya que la mayoría de fabricantes realizan sus modelos con factores de seguridad muy altos, de este modo el trabajo realizado ayudará a establecer los materiales, formas geométricas y dimensiones adecuadas para evitar tener peso innecesario en el nuevo implemento propuesto, además de realizar una validación experimental con un modelo a escala, para el cual se usará el método de *Sandblast* para acelerar el desgaste en el diseño y poder establecer las zonas más afectadas por el proceso aplicado y además compararlo con el modelo virtual en la simulación, generando una estimación del tiempo que se llevaría el modelo llegar a un estado de desgaste por erosión, dicho estado sería crítico ya que el diseño podría presentar otro tipo de fallas mecánicas derivadas del desgaste presentado. Todo esto con el fin de generar un modelo adecuado para una zona específica donde se requiera trabajar la tierra, estableciendo entonces un diseño capaz de reducir las horas de trabajo por la ligereza del peso que se presente en la selección de materiales previos y que además tenga una vida útil funcional en la cual el operador no se vea afectado por la necesidad de cambiar las refacciones o partes del implemento agrícola de una manera constante, generando así un ahorro tanto energético de trabajo como económico.

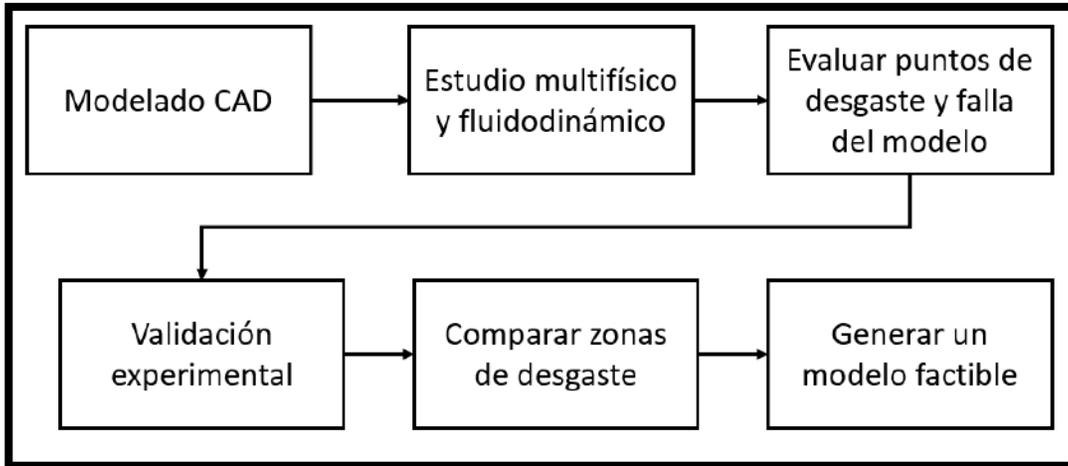


Figura 1-2. Diagrama del planteamiento general.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

A lo largo del texto se han especificado las características y formas más comunes de la vertedera, seleccionando para el proyecto el arado de vertedera universal por sus características operacionales y por su gran impacto en el trabajo de la tierra. Lo que se debe conocer principalmente es cómo la tierra interacciona con la vertedera y los esfuerzos que se generan en la cara principal, de igual manera se deben conocer las características físicas del suelo y de la vertedera universal, las cuales son clave en la introducción de variables en la simulación para la determinación del desgaste. Por lo cual se dará una explicación de los factores que afectan al arado de forma general y sus límites de trabajo, al igual se explicarán las características principales del método CFD y su representación, como también que las ecuaciones que rigen el modelo de la tasa de desgaste por erosión.

2.1 Laboreo primario y características de operación del arado

El laboreo primario es indispensable para el tratamiento de los suelos, este debe hacerse con mucha precaución, ya que el suelo es muy delicado, además las herramientas como la vertedera, tiende a ser muy agresiva si no se hace de la forma correcta. En el caso del arado de vertedera existen tres tipos: helicoidales, cilíndricas y americanas o universales, las cuales presentan características del resquebrajamiento de la tierra en diferentes rangos, dependiendo la cantidad de humedad presente en el suelo, tomando la universal como la más apta para el trato primario de la tierra, pulveriza terrones y consigue porosidad para mejor almacenamiento del agua, además si existe humedad, el flujo de trabajo se realiza de una manera más sencilla ya que hay mejor deslizamiento en suelos lodosos. De este modo después de realizar el corte se obtiene un suelo listo para ser sembrado y se puede aprovechar la limpieza de la tierra para una mejor fluidez de agua cuando se riegue.

El arado se compone principalmente de la vertedera, reja, bastidor y opcional la cuchilla para la parte de corte, por otro lado está el timón el cual funciona para darle dirección al arado, en caso de suelos con mayor humedad, el trabajo del arado dependerá más de la velocidad de arrastre y el largo de la reja para mayor profundidad de labranza, esto relacionado a lo realizado por Catalán (2008), el cual muestra tablas de especificaciones de trabajo y prestaciones que otorga el mismo apero (ver Tabla 2-1) donde se muestra la profundidad recomendada dependiendo de las características físicas del ancho del corte del arado, relacionado con el tamaño de la reja. De igual manera la velocidad del laboreo otorga una operabilidad y movimiento del apero para cortar la tierra de una forma más fácil, dichas velocidades oscilan entre 0 m/s y 2 m/s, en las cuales el arado logra su mejor desempeño.

Tabla 2-1. Especificaciones de operación del arado de vertedera (Catalán, 2008).

| <i>Tamaño de la reja (in)</i> | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>Ancho de trabajo (cm)</i> | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| <i>Profundidad Máxima (cm)</i> | 24 | 28 | 36 | 36 | 40 |
| <i>Profundidad Mínima (cm)</i> | 15 | 17 | 20 | 22 | 25 |
| <i>Profundidad Recomendable (cm)</i> | 21 | 25 | 28 | 32 | 35 |

Dependiendo del tipo de suelo en el que se vaya a trabajar es como se seleccionará el vehículo a utilizar para mover el arado, como puede observarse en la Tabla 2-2 se establecen los CV (Caballo de Vapor) necesarios para tener un arrastre fluido y evitar atascamientos. Además, es necesario saber qué fuerza de arrastre estará presente al momento de mover el implemento, esto para evitar que se quede atascado y pueda presentarse alguna falla por deformación plástica en la cara de la vertedera, pudiendo llegar a generar rupturas.

Tabla 2-2. Prestaciones del arado de vertedera (Catalán, 2008).

| Tamaño de la reja (in) | 12 | 14 | 16 | 18 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Esfuerzo de tracción a la profundidad recomendada (daN/cuerpo) | | | | |
| Suelo ligero | 190 | 260 | 340 | 420 |
| Suelo medio | 320 | 430 | 560 | 710 |
| Suelo pesado | 570 | 770 | 1010 | 1270 |
| Potencia de tracción a 1.5 m/s (kW/cuerpo) | | | | |
| Suelo ligero | 2.8 | 3.8 | 4.9 | 6.3 |
| Suelo medio | 4.6 | 6.3 | 8.2 | 10.4 |
| Suelo pesado | 8.3 | 11.4 | 14.8 | 18.8 |
| Tractor recomendado CV/cuerpo | | | | |
| | 7-9 | 9-12 | 11-16 | 14-20 |
| | 9-12 | 12-16 | 15-22 | 19-27 |

Ibrahmi et al. (2015) relacionan las principales características con las cuales se pueden calcular las fuerzas que interactúan en un arado, con esta información concluyen puntos clave para la realización de un nuevo diseño, ya que se menciona que la interacción del arado con el suelo incide principalmente en sus propiedades geométricas, en este caso los ángulos de elevación y corte de la vertedera (25° y 45°), pero de igual forma la velocidad en combinación con la profundidad de trabajo (1 m/s y 150 mm) son condiciones que están ligadas a las variaciones de la fuerza que incide en la cara principal del instrumento. Algunos experimentos para ser observados de mejor forma son realizados en contenedores de suelo, los cuales

son controlados con los componentes texturales adecuados para simular el suelo de la región, obteniendo en su caso resultados no similares a los calculados por un método de elementos finitos, si no que coinciden en comportamiento.

2.2 Tipos de suelo

Según su textura los suelos (ver Figura 2-1) pueden clasificarse de la siguiente forma debido al tamaño de las partículas (Crespo, 2004):

- Arcilla: diámetro < 0.002 mm
- Limo (franco/ marga): diámetro 0.002 mm – 0.05 mm
- Arena: diámetro 0.05 mm – 2 mm

Los fragmentos gruesos del suelo tienen diámetros mayores a los 2 mm y se clasifican como:

- Grava: diámetro 0.2 mm – 2 mm
- Piedra: diámetro 2 mm – 20 mm
- Roca: diámetro > 20 mm

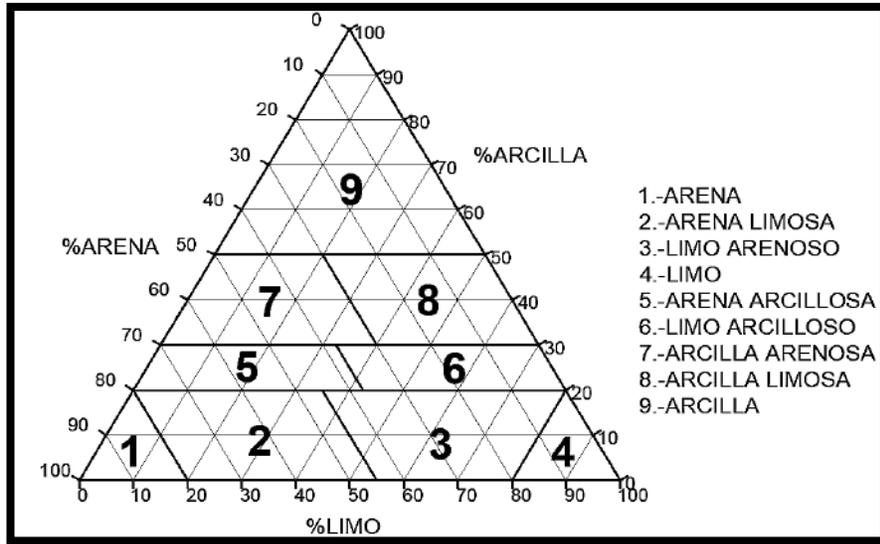


Figura 2-1. Clases texturales de los suelos adaptado de Crespo (2004).

Los suelos de estudio son por lo general los mencionados con anterioridad (arcilloso, limoso, arenoso) con los cuales la mayoría de los autores hacen sus experimentaciones, ya sea de forma física o en espacios controlados, en los cuales la humedad, porcentaje de texturas y la compactación son la clave para obtener características de los suelos como son:

- Cohesión
- Densidad específica
- Ángulo de fricción interna del suelo

Con dichas características el suelo obtiene propiedades de resistencia al corte, las cuales se usaron de apoyo para calcular las fuerzas que actuaron en torno a las partes del arado universal, además de servir como variables en los cálculos de las fuerzas, dichas fuerzas fueron calculadas con lo establecido por Ahmadi (2016). Donde los principales parámetros de entrada del suelo son (ver Figura 2-2), la cohesión, debida a la humedad del suelo, el ángulo de fricción interna del suelo

con la herramienta y la densidad específica del suelo, junto con las características físicas del arado, como ángulo de corte, profundidad y ancho de trabajo y la velocidad de arrastre, todas estas entradas servirán para calcular las fuerzas que interaccionan tanto en el fondo como en la cara de la vertedera universal, las cuales son las encargadas de generar esfuerzos en el cuerpo total del arado.

| Inputs | | | | | | |
|--------------------------|-----------------------|--|-------|--------------------|--------|-------------------|
| | Name | Definition | Value | Unit | Value | Unit |
| Soil parameters | c | Soil cohesion | 14.1 | kPa | 14100 | Pa |
| | φ | Angle of soil internal friction | 30 | deg | 0.52 | rad |
| | $(\pi/4 - \varphi/2)$ | Angle of soil failure plane with horizon | | | 0.53 | rad |
| | ρ | Soil bulk density | 1.365 | ton/m ³ | 1365 | kg/m ³ |
| | W | Weight of the soil wedge | | | 151.18 | N |
| (Ahmadi, (2016)) | | | | | | |
| | Name | Definition | Value | Unit | Value | Unit |
| Plow parameters | θ | Moldboard tail angle | 30 | deg | 0.52 | rad |
| | M | Mass of a plow bottom | | | 10 | kg |
| | δ | Angle of soil-metal friction | 30 | deg | 0.52 | rad |
| | $\mu = \tan(\delta)$ | Coefficient of soil-metal friction | | | 0.57 | |
| | N | Number of plow bottoms | 1 | | 1 | |
| (Ibrahmi, (2015)) | | | | | | |
| | Name | Definition | Value | Unit | Value | Unit |
| State parameters | v | Forward velocity | 3.6 | km/h | 1 | m/s |
| | d | Working depth of a plow bottom | 21 | cm | 0.21 | m |
| | b | Working width of a plow bottom | 30 | cm | 0.3 | m |
| (Catalán, (2008)) | | | | | | |

Figura 2-2. Parámetros físicos de la tierra y características geométricas del arado para el cálculo de las fuerzas en la cara de la vertedera universal (Ahmadi, 2016).

2.3 Tipos de arados

Existen varios tipos de arados los cuales se utilizan de diferentes maneras dependiendo de la calidad del suelo y las características físicas y texturales que se presentan al momento que se requiera realizar el laboreo primario. Uno de los más utilizados es el mencionado a lo largo del texto, el cual es el arado de vertedera (ver Figura 2-3), pero dentro de sus variantes existen otros tipos de arados de vertedera que se adaptan a los suelos de cada región (ver Figura 2-4), lo cual dependerá

principalmente de la cantidad de humedad que se presente al momento de hacer el laboreo primario o el corte del suelo para preparar la tierra previo a sembrarla.



Figura 2-3. Arados de vertedera. Sonalika®

De este modo el objeto de interés ronda en el arado de vertedera universal, el cual cuenta con características tanto geométricas como operacionales descritas previamente por Catalán (2008), la variación de dicho arado es la búsqueda de un apero, que como el nombre lo menciona es “universal”, siendo capaz de generar el mismo flujo de trabajo que otros arados con un diseño establecido muy parecido a los demás para poder usarlo en diferentes suelos, ya sean con mayor humedad o con menor humedad, generando entonces un mejor rendimiento hasta en zonas llenas de materia orgánica y rocosas.

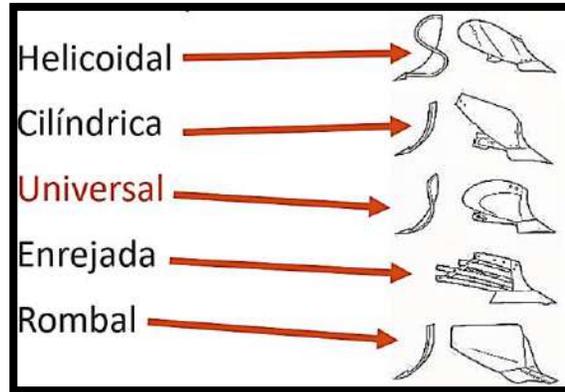


Figura 2-4. Tipos de arado de vertedera (Rehkugler, 2011).

Otro tipo de arado es el de discos como el mostrado en la Figura 2-5, el cual a simple vista se puede apreciar la forma fundamental y el porqué del nombre que se le da, estos instrumentos son mayormente utilizados para tierras donde la humedad se presenta de una forma más abundante, formando una tierra lodosa en la cual el arado de vertedera podría atascarse y no brindaría el desempeño correcto, lo cual conlleva a daños mecánicos o hasta rupturas por atascamiento, los discos en este caso giran en un eje al momento de cortar el suelo, lo que evita el atascamiento.



Figura 2-5. Arados de disco. John Deere®

Como ya se mencionó los arados presentan varias formas geométricas dependiendo el tipo de tarea que habrá por desempeñar al momento de realizar el laboreo primario del suelo, los anteriores mencionados son los más comunes usados en regiones centrales de México, por lo que las zonas presentan mayor humedad durante el año, por otro lado, las zonas del norte del país son mayormente utilizados los arados de cincel (ver Figura 2-6), donde los espacios son más secos y la tierra se presenta con baja humedad, los cinceles son vibratorios y generan un corte tanto vertical como horizontal para desboronar la tierra y generar trozos de tierra más pequeños en los cuales la humedad pueda ser captada de una mejor manera previo a introducir las semillas, de otro modo la tierra no presentaría humedad suficiente para el desarrollo y crecimiento de la planta a producir.



Figura 2-6. Arados de cincel. Montana®

2.4 Interacción de fuerzas

Las fuerzas que interaccionan a lo largo del arado son varias, existen fuerzas (Ahmadi, 2016):

- Debido al corte del suelo (ver Figura 2-7 a))
- Debido al arrastre del fondo del arado de la reja
- Debido al desplazamiento del suelo a lo largo de la vertedera
- Debido a la fricción de la tierra en la vertedera

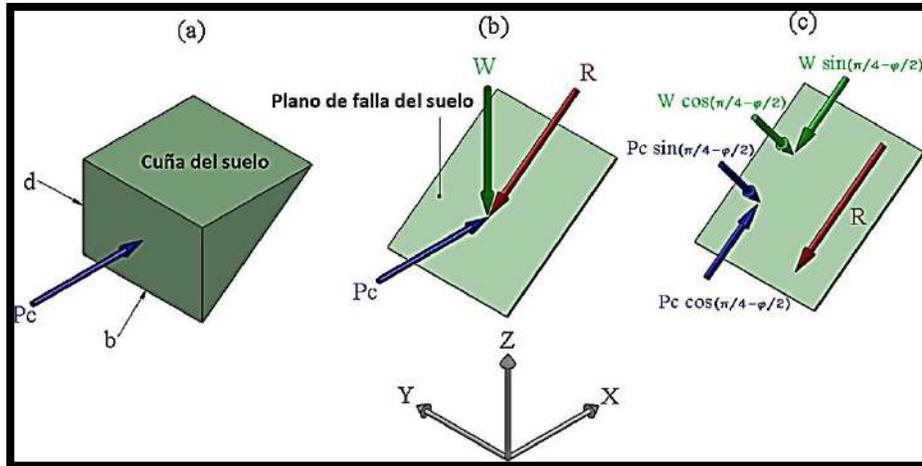


Figura 2-7. Comportamiento del suelo al ser cortado: Traducido de Ahmadi (2016).

Dichas fuerzas se calcularon por medio de la mecánica clásica, la cual menciona el movimiento de la tierra como fluido a lo largo de la vertedera (ver Figura 2-8) y la cohesión del suelo debido a la cantidad de humedad.

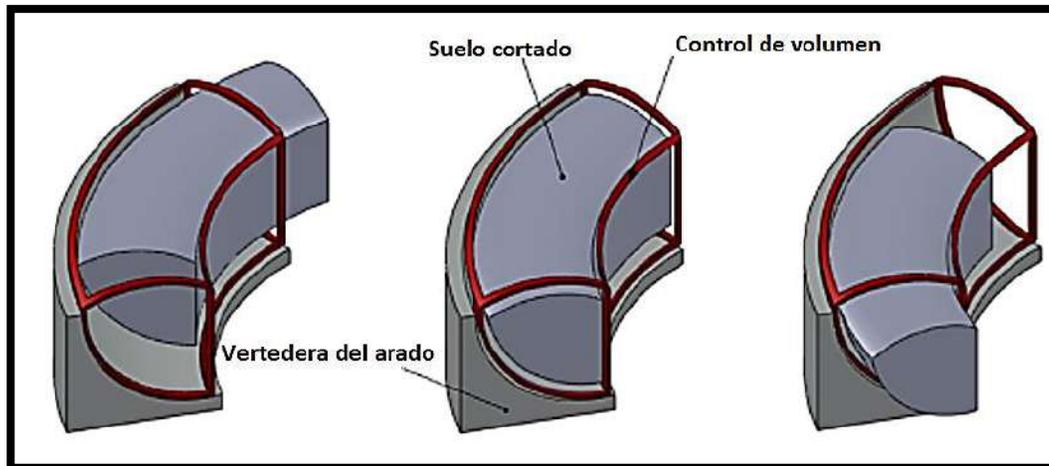


Figura 2-8. Comportamiento del suelo a lo largo de la vertedera: Traducido de Ahmadi (2016).

Para generar un cálculo rápido de las fuerzas que actúan en dicho apero, Ahmadi (2016) muestra una alternativa muy factible para el cálculo de dichas fuerzas, las cuales están relacionadas con las características operacionales del arado y algunas propiedades de los suelos, ya antes mencionadas, que fácilmente pueden ser encontradas en tablas de mecánica de suelos, las fuerzas listadas son: fuerza de tiro debido al corte del suelo, componentes de la fuerza por el desplazamiento del suelo en la vertedera, fuerza de tiro debido a la interacción suelo-metal y la fuerza de tiro en el fondo del arado (ver figura 2-9).

Obteniendo además el cálculo de la potencia requerida del tractor que desempeñará el trabajo de arrastre del implemento, obteniendo fuerzas tanto en el fondo como en la cara principal del modelo, las cuales servirán de apoyo para poder calcular el desempeño del diseño y revisar si el modelo está dentro de sus límites de trabajo establecidos sin presentar fallas mecánicas.

| Outputs | | | |
|---------|---|----------|-------------------|
| Name | Definition | Value | Unit |
| Pc | Draft force due to the soil cutting | 3328.23 | N |
| Pdx | X component of force due to the soil displacement | 76.28 | N |
| Pdy | Y component of force due to the soil displacement | 42.73 | N |
| Pf | Draft force due to the soil-metal friction | 224.53 | N |
| Pu | Draft force of a plow bottom | 3629.04 | N |
| DP | Required power of a plow bottom | 3.63 | kW |
| Ps | Specific draft of the moldboard plow | 5.76 | N/cm ² |
| P | Draft force of the moldboard plow | 3.63 | kN |
| DPR | Power requirement of the plow | 3.63 | kW |
| R | Soil shearing resistance | 2795.19 | N |
| R' | Soil shearing resistance | 2790.55 | N |
| C | Real cohesion | 14137.25 | |

Figura 2-9. Cálculo de las fuerzas de interacción en el fondo y cara de la vertedera.

2.5 Dinámica de Fluidos Computacional

La Dinámica de Fluidos Computacional es una rama de la mecánica de fluidos la cual se apoya de algoritmos y el uso de métodos numéricos para dar solución y analizar problemáticas sobre el flujo de fluidos (Tu et al., 2018). ANSYS Discovery AIM R1 2020, se apoya de dichos métodos para resolver las ecuaciones que gobiernan los modelos matemáticos en la simulación, de forma general es un software de ingeniería avanzada para la simulación del comportamiento de los productos manufacturados y procesos industriales, el estudio en curso está especialmente dedicado a los fluidos en movimiento y cómo su comportamiento influye en los procesos que interfieren en la interacción del flujo del fluido en curso con la estructura del diseño planteado como cara de contacto. Con este método se reducen sustancialmente los tiempos de producción y los costes en comparación con un trabajo basado en la experimentación, ofrece además la capacidad de resolver una gran variedad de problemas de flujo entendiendo de una mejor forma el enfoque analítico.

Una de las aplicaciones del método CFD es como una herramienta de investigación, ya que puede emplearse para comprender mejor los eventos o procesos físicos que ocurren en el flujo de fluidos alrededor y dentro de los objetos de estudio, de igual manera puede usarse como una herramienta educativa ya que con los conceptos esenciales es posible hacer crecer los conocimientos del estudiante con aplicaciones del mundo real, siendo una herramienta de diseño muy completa para enfrentarse a las limitantes del mercado laboral. Algunas de las áreas de aplicación del método CFD son las siguientes, Aeroespacial, Ingeniería Automotriz, Ingeniería Biomédica, Procesamiento Químico y Mineral, Ingeniería Civil y Ambiental, Metalurgia, Generación de Energía y Energías Renovables, Deportes y otras donde se presenta la interacción de fluidos en un entorno controlado.

El procedimiento de solución del método de CFD ha evolucionado a lo largo del tiempo ya que todas las habilidades y el conocimiento adquirido ha sido otorgado por los que ya han realizado simulaciones anteriormente, ya que a diario se puede mejorar la simulación, es necesario aprender más y practicar para crecer como un experto en el ámbito. Además, un aspecto importante es el software (ANSYS Discovery AIM R1 2020) ya que debe tener una interface fácil de entender y de utilizar, en la cual el usuario podrá introducir los parámetros de sus problemas y podrá observar los resultados. Los tres principales elementos dentro de un marco de análisis en CFD está ilustrado en la Figura 2-10. Dicho de este modo, el preprocesamiento, es donde se define la geometría con la cual se va a trabajar, el mallado comprende la división de la geometría de control en varios trozos muy pequeños, se intercambia el dominio continuo por un dominio discreto, donde un conjunto de volúmenes de control es utilizado para representar el dominio original, se deben definir de igual manera las propiedades del material del modelo y las condiciones iniciales, lo cual genera un modelo con restricciones, tal como si estuviera en el mundo real.

Además de incluir las propiedades del fluido con el que se va a trabajar, también es necesario seleccionar el modelo de simulación, ya sea un modelo de turbulencia, erosión, impacto, radiación, etc., lo cual permitirá resolver las ecuaciones que gobiernan el modelo y poder iterar la solución hasta que tenga convergencia, todo esto en el solucionador, lo cual depende de las ecuaciones de estado para cada física a resolver por medio de los Elementos Finitos y el uso métodos numéricos para dar solución a las ecuaciones diferenciales y matriciales.

En el Postprocesamiento se despliegan por medio de gráficos 2D y figuras en 3D los resultados, de forma general los mejores medios para entregar una vista llamativa con los rangos pertinentes en cada resultado calculado, son los gráficos de contorno, en los cuales es muy sencillo identificar un trazo de colores, rangos que por medio del diseño difuminado con una escala de la magnitud calculada a un

lado, establece rangos de mayor a menor de las principales zonas de afectación en los cálculos de los estudios mecánicos, choque de partículas y la tasa de erosión.

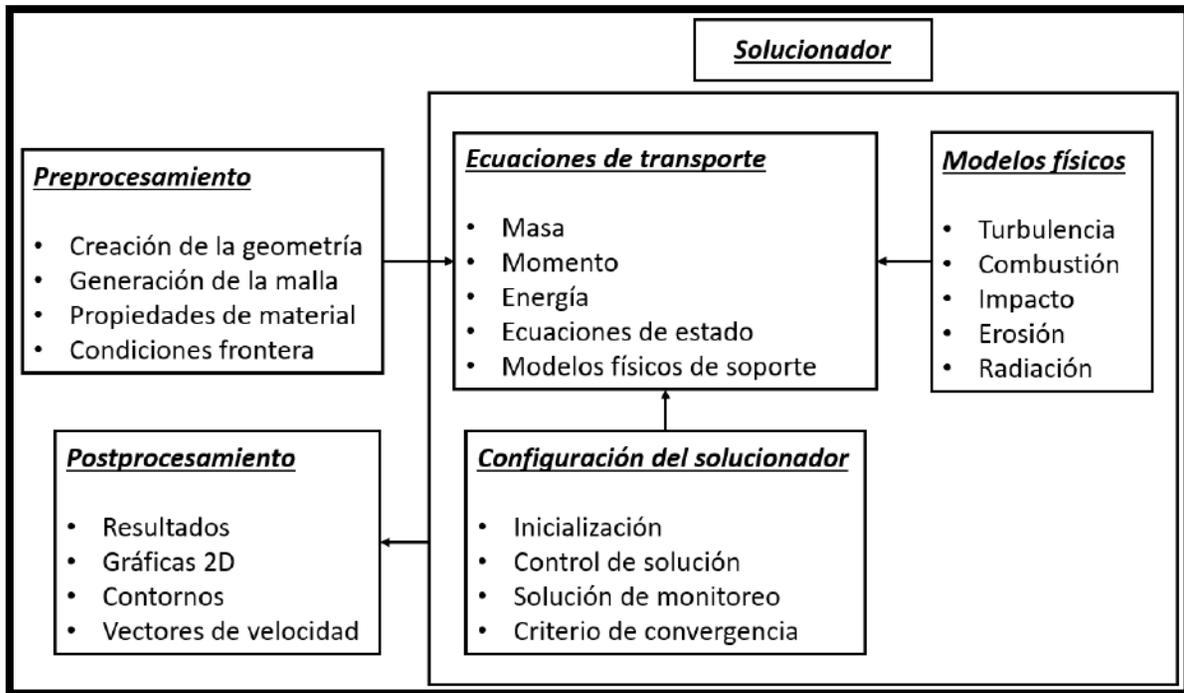


Figura 2-10. Las funciones de interconectividad de los tres elementos principales dentro de un análisis CFD: Traducido de Tu et al. (2018).

El método CFD se basa fundamentalmente en las ecuaciones que gobiernan la Dinámica de Fluidos. Representando enunciados matemáticos de las leyes de conservación de la física:

- La masa se conserva para el fluido.
- Segunda ley de Newton, la tasa de cambio del momentum es igual a la suma de fuerzas que actúan sobre el fluido.
- Primera ley de la termodinámica, la tasa de cambio de energía es igual a la suma de la tasa de adición de calor y la tasa de trabajo realizado en el fluido.

Basándose en las ecuaciones de conservación de la masa, balance de fuerzas y conservación de la energía respectivamente. En el entorno computacional CFD se usa una ecuación genérica la cual es una equivalencia de todas las ecuaciones mencionadas con anterioridad, dicha equivalencia es comúnmente llamada ecuación de transporte, la cual está representada por la ecuación (1).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \Phi dV + \oint_A \rho \Phi V dA = \oint_A \Gamma_\Phi \nabla \Phi dA + \int_V S_\Phi dV \quad (1)$$

Todas las ecuaciones de conservación resueltas en la parte iterativa del método CFD poseen una forma parecida con cuatro términos: el término de tiempo, que indica un cambio de velocidad o aceleración en el fluido, el término advectivo, refiriéndose a la distribución espacial de solutos, el término difusivo, que es el cambio de concentración de un punto a otro dependiendo el volumen recorrido y el término fuente, generando el desplazamiento de volumen. Para representar diferentes ecuaciones de conservación se alteran sólo tres componentes de la ecuación, siendo ρ la densidad del fluido, la variable Φ que representa todas las ecuaciones de flujo de fluido, el coeficiente de difusión Γ y la fuente S . Siendo una fórmula muy utilizada en las aplicaciones CDF, se sabe además que hasta el momento no existe una solución analítica de dicha representación, es por eso que se recurre a los métodos numéricos para aproximar el resultado y poder llegar a un criterio de convergencia adecuado para poder mostrar resultados convincentes.

2.6 Desgaste por erosión

Según González (2013) el desgaste puede ser definido como un proceso donde el material es desprendido de una o de ambas superficies que se encuentran en contacto, ocurriendo cuando éstas se encuentran en movimiento relativo una de la otra. La clasificación del desgaste toma dos aspectos a consideración; el primero es basado en cómo ocurre el desgaste en las piezas o componentes, como pueden

ser picaduras, degradación y estriación entre otras. El segundo aspecto utilizado, toma a consideración las bases del mecanismo o acción tribológica. Dentro de los principales mecanismos de desgaste se encuentran: abrasión, adhesión, corrosión, erosión, fatiga y oxidación.

Para el caso de estudio de la vertedera se tiene un desgaste por erosión el cual se basa en la tasa de desgaste por erosión (Adedeji, 2019), que es el índice de pérdida de material de una superficie impactada por partículas sólidas, depende tanto de la dinámica e interacciones fluido-partícula como de las propiedades del objetivo de erosión. Estas propiedades incluyen velocidad de impacto de partículas, ángulo de impacto de partículas, índice de masa de partículas, tamaño y densidad de partículas, forma y rugosidad de partículas, dureza de partículas, rugosidad del material objetivo y dureza del material objetivo, al igual que el tipo de material el cual se está erosionando (ver Figura 2-11).

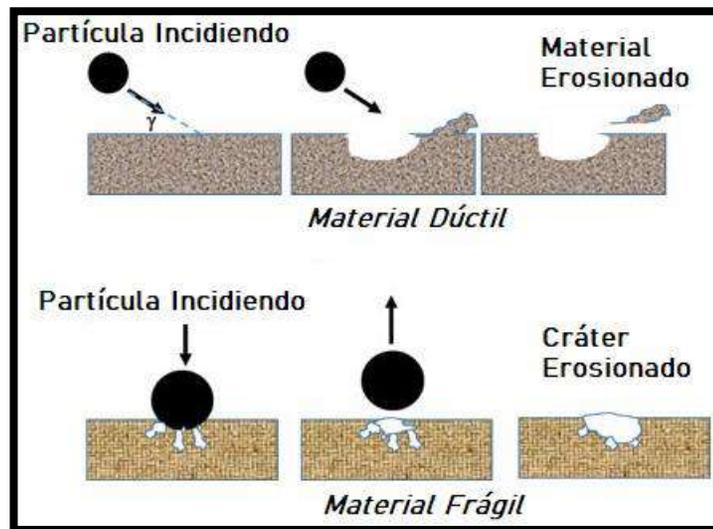


Figura 2-11. Características de erosión en materiales dúctiles y frágiles (Oka, 2005).

Muchos modelos de erosión toman la forma general la cual se calcula por la ecuación (2).

$$E_{ratio} = \dot{m}p [CV_p^n f(\alpha)] \quad (2)$$

Donde, $\dot{m}p$ es la tasa de masa de partículas, Vp y α son la velocidad y el ángulo de impacto de las partículas respectivamente, $f(\alpha)$ es una función del ángulo de impacto y n es el exponente de la velocidad de impacto de las partículas (ver ecuación (3b)), que depende de las propiedades de las partículas y de la dureza del material objetivo Hv . Además, C es una constante que puede depender de las propiedades de la erosión, las propiedades del material objetivo y/o las características geométricas. La relación de erosión adimensional viene dada por la ecuación 2 entre corchetes.

$$E_{ratio} = CV_p^n f(\alpha) \quad (3)$$

$$n = 2.3(Hv)^{0.038} \quad (3b)$$

Considera la propiedad de dureza (Vickers) del material objetivo, lo que lo hace útil para diferentes combinaciones de material erosionante-objetivo. $C = C_{GCF}$ lo cual representa un factor de corrección de geometría, para geometrías complejas su valor es 2.5. La función del ángulo de impacto está definida en la ecuación 4.

$$f(\alpha) = (\sin \alpha)^{n1} (1 + Hv(1 - \sin \alpha))^{n2} \quad (4)$$

$$n1 = 0.71(Hv)^{0.14} \quad (4a)$$

$$n2 = 2.4(Hv)^{-0.94} \quad (4b)$$

Donde los exponentes $n1$ y $n2$ como se muestra en las ecuaciones 4a y 4b, también dependen de la dureza del material objetivo. De este modo se puede calcular de forma analítica la tasa de desgaste por erosión con las características principales de las partículas y del material el cual tiene contacto con las partículas.

3. METODOLOGÍA

La metodología que se seguirá para la realización del proyecto está determinada por el siguiente diagrama (ver Figura 3-1), los cuales se describirán a continuación para explicar los pasos y características a seguir para cada uno de ellos.

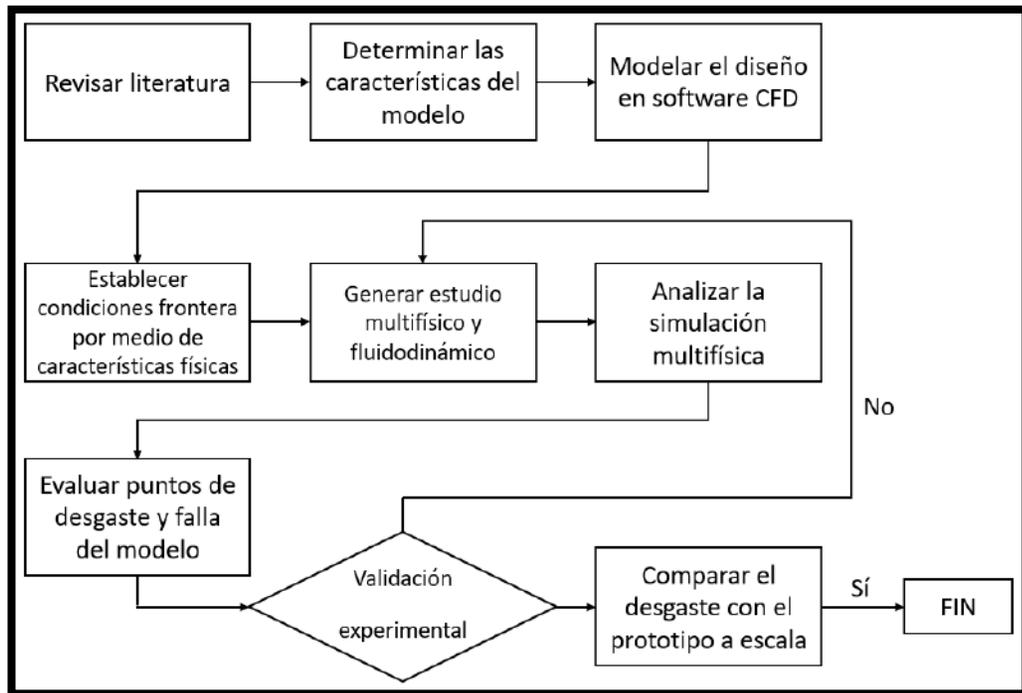


Figura 3-1. Metodología seguida.

3.1 Estudio multifísico

Como se observa en el diagrama anterior el punto principal es la revisión de la literatura lo que dará pauta para determinar lo que hoy en día se ha desarrollado en torno a la simulación por medio de la Fluidodinámica Computacional y los avances relacionados a la erosión en materiales o en algunos dispositivos. Las variables del diseño a estudiar giran en torno a las propiedades físicas del material,

el cual es un acero al carbón que cumpla las características de dureza del arado conforme a la normativa internacional ISO 5718, por otro lado, están las características del suelo, las cuales principalmente serían tamaños de las partículas y velocidad de impacto en el material, de forma general son características físicas que posee el suelo de una zona en específico y que de igual manera propiedades del material del arado con el que se fabrica, de este modo se pueden determinar las condiciones frontera a las cuales el modelo estará sometido. Las condiciones frontera simulan las restricciones que puede presentar el modelo de forma física, de este modo se pueden tomar los comportamientos físicos reales en el entorno de simulación, para resolver las ecuaciones de cada parte de la malla y ver las interacciones del fluido con la física del modelo diseñado y las afectaciones presentadas.

Previo a la generación del estudio es necesario diseñar cada uno de los modelos a utilizar, haciendo uso del software SolidWorks, para poder generar la pieza e importarla al espacio de modelado CAD de ANSYS (SpaceClaim), donde se le realizará una eliminación de geometría excesiva para evitar entorpecer el análisis computacional, esto será explicado en la etapa del mallado de las piezas más adelante.

Los estudios serán realizados en un software de Fluidodinámica Computacional (ANSYS Discovery AIM R1 2020) basado en la teoría de los elementos finitos, el cual es un software de simulación multifísica, lo que lleva a mencionar que la multifísica implica la relación de entidades y de sus físicas, para este caso de estudio la inyección de partículas en un entorno controlado llevará a la interacción del flujo con la estructura digital del arado modelada previamente en un software de diseño CAD, entonces el flujo de partículas impactará en la cara de la vertedera, generando zonas de desgaste en el material y esfuerzos causados por el impacto del fluido. Para analizar la simulación y la afectación en general, se tienen resultados puntuales de cada caso, se podrán observar las velocidades que presenta el flujo,

así como las líneas de impacto de las partículas, en conjunto se podrán verificar los puntos de desgaste principales en el modelo y los esfuerzos en la estructura, esto para evaluar el daño sufrido durante la simulación.

Se usará el modelo de Oka et al. (2005, a) mostrado en la fundamentación teórica para calcular la tasa de erosión de forma analítica y observar la comparativa de los resultados mostrados por las simulaciones realizadas en software de Fluidodinámica Computacional, usando los resultados obtenidos del comportamiento de las partículas es que se podrá validar la tasa de erosión de un sistema con el otro. De igual manera se busca encontrar las zonas de mayor incidencia del desgaste por erosión debido al choque de las partículas y evaluarlas en un prototipo físico a escala, para observar similitudes tanto en la simulación como en el trabajo físico del arado, se realizará una simulación en relación con la velocidad de inyección de las partículas y del ángulo de corte del arado que se seleccione, de este modo se pretende calcular el ángulo de mayor afectación por el choque de las partículas, además de calcular los puntos en la cara del arado donde el desgaste se presenta más y compararlo con el estudio experimental a escala, lo anterior para corroborar que la simulación es una alternativa y banco de pruebas con el cual se pueden calcular estos puntos críticos de desgaste.

3.1.1 Modelado de la vertedera universal a escala y mallado

Primero se modeló la pieza que sirvió para la simulación mecánica, la escala del modelo se desarrolló en el espacio de diseño de SpaceClaim, para poder generar un modelo limpio en su geometría, es necesario retirar componentes que no sirven para el estudio, como chaflanes o curvas que interfieran en el mallado, por lo general se hace una optimización de la geometría para evitar el entorpecimiento de la carga computacional al momento de aplicar las ecuaciones de estado y calcular las respuestas de cada estudio, la Figura 3-2 muestra el diseño a escala

utilizado tanto para la simulación como para la validación experimental, en el cual se seleccionó aluminio 6061 como material base.

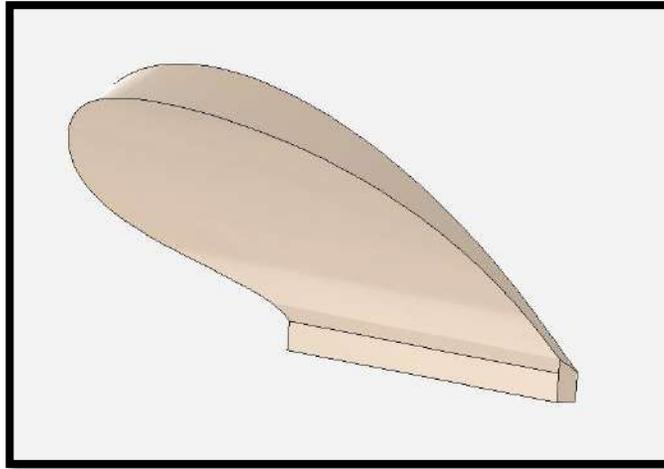


Figura 3-2. Vertedera a escala usada para estudio mecánico.

Por otro lado, fue necesario realizar un entorno para simular el espacio donde las partículas y el fluido puedan interactuar y así analizar el comportamiento del choque de las mismas en relación a la vertedera. Este entorno se realizó por medio de la herramienta Recinto, lo cual envuelve la pieza en su interior y crea una geometría apta para delimitar la zona del estudio fluidodinámico con el mecánico, generando una superficie de contacto entre cada entorno y poder hacer una interacción de las físicas del estudio, como puede observarse en la Figura 3-3 A) el recinto es el modelo en el cual las partículas y el fluido actuarán libremente, mientras que la unión de ambas piezas tanto el recinto como la vertedera (ver Figura 3-3 B)) se utilizaron para el estudio multifísico, donde interactúan las partículas que tienen incidencia en la cara de la vertedera.

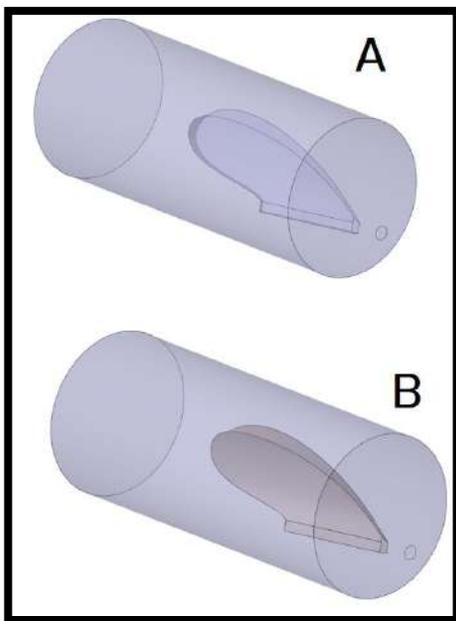


Figura 3-3. A) Recinto para el estudio fluidodinámico y B) Recinto y vertedera a escala unidos.

Previo al análisis, la selección de las condiciones frontera y materiales de las geometrías, es necesario establecer una malla en ambos diseños, el mallado es la discretización del volumen de control de cada uno de los sólidos o diseños a utilizar, en donde se establecen pequeños volúmenes de control de diversos tamaños y formas dependiendo de las ecuaciones a resolver, por un lado los elementos utilizados en la geometría del estudio mecánico son tetraédricos, se generaron de forma automática 4316 elementos y 7403 nodos de interacción (ver Figura 3-4 A)), al ser una estructura simple y sin geometrías complejas no es necesario tener más elementos, de otro modo la convergencia de las operaciones matriciales tardarían más y entorpecería la generación de resultados, por lo que no es necesario un mallado fino para obtener los mismos resultados mecánicos de la estructura. El material aplicado se puede observar en la Figura 3-4 B), teniendo características tanto visuales como mecánicas del aluminio 6061.

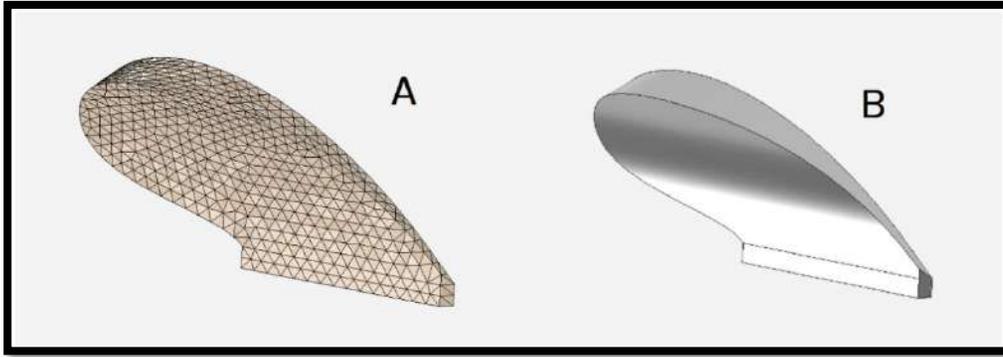


Figura 3-4. A) Mallado de la vertedera a escala y B) Vertedera a escala en aluminio 6061 establecido en ANSYS.

Para el caso de la geometría del estudio fluidodinámico fue necesario utilizar elementos hexaédricos, los cuales generan una mejor interacción en la inyección de las partículas y no se pierde información en las orillas del sistema o entorno por donde se desenvuelve el movimiento de las partículas (ver Figura 3-5), para esta malla los elementos generados fueron 97696 y los nodos 32169, cabe mencionar que se pueden generar más elementos de malla pero la licencia estudiantil restringe la generación de dichos elementos, pero de igual manera no es necesario establecer una malla tan fina para poder calcular la convergencia de los resultados, además con una malla más fina crecería el cálculo computacional y haría más lento el proceso. El orificio marcado con el círculo rojo de la Figura 3-5 A) simula la salida de la boquilla de *Sandblast* siendo por donde se escapa el flujo de partículas y tenderá a chocar con la estructura de aluminio a escala (Figura 3-5 B)).

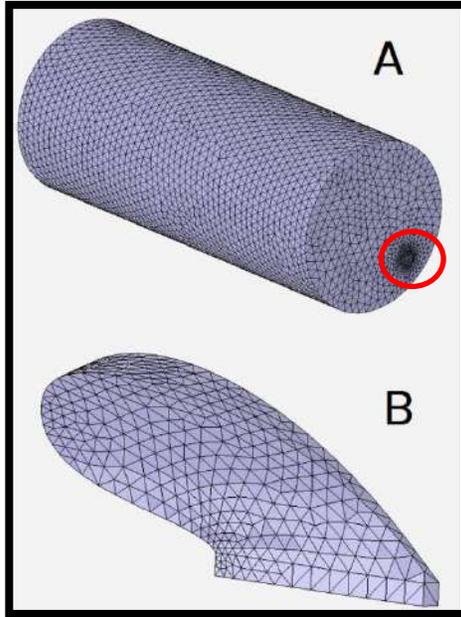


Figura 3-5. A) Mallado externo del volumen de control a escala y B) Mallado interno del volumen de control a escala.

Una vez generada la malla es necesario establecer los materiales para cada geometría, en el caso del estudio mecánico se utilizó un Aluminio 6061 para la vertedera. En el estudio fluidodinámico se establecieron dos tipos de materiales, uno para el entorno y otro para las partículas, para el entorno se seleccionó aire como fluido predominante (ver Figura 3-6 A) y B)), en el cual las partículas estarán moviéndose, las partículas por otro lado se seleccionaron por medio del material abrasivo que se utilizó, en este caso óxido de aluminio con un tamaño establecido de 0.0001 m de diámetro y una velocidad de inyección de las partículas de 7 m/s, además de características de inyección se usó un flujo másico de 0.004402 Kg/s respectivamente, el cual fue calculado con la masa desplazada en cada experimento de desgaste y con el tiempo que tardaba en desplazar esa masa, respectivamente se utilizó 2.1 Kg de óxido de aluminio y 7.95 min para cada prueba de desgaste de sandblasteo.

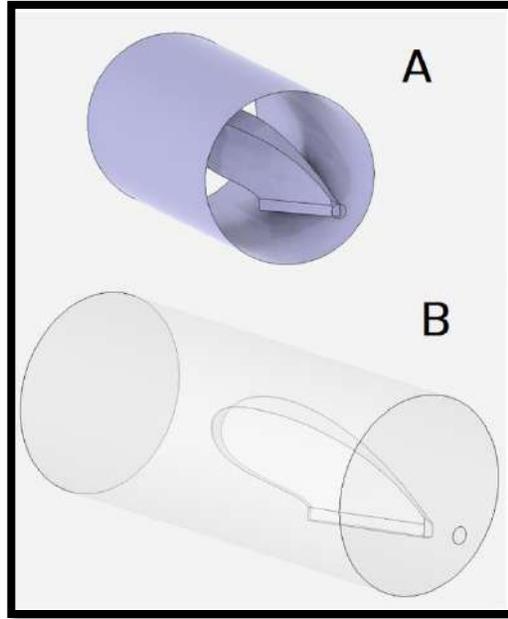


Figura 3-6. A) Entorno fluidodinámico a escala con vista interna y B) Selección del fluido a usar (Aire).

3.1.2 Modelado de la vertedera universal y mallado

El modelo utilizado para la simulación a escala real se importó desde un diseño realizado previamente en SolidWorks, en el cual se aplicarán los estudios necesarios para comprobar la integridad mecánica del diseño y determinar los puntos de falla que intervienen al momento de la inyección de las partículas en contacto con la cara principal, como puede observarse en la Figura 3-7 es un diseño con una geometría esbelta que se asemeja a los modelos de vertedera universal que existen en el mercado. De igual manera se realizó una limpieza de geometría excesiva para un cálculo más sencillo y sin demoras.

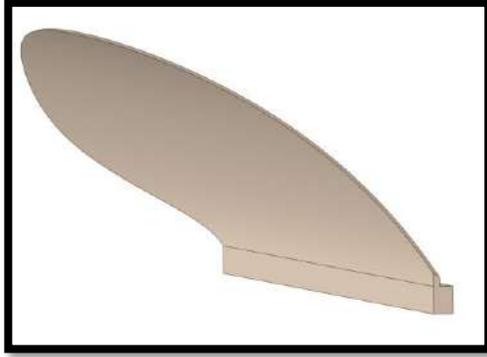


Figura 3-7. Vertedera usada para estudio mecánico.

De igual manera que en el caso de la vertedera a escala se realizó un Recinto para poder tener las dos físicas de la geometría a escala real, como puede observarse en la Figura 3-8 A) la geometría corresponderá al entorno donde las partículas fluirán y en la Figura 3-8 B) se observa tanto el componente mecánico como el entorno fluidodinámico, ahí será donde interaccionen tanto las partículas como la física del arado a escala real y se observarán las afectaciones. Dejando en este caso la cara frontal del cilindro como la entrada de las partículas, ya que es la entrada del arado contra el suelo en el campo donde se trabajaría de forma real el desplazamiento de la materia orgánica y la tierra.

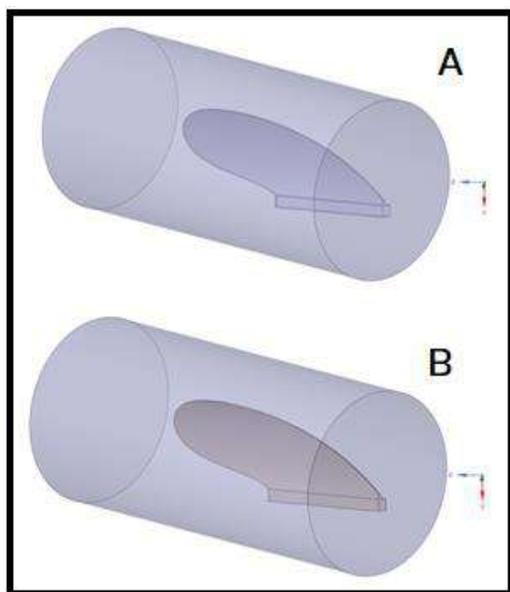


Figura 3-8. A) Recinto para el estudio fluidodinámico y B) Recinto y vertedera unidos.

El mallado se realizó de forma automática con los componentes tetraédricos que el mismo software ya ofrece por defecto, en este caso se calcularon diferentes números de elementos y nodos, se generaron de forma automática 1997 elementos y 4223 nodos de interacción (ver Figura 3-9 A)), de este modo se obtiene una geometría mecánica simple y sin geometrías complejas pudiéndose adaptar la malla sin ningún problema pero disminuyendo en elementos, ya que el modelo es más simple que el de la validación, por otro lado en la figura 3-9 B) se observa el arado con el material 1045 establecido en ANSYS.

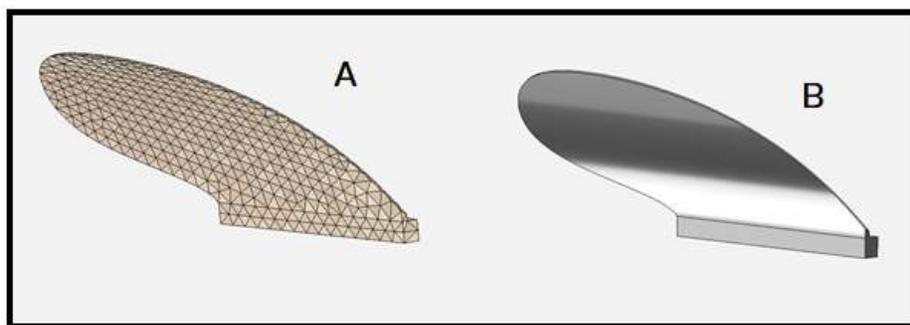


Figura 3-9. A) Mallado de la vertedera y B) Vertedera en acero 1045 establecido en ANSYS.

Al ser una geometría de entrada diferente se optó por utilizar una malla adaptable con frontera delgada para poder apreciar el comportamiento más a detalle de las partículas de entrada (ver Figura 3-10 A) y B)), para esta malla los elementos generados fueron 85354 y los nodos 28154, de igual manera el cálculo de la malla debe ser preciso ya que por la licencia estudiantil puede que no deje generar un número de elementos mayor, para el caso realizado no hubo ningún problema de generación de la malla ya que se utilizó la adaptabilidad, en caso de ser necesario se puede generar un mallado puntual para observar sólo alguna zona específica del fluido y sus características tanto mecánicas como de movimiento, pero para el caso seleccionado la selección es la adecuada.

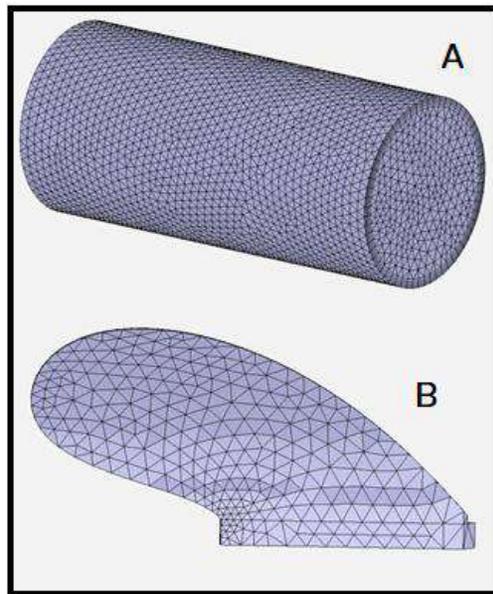


Figura 3-10. A) Mallado externo del volumen de control y B) Mallado interno del volumen de control.

Ya establecida la malla es necesario seleccionar los materiales para cada geometría, en el caso del estudio mecánico se utilizó un acero 1045 para la vertedera, dicho acero tiene las características necesarias establecidas en la norma ISO 5718 lo cual nos establece la dureza de los implementos agrícolas. En el estudio fluidodinámico se establecieron dos tipos de materiales de igual manera, uno para el entorno y otro para las partículas, para el entorno se seleccionó agua como fluido predominante (ver Figura 3-11 A) y B)), en el cual las partículas estarán moviéndose, las partículas por otro lado se seleccionaron con un tamaño establecido de 0.0001 m de diámetro y con la densidad específica de 0.84 Kg/m³, además de características de inyección como la velocidad y flujo másico de 2.5 m/s y 2 Kg/s respectivamente.

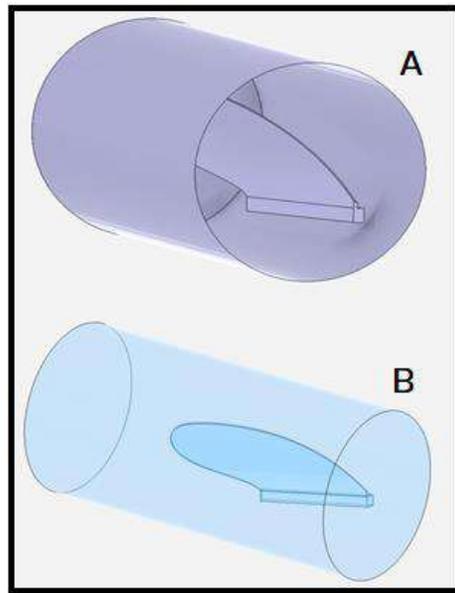


Figura 3-11. A) Entorno fluidodinámico con vista interna y B) Selección del fluido a usar (Agua).

3.2 Fabricación del prototipo escala

El prototipo se fabricó en el taller de la Facultad de Ingeniería en San Juan del Río, con las herramientas presentes en el laboratorio y con las medidas de seguridad establecidas el reglamento del laboratorio, de igual manera el equipo de seguridad necesario se usó para evitar accidentes durante cada uno de los trabajos a realizar en dicho laboratorio, lo que comprende uso de bata, zapatos de seguridad, lentes de seguridad según sea el caso y ropa de algodón, en todo momento se pretenden realizar las labores bajo la condiciones de seguridad que ahí se establecen y utilizar las herramientas de la forma correcta para evitar su deterioro. En el transcurso del desarrollo de las simulaciones se trabajó en un lugar seguro y libre de personas que puedan llegar a interrumpir el transcurso de las iteraciones, de este modo se evitaron retrasos en el trabajo.

Para poder elaborar el prototipo previamente fue necesario hacer una base en 3D (ver Figura 3-12 A)) para poder realizar un molde en yeso (ver Figura 3-12 B)) en el cual fuera posible realizar el vaciado de aluminio y obtener el diseño a escala, de igual manera con materiales reciclados del laboratorio de Electromecánica del Campus, se realizó por medio de unión de soldadura GMAW (del inglés Gas Metal Arc Welding) un crisol (ver Figura 3-12 C) y D)) en el cual se fundió el aluminio 6061 que se utilizó para conformar el arado a escala, todo proceso de manufactura se realizó dentro del laboratorio de Electromecánica y con las medidas de seguridad necesarias para evitar accidentes, supervisado además por el responsable del taller en turno en ese momento.

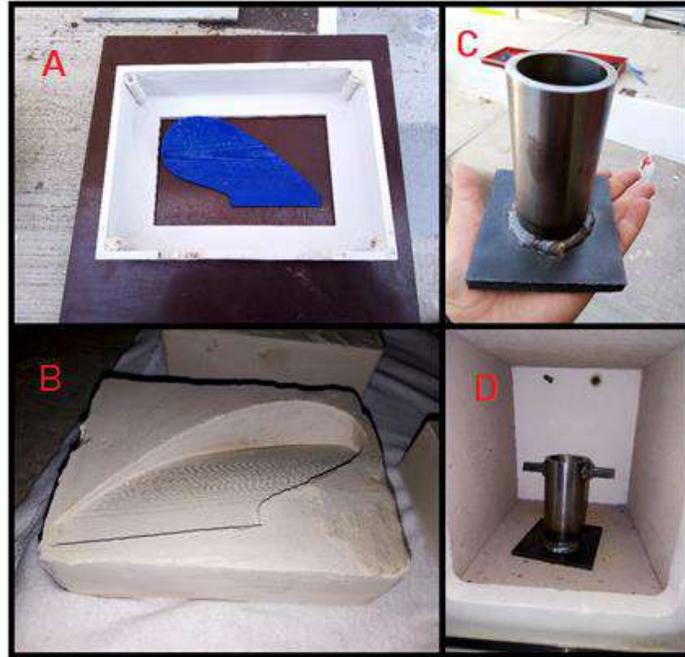


Figura 3-12. A) Base impresa en 3D para elaborar el molde de yeso B) Molde de yeso para realizar el vaciado C) Fabricación del crisol para la fundición y D) Crisol listo para iniciar el proceso de fundición de aluminio.

Una vez que se tiene el molde de yeso preparado se procedió a realizar la fundición del aluminio 6061 para poder realizar el vaciado, la mufla con la que cuenta el laboratorio tiene características de temperatura de hasta 980°C, además de tener un control variante para seleccionar la temperatura dependiendo la necesidad, en este caso el aluminio tiene un punto de fusión de 660°C (ver Figura 3-13 A)) por lo que se precalentó el horno 10°C más para poder obtener el material en su estado líquido (ver Figura 3-13 B)).



Figura 3-13. A) Pre calentado de la mufa a 670°C y B) Aluminio fundido previo al vaciado.

Para realizar el vaciado es necesario que el molde fabricado en yeso esté completamente seco (ver Figura 3-14 A)), sino por causa de la humedad existirán grietas al momento de verter el aluminio y el molde se fracturará por el choque térmico, además se debe manejar el crisol con mucho cuidado con el uso de unas pinzas largas y guantes de asbesto, para evitar que el calor afecte la manipulación (ver Figura 3-14 B)), una vez que se realizó el vaciado se debe esperar un tiempo aproximado de 20 minutos para que el aluminio se enfríe y se pueda posteriormente hacer el desmontaje de la pieza (ver Figura 3-14 C), D) y E)), para acelerar el enfriamiento se aplicó un baño de agua fría y posteriormente se seleccionó la mejor pieza para iniciar el pulimiento y lijado del modelo para adquirir una forma similar al diseño a escala CAD requerido (ver Figura 3-14 F)).

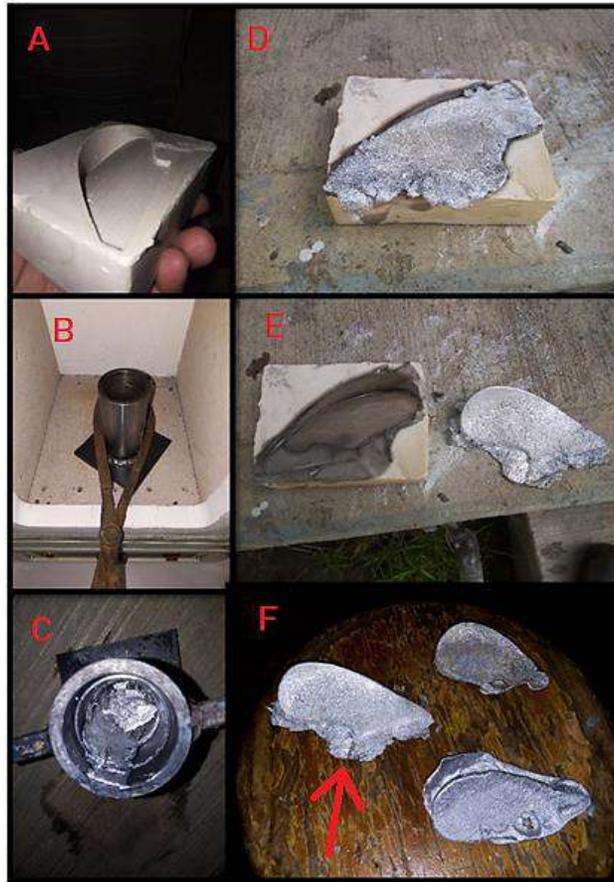


Figura 3-14. A) Molde listo para realizar el vaciado B) Manejo del crisol previo al vaciado
C) Aluminio fundido en el crisol (Sobrante) D) Vaciado realizado en el molde de yeso
E) Desmolde de la pieza vaciada y F) Pruebas realizadas para obtener el mejor prototipo.

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la validación con el prototipo a escala en aluminio y se da una explicación de cada una de las fases llevadas a cabo para poder encontrar una relación de la tasa de erosión calculada de forma virtual con un modelo de erosión establecido y un cálculo analítico del resultado para el análisis de la vertedera universal. Algunos los cálculos obtenidos durante la simulación de choque de partículas sobre la cara de la vertedera modelada en ANSYS SpaceClaim se analizaron de forma separada, mecánicamente y flujo de partículas, a pesar de ser un estudio multifísico.

4.1 Validación del modelo multifísico a escala

El modelo a escala es una representación del arado a tamaño real, pero reducido, en el cual se aplicó un proceso de sandblasteo para acelerar el desgaste y poder observar la zona erosionada, más adelante se comparó el modelo virtual con el modelo físico elaborado con el proceso de manufactura del vaciado de aluminio.

4.1.1 Estudio mecánico multifísico a escala

El flujo de trabajo establecido por ANSYS es el mostrado en la Figura 4-1 en el cual se puede apreciar cada uno de los bloques utilizados para generar el estudio y como se observa en la figura cada uno de los procesos va encaminado a generar las aproximaciones matemáticas de la física que tiene lugar al final de cada simulación, partiendo de una geometría general para tomar como base la física mecánica y fluidodinámica, tanto la física de fluido como estructural comparten características para llevar a cabo la interacción en conjunto de las partículas y la

estructura de la vertedera del arado, calculando cada uno de los resultados descritos más adelante.

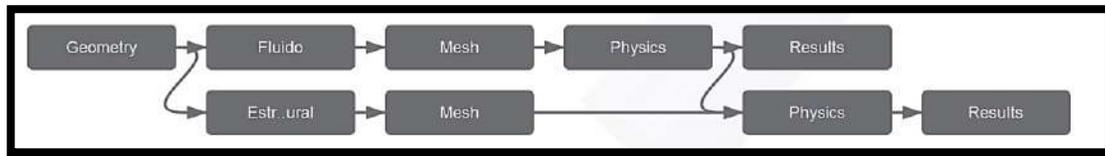


Figura 4-1. Bloques del flujo de trabajo utilizados en ANSYS para resolver la simulación a escala.

Como ya se mencionó, el análisis de los resultados se dividió en el estudio mecánico y flujo de partículas a pesar de compartir geometrías y de ser multifísico, las partículas actúan directamente en la cara de la vertedera a escala, a partir de esta interacción es que se pudieron comprobar tanto el cálculo del factor de seguridad del aluminio 6061 y el cálculo de los esfuerzos en la estructura. El factor de seguridad sirvió para comprobar la integridad del modelo primeramente para saber si es un diseño factible y confiable ante el choque de las partículas por sandblasteo a una velocidad establecida, para este caso el factor de seguridad es mayor a 2 en toda la estructura (ver Figura 4-2), estableciendo un modelo confiable.

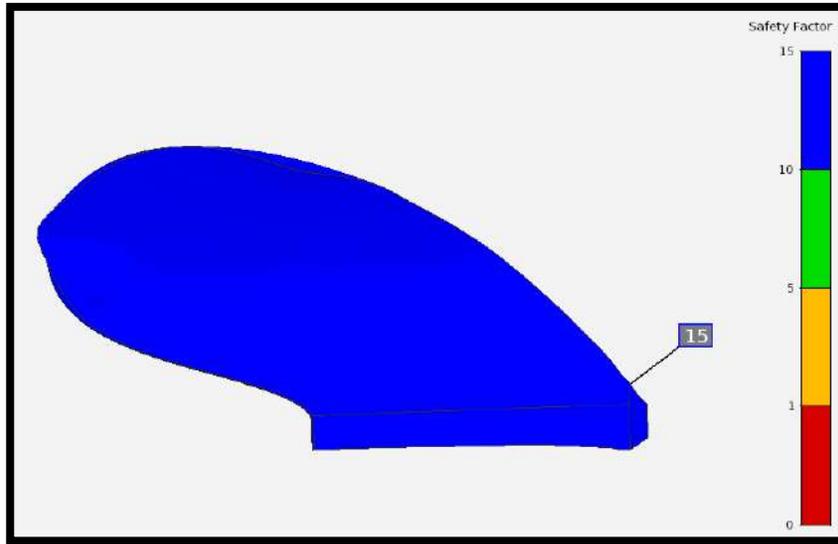


Figura 4-2. Factor de seguridad calculado para la vertedera a escala.

Del mismo modo al aplicar el estudio se calcularon los esfuerzos producidos por el choque de las partículas por sandblasteo en la cara de la vertedera a escala, lo cual por medio de superficies de contacto se observaron las zonas donde las partículas tienen mayor incidencia ante el choque (ver Figura 4-3), los esfuerzos mínimos se encuentran en la parte trasera del ala de la vertedera y los mayores en la zona del impacto principal, los cuales presentan una magnitud de 13.396 Pa lo cual es menor que el esfuerzo último de fluencia del material establecido por 2.5 KPa, generando un modelo confiable ante la velocidad de choque que llevan esas partículas ya que los esfuerzos equivalentes se encuentran por debajo del esfuerzo máximo de fluencia del aluminio 6061.

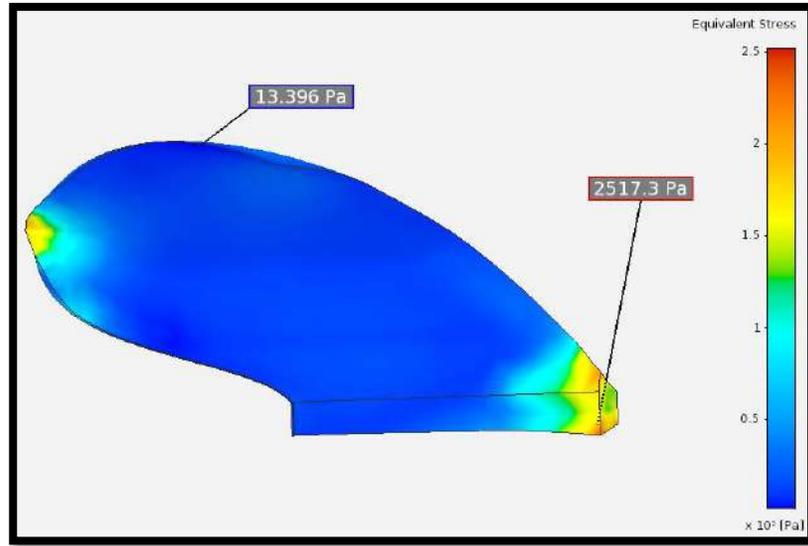


Figura 4-3. Esfuerzos calculados por el choque de partículas en la vertedera a escala.

Por último, se hizo un análisis de fatiga, el diseño entonces debe soportar la carga de trabajo en ciclos mayor a 1×10^6 (ver Figura 4-4), lo que conlleva a reproducir el experimento el número de veces igual a los ciclos mencionados anteriormente, si se cumple se dice pues que el diseño tiene la característica de vida infinita y no fallará por fatiga.

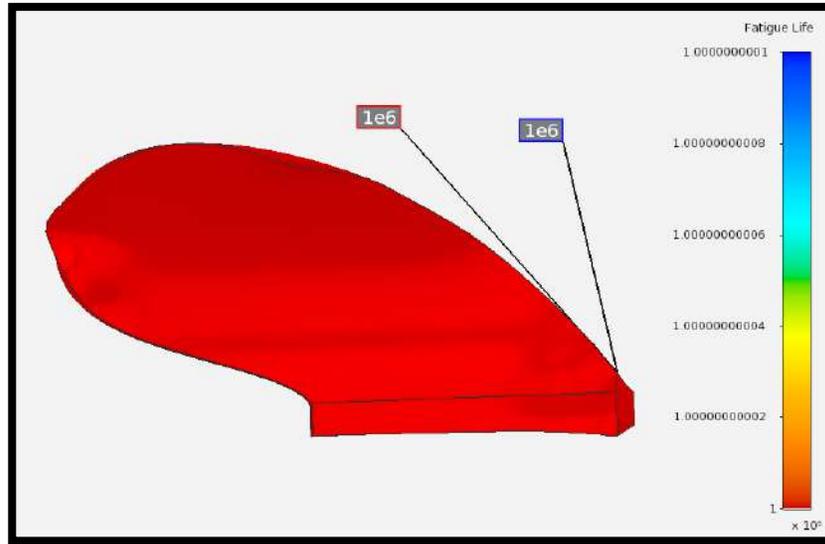


Figura 4-4. Ciclos de fatiga calculados por el choque de partículas en la vertedera a escala.

4.1.2 Flujo de partículas y erosión en el modelo a escala

El efecto que el sandblasteo tiene en contra del modelo a escala es para hacer la validación experimental y comparar los datos conforme a la simulación, en la Figura 4-5 se muestra la zona de mayor incidencia de la entrada del óxido de aluminio por medio de la simulación en ANSYS, es necesario además analizar el comportamiento de las partículas y las zonas donde mayormente se concentra su actividad. En la Figura 4-5 se aprecian los puntos de mayor erosión en la cara de la vertedera a escala al igual que la tasa de erosión por unidad de área, dejando claro que la punta de la vertedera a escala es la que se verá más afectada por el ataque de polvo de óxido de aluminio.

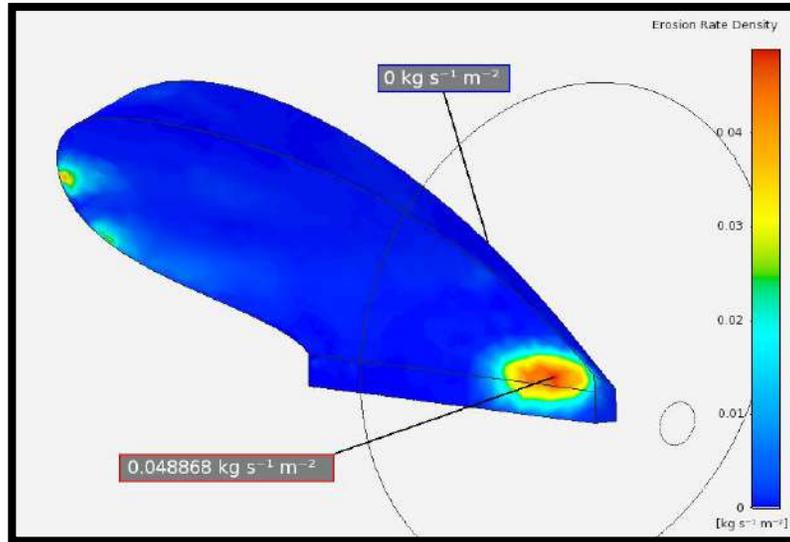


Figura 4-5. Puntos de mayor desgaste en la vertedera a escala y densidad de la tasa de erosión.

Las partículas se introdujeron a la simulación a con un flujo másico de 0.004402 Kg/s, como puede apreciarse en la Figura 4-6 se observa un comportamiento de velocidad de casi 22 m/s lo que genera una visualización de la aceleración de las partículas a la salida de la boquilla de la pistola de sandblasteo, pudiendo calcular que la zona de la punta del modelo a escala es el que se verá mayormente afectado por el impacto de las partículas, pero de igual manera hay zonas a su alrededor en las cuales las partículas interaccionan ya que es una entrada de flujo aleatorio.

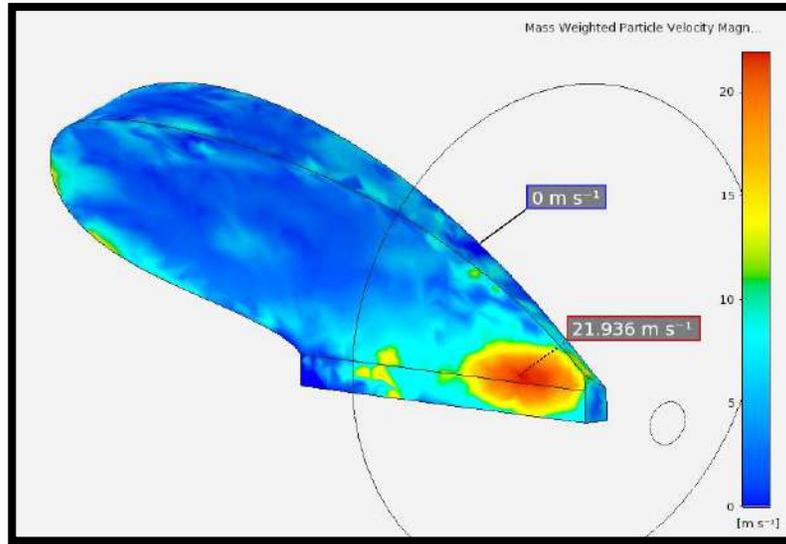


Figura 4-6. Velocidad del choque de las partículas sobre la vertedera a escala.

La presión es una variable que se pudo calcular y es importante para verificar las zonas en las cuales comenzará la aparición de la erosión, ya que son los puntos donde las partículas tienen una mayor interacción con el material de la estructura como puede apreciarse en la Figura 4-7, la punta de la vertedera a escala es una zona de mayor percance y es donde primeramente aparecerá la aparición del desgaste. Lo que corresponde a un cálculo de 103 kPa de presión máxima al momento de rociar con polvo la estructura de aluminio a escala.

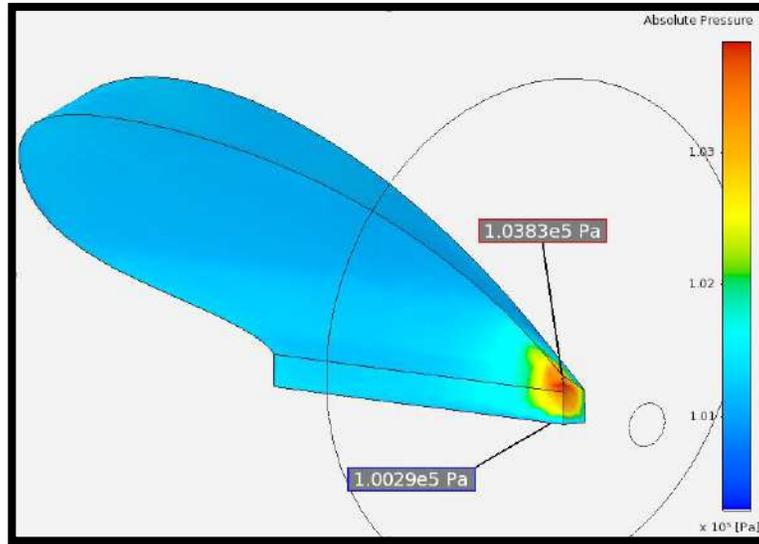


Figura 4-7. Presión absoluta ejercida por las partículas en la cara de la vertedera a escala.

Es importante ver el trayecto de las partículas que se introducen en la simulación, ya que es la representación virtual de la validación experimental, se realizó la simulación del movimiento de dicho flujo másico, en la Figura 4-8 se observa el inicio del trayecto, lo cual representa la salida del óxido de aluminio por la boquilla de la pistola de sandblasteo.

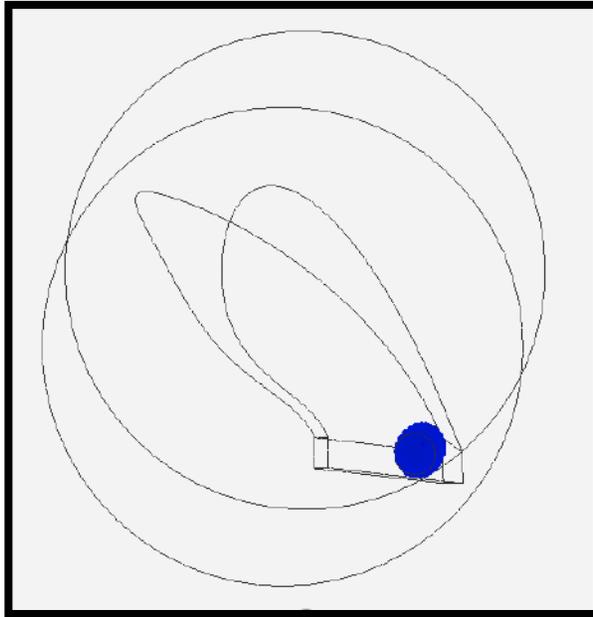


Figura 4-8. Simulación del trayecto de las partículas por la vertedera a escala (salida de partículas de la boquilla de la pistola de sandblasteo).

Después de que las partículas de óxido de aluminio salen por la boquilla se puede apreciar el trayecto que llevan a lo largo de la cara de la vertedera a escala, comprobando el movimiento que tendría el polvo de forma física de este modo por medio de la simulación se pudo observar las zonas en las que las partículas interaccionan con la cara de la vertedera a escala en el estudio de movimiento en tiempo real (ver Figura 4-9).

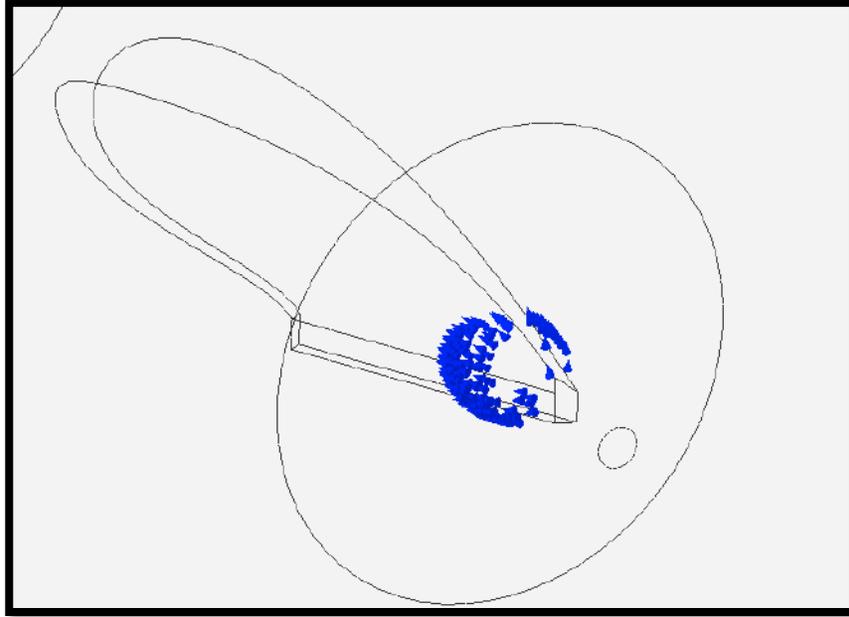


Figura 4-9. Simulación del trayecto de las partículas por la vertedera a escala (impacto del óxido de aluminio).

El trayecto de las partículas continúa hasta que sale del contacto con la estructura, por lo cual la zona trasera del diseño se verá menos afectada de desgaste a causa del material erosionante, pudiendo comprobar que los trayectos de las partículas tienen mayor incidencia al inicio de su movimiento por la estructura y menor afectación en la salida o cola de la vertedera a escala (ver Figura 4-10).

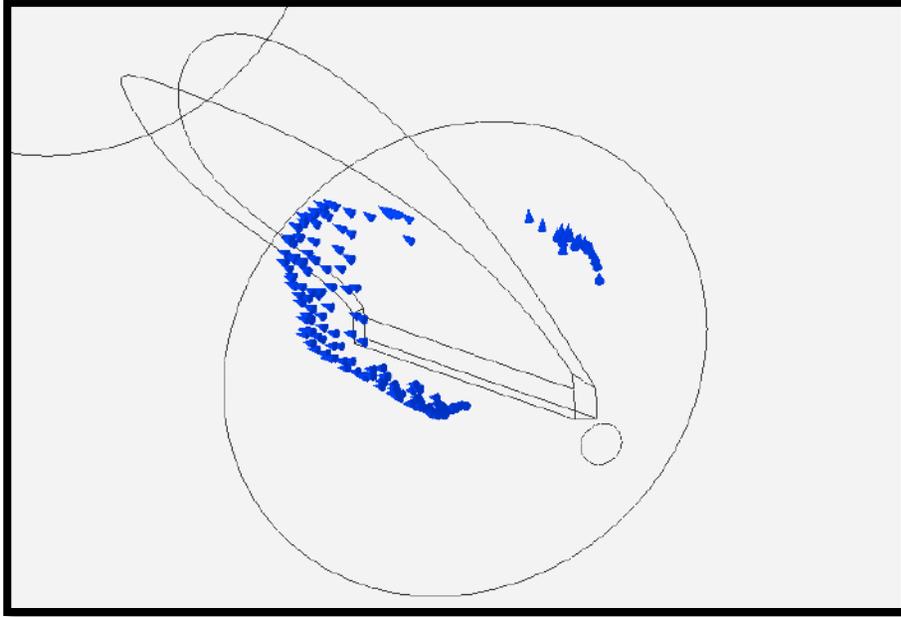


Figura 4-10. Simulación del trayecto de las partículas por la vertedera a escala (movimiento a lo largo de la cara).

4.1.3 Validación experimental en la vertedera universal a escala

Se seleccionó la pieza más completa para pulirla y lijarla, se hizo uso de un mototool y puntas de desbaste para eliminar la escoria y excedentes de la pieza (ver Figura 4-11 A) y B)) posterior a eso se detalló la pieza con lijas de 600 y 1200 Grit para tener un acabado superficial liso en el cual se pueda observar el desgaste o la incidencia del flujo del óxido de aluminio, el erosionante usado para el desgaste sobre la cara principal del prototipo a escala (ver Figura 4-11 C) y D)).

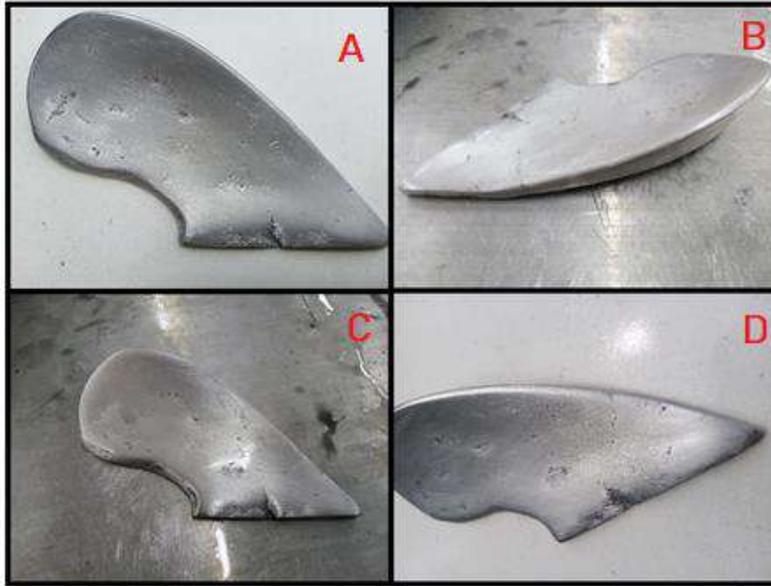


Figura 4-11. A) Prototipo pulido con el uso de mototool B) Pulido con lija de 600 Grit C) Pulido con lija de 1200 Grit y D) Acabado final de la pieza previo al método de erosionado.

Previo al sandblasteo para iniciar el proceso de desgaste de manera experimental, fue necesario la fabricación de una base para que el prototipo pudiera manipularse de una manera libre dentro de la cabina de trabajo, primero se realizó un doble taladrado (ver Figura 4-12 A)) y después un machueado (ver Figura 4-12 B)) para fijar la pieza en la base por medio de tornillos, de este modo se procedió al inicio de erosionado con el óxido de aluminio.

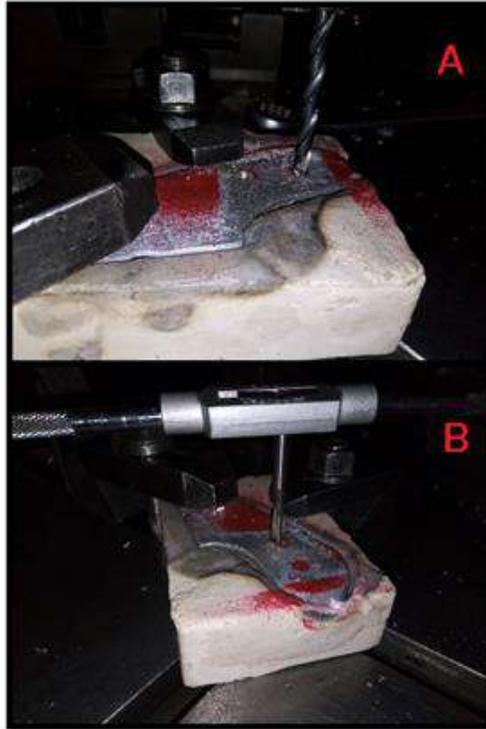


Figura 4-12. A) Taladrado de los orificios en la pieza y B) Machueleado del prototipo para fijar el modelo en una base de soporte.

Para realizar el proceso de desgaste por sandblasteo fue necesario adquirir una pistola de gravedad y óxido de aluminio, la pistola tiene como características, una capacidad de 800 g en su cabina y una presión de operación de 90 PSI (ver Figura 4-13 A)), los cuales se tomaron de un compresor en el taller Automotriz de la Facultad para realizar las pruebas, por otro lado dentro de los erosionantes que se pueden utilizar con la pistola de gravedad es el óxido de aluminio el cual es un erosionante que cuenta con diversos tamaños de grano, eligiendo el grano #100 para la prueba y evitar que el *Sandblast* pudiera atascarse o taparse (ver Figura 4-13 B)).



Figura 4-13. A) Pistola de *Sandblast* utilizada y B) Pesaje del óxido de aluminio (erosionante).

Del mismo modo este proceso se realizó con las indicaciones necesarias y las medidas de seguridad adecuadas de acuerdo a la hoja de seguridad y manejo de materiales del óxido de aluminio, lo cual establece que debe usarse en un lugar cerrado y sin humedad, además de utilizar protección tanto en ojos como en boca para evitar la inhalación de las partículas del polvo. Se utilizó una cabina para la recuperación del polvo posterior a verterlo y realizar su reutilización (ver Figura 4-14 A)), dentro de la cabina se acomodó la base de soporte para el prototipo y se posicionó a 30° para poder iniciar el vaciado del material erosionante sobre la pieza de interés (ver Figura 4-14 B)). Finalmente se procedió a realizar el desbaste de la pieza y poder observar las zonas de erosión (ver Figura 4-14 C) y D)), dichas características serán explicadas a continuación.



Figura 4-14. A) Cabina de sandblasteo B) Prototipo fijo en la base de soporte C) Alineación a 30° previo a la aplicación del erosionante y D) Pieza erosionada.

Para la experimentación de desgaste fue necesario realizar 5 experimentos los cuales están ilustrados en la Tabla 4-1, para cada experimento se realizaron 3 pruebas de vaciado de erosionante, utilizando 2.1 Kg de óxido de aluminio a una presión de salida de 90 PSI y 477 segundos para cada experimento, logrando retirar 0.1 g por cada experimento. Como puede observarse en la Figura 4-15 las fases de erosionado son claras y muy notorias en el inciso A) puede apreciarse el prototipo sin ningún experimento de erosionado, mientras que en el inciso B) y C) ya se presenta la pérdida de la capa de pulido, finalmente el inciso D) presenta un notorio

desgaste con la aparición de pequeños orificios en la estructura del prototipo de aluminio, eliminando un total de 0.5 g con la experimentación realizada.

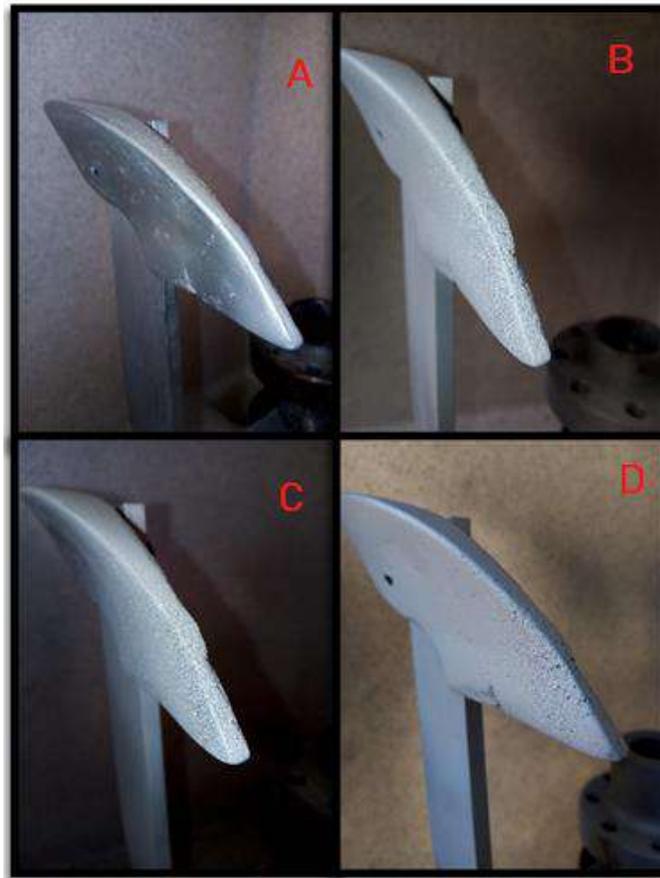


Figura 4-15. A) Prototipo sin erosionar B) Primera experimentación y sandblasteo C) Zona erosionada por la aplicación el óxido de aluminio y D) Zona de mayor incidencia de desgaste.

De acuerdo con lo realizado en la experimentación se muestra un erosionado de la pieza que va desde 0 g hasta 0.5 gramos (ver Figura 4-16 A) y C)) generando una pérdida del material en la zona de corte del prototipo mostrando la peculiaridad de proceder con un desgaste sobre la orilla del prototipo y la aparición de orificios por el exceso de desgaste (ver Figura 4-16 B) y D)), en comparación con el estudio

en simulación mostrado en la Figura 4-5 puede observarse que efectivamente la zona simulada presenta una similitud con la zona de la validación experimental.



Figura 4-16. A) Pesaje del primer experimento de sandblasteo B) Exposición de la zona afectada del primer experimento de erosión C) Pesaje final del prototipo desgastado y D) Exposición de la zona desgastada final.

4.2 Análisis virtual de la vertedera universal

Una vez que se realizó la simulación y validación del modelo a escala para comprobar las zonas de desgaste en la vertedera pequeña se da paso a realizar el experimento, pero ahora para el modelo a tamaño real, el cual es la representación de un arado comercial, donde se comprobaron las zonas en las que la erosión es probable que aparezca y además un estudio de velocidad para poder verificar la afectación de la vertedera a diferentes niveles de arrastre.

4.2.1 Estudio mecánico multifísico

El flujo de trabajo establecido por ANSYS es el mostrado en la Figura 4-17 en el cual se puede apreciar cada uno de los bloques utilizados para generar el estudio y como se aprecia en la figura cada uno de los procesos va encaminado a generar la física que tiene lugar al final de cada simulación, tanto la física de fluido como estructural comparte características para llevar a cabo la interacción en conjunto de las partículas y la estructura de la vertedera del arado, calculando cada uno de los resultados descritos más adelante.

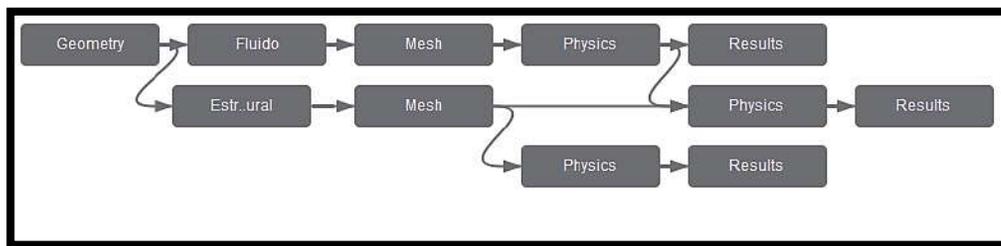


Figura 4-17. Bloques del flujo de trabajo utilizados en ANSYS para resolver la simulación.

Como ya se mencionó, el análisis de los resultados se dividió en el estudio mecánico y flujo de partículas a pesar de compartir geometrías y de ser multifísico, las partículas actúan directamente en la cara de la vertedera, a partir de esta interacción es que se pudieron comprobar tanto el cálculo del factor de seguridad del material 1045 y el cálculo de los esfuerzos en la estructura. El factor de seguridad sirvió para comprobar la integridad del modelo primeramente para saber si es un diseño factible y confiable ante el choque de las partículas a una velocidad establecida, para este caso el factor de seguridad es mayor a 2 en la zona de mayores esfuerzos (ver Figura 4-18), estableciendo un modelo confiable.

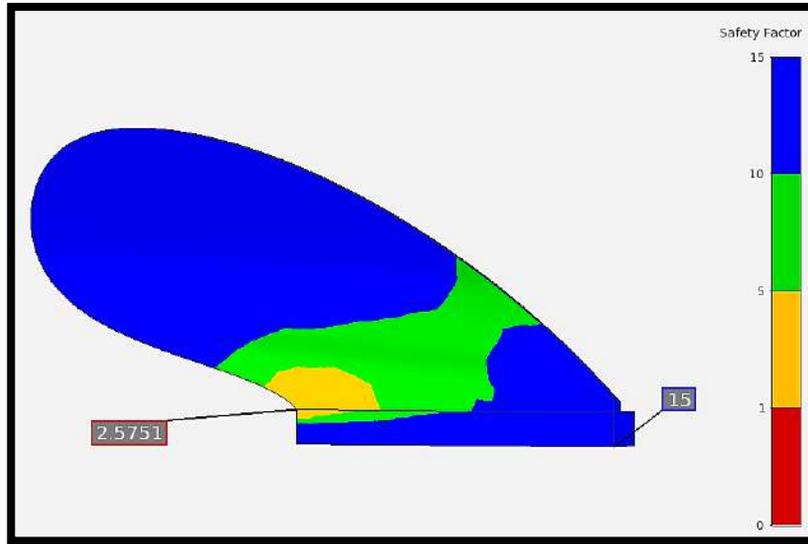


Figura 4-18. Factor de seguridad calculado para la vertedera.

Del mismo modo al aplicar el estudio se calcularon los esfuerzos producidos por el choque de las partículas en la cara de la vertedera, lo cual por medio de superficies de contacto se observaron las zonas donde las partículas tienen mayor incidencia ante el choque (ver Figura 4-19), los esfuerzos mínimos se encuentran en la punta de la vertedera y los mayores en la zona de salida, los cuales presentan una magnitud de 103 MPa lo cual es menor que el esfuerzo último de fluencia del material establecido por 530 MPa, generando un modelo confiable ante la velocidad de choque que llevan esas partículas.

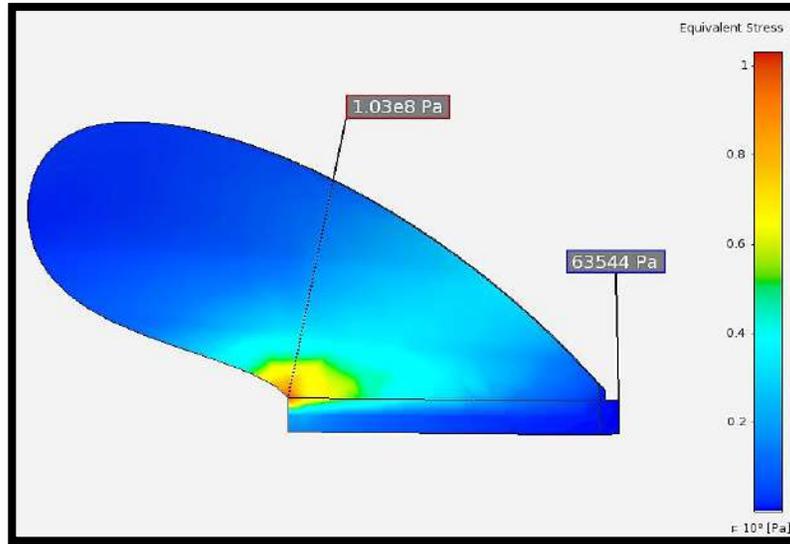


Figura 4-19. Esfuerzos calculados por el choque de partículas en la vertedera.

Por último se hizo un análisis de fatiga, el diseño entonces debe soportar la carga de trabajo en ciclos mayor a 1×10^6 (ver Figura 4-20), lo que corresponde al laboreo de una tierra para la preparación de cada uno de los surcos en los cuales posteriormente se va a sembrar, cada ciclo equivale al desplazamiento de la vertedera hasta que el implemento que arrastra el arado cambie de dirección y comience de nuevo con el laboreo, si se logra se dice pues que el implemento tiene la característica de vida infinita y no fallará por fatiga.

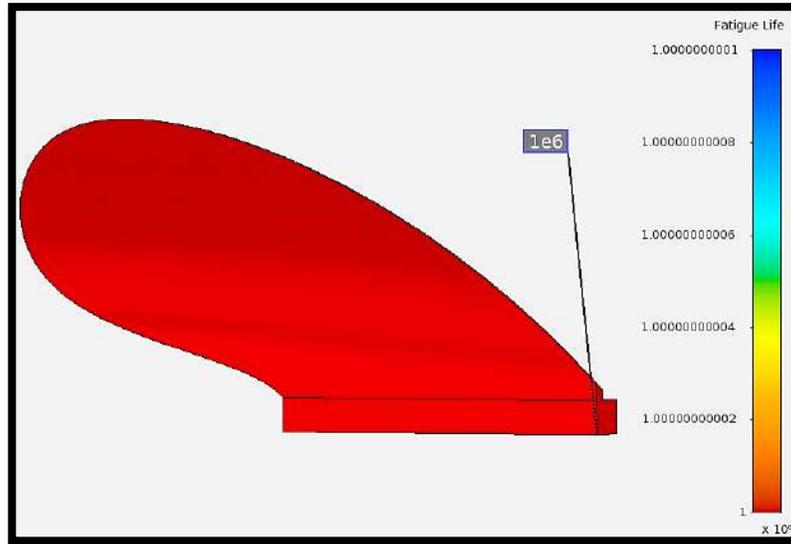


Figura 4-20. Ciclos de fatiga calculados por el choque de partículas en la vertedera.

4.2.2 Flujo de partículas y erosión en el modelo

Los estudios mecánicos por partículas afectaron directamente a la cara de la vertedera donde se inicia el corte, que se refleja en la parte baja de la cara de la vertedera, pero para poder comprobar dichos sucesos es necesario además analizar el comportamiento de las partículas y las zonas donde mayormente se concentra su actividad, además de las cargas mecánicas generadas otro punto importante a analizar es la erosión, la cual es uno de los casos de falla más comunes en utensilios utilizados en el campo. En la Figura 4-21 se aprecian los puntos de mayor erosión en la cara de la vertedera al igual que la tasa de erosión por unidad de área, dejando claro que la punta de la vertedera al cortar la tierra será punto clave de análisis para poder comprobar de forma experimental la pérdida de masa.

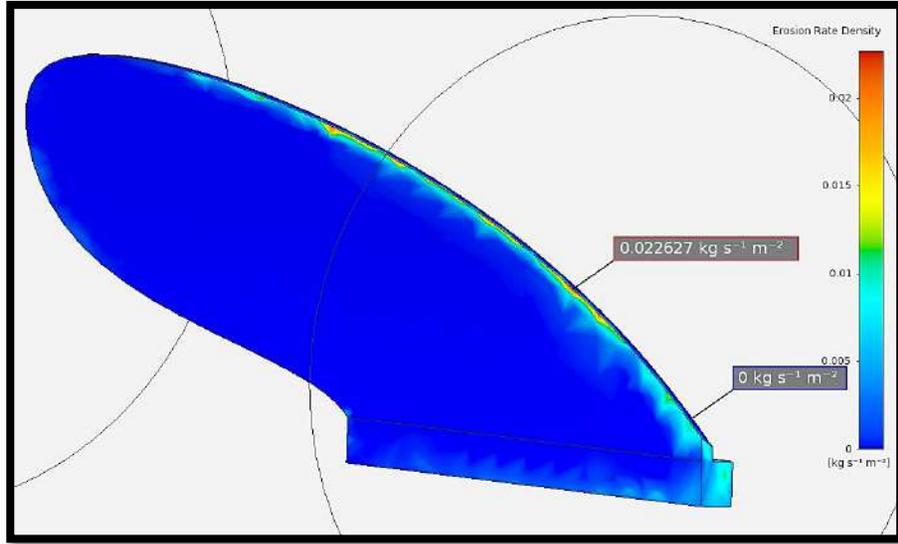


Figura 4-21. Puntos de mayor desgaste en la vertedera y densidad de la tasa de erosión.

Las partículas inyectadas se introdujeron a la simulación a una velocidad de 2.5 m/s, pero por la curvatura de la cara de la vertedera tiende a acelerar las partículas a la salida del arado, de este modo se puede apreciar en la Figura 4-22 el comportamiento del choque de las partículas relacionando el flujo con el impacto que generan en el artefacto, analizando la zona de salida, la cual es más propensa a presentar erosión en un futuro por el arduo laboreo debido a que en esa zona se presenta el mayor movimiento de las partículas por la velocidad que llevan al momento de colisionar con el ala de la vertedera.

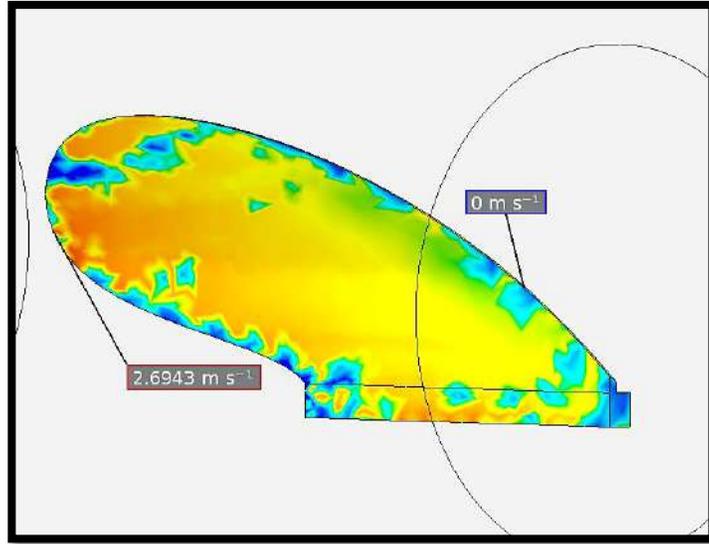


Figura 4-22. Velocidad del choque de las partículas sobre la vertedera.

Una vez que las partículas incidieron en la cara de la vertedera es posible calcular la presión con la cual actúan en conjunto, estableciendo la zona donde mayormente iniciará la erosión, como puede apreciarse en la Figura 4-23, la punta de la vertedera es una zona de mayor percance.

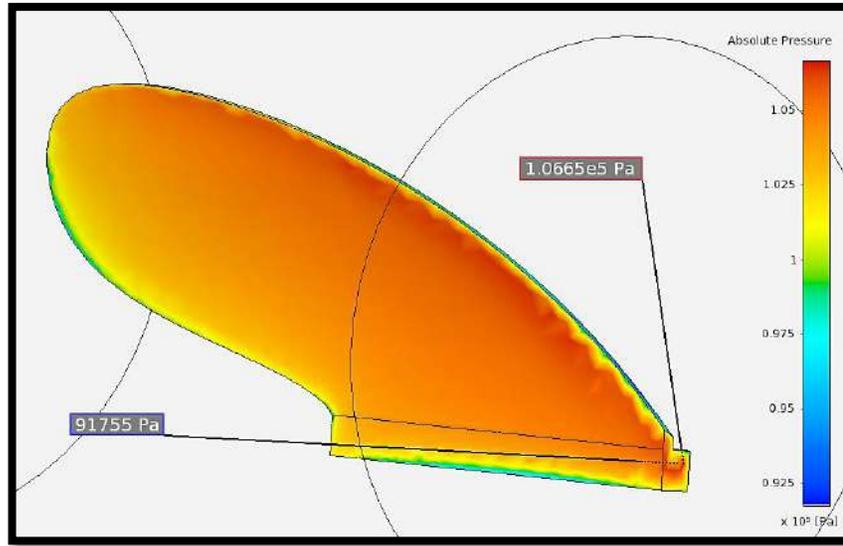


Figura 4-23. Presión absoluta ejercida por las partículas en la cara de la vertedera.

Además es importante observar cómo es que se mueven dichas partículas a lo largo de la cara de la vertedera, esto para verificar que el volteo de la tierra se está generando de forma adecuada, cabe mencionar que la principal tarea del arado de vertedera es voltear la tierra para preparar el campo previo a la siembra de las semillas, de este modo es que se realizó la simulación del trayecto de dichas partículas, las cuales simulan la tierra en movimiento en tiempo real al momento de cortar el suelo. En la Figura 4-24 se aprecia el inicio del trayecto de las partículas antes de que la vertedera corte el suelo.

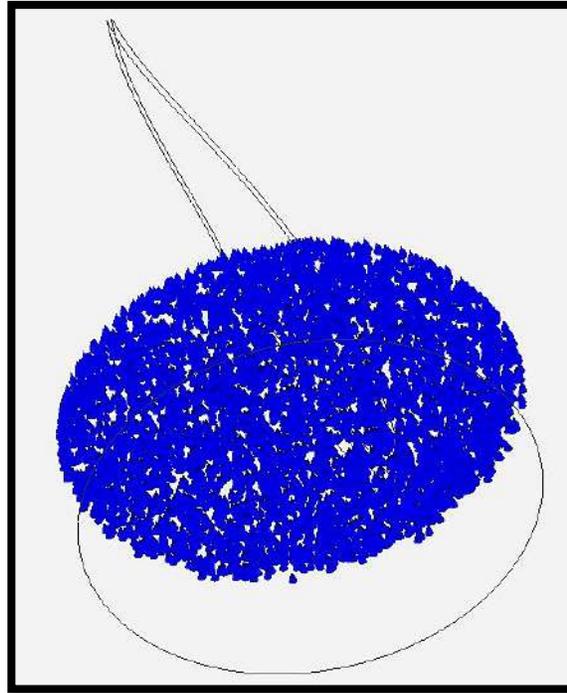


Figura 4-24. Simulación del trayecto de las partículas por la vertedera (inicio del trayecto).

Una vez que el arado entra al suelo y lo corta, las partículas de la tierra entran en contacto con la curvatura de la cara de la vertedera, lo que ocasiona un movimiento de volteo inicial (ver Figura 4-25), generando el choque de la tierra en la vertedera e iniciando el volteo de la tierra por el campo, de este modo se comprueba el movimiento que de forma física tendría el terreno al momento que el modelo corte el suelo, además por medio de la simulación se pueden comprobar de manera visual las zonas en las que las partículas interaccionan con la cara de la vertedera.

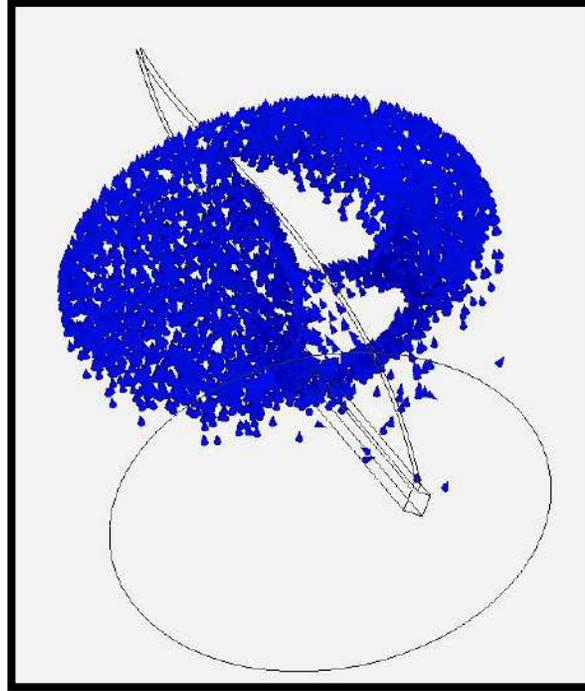


Figura 4-25. Simulación del trayecto de las partículas por la vertedera (corte del suelo).

Una vez que se ha realizado el corte del suelo la tierra sale de la vertedera ya volteada y va dejando el rastro hacia la parte trasera (ver figura 4-26), obteniendo un suelo cortado y volteado listo para sembrarlo posterior al trabajo de corte realizado previamente.

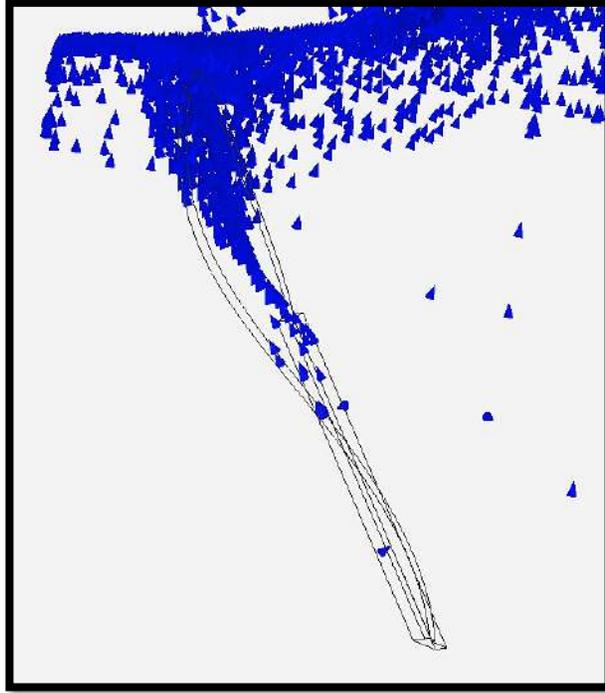


Figura 4-26. Simulación del trayecto de las partículas por la vertedera (suelo volteado).

4.2.3 Estudio de velocidad

Todas estas simulaciones sirvieron para comprobar la integridad tanto del arado como la selección de los materiales adecuados para que el modelo fuese un diseño factible y confiable ante este caso de estudio, de igual manera hay que comprobar la integridad del suelo, como la humedad y la velocidad a la que se va a manejar dicha herramienta, recordando que mientras más humedad exista en el terreno, mayor será la oposición del suelo al dejarse cortar, de igual manera la velocidad a la que se arrastre el arado será indispensable para garantizar un corte limpio, pero también hay que evitar entrar en una zona de trabajo donde crezca demasiado los esfuerzos.

Se ha realizado el estudio de la velocidad para seleccionar el rango adecuado para mover el arado por medio de la variación de la fuerza de arrastre debido al movimiento del arado sobre la tierra, además de poder observar el consumo en kWh para seleccionar la potencia adecuada del motor que será utilizado para arrastrar el arado para evitar forzarlo de más por la cantidad de agua en ese momento del suelo.

Es por eso que hay que considerar el trabajo del suelo siempre en su fase friable, lo que implica una cantidad de humedad considerable antes de pasar a una fase líquida en el terreno. Entonces es importante relacionar las velocidades del implemento con las cuestiones físicas del terreno, condiciones de humedad y tiempo de trabajo. Se seleccionó un rango de 1 a 2 m/s en la velocidad de movimiento del arado, lo que implica un aumento de consumo de potencia, con esos valores de velocidad se seleccionó un rango de límite de trabajo el cual se evitará en todo momento, esto debido a la humedad en el terreno la cual es responsable de aumentar el consumo de potencia cuando se presenta más agua en la tierra, generando esfuerzos en el arado muy altos, los cuales son clave para poder dañar el modelo en ese rango.

Las fuerzas calculadas en cada caso fueron tabuladas y se determinó el consumo en kWh para un recorrido de 6000 m en un pequeño terreno, la vertedera tiene un ángulo de corte de 30°, generando entonces gráficos para establecer un rango de velocidad donde el arado pueda trabajar de una forma adecuada y para la selección de un motocultor para el arrastre que tenga un rango de 6 a 9 HP, obteniendo cómo límite la mayor fuerza en el fondo del arado, la cual depende de la humedad y el estado friable del suelo antes de pasar al estado líquido generando que la tierra tenga mayor cohesión y sea difícil poder voltearla, estableciendo que el modelo puede entrar en un punto de falla por cedencia del arado o un mayor consumo de potencia debido al mayor trabajo necesario para mover la masa en conjunto.

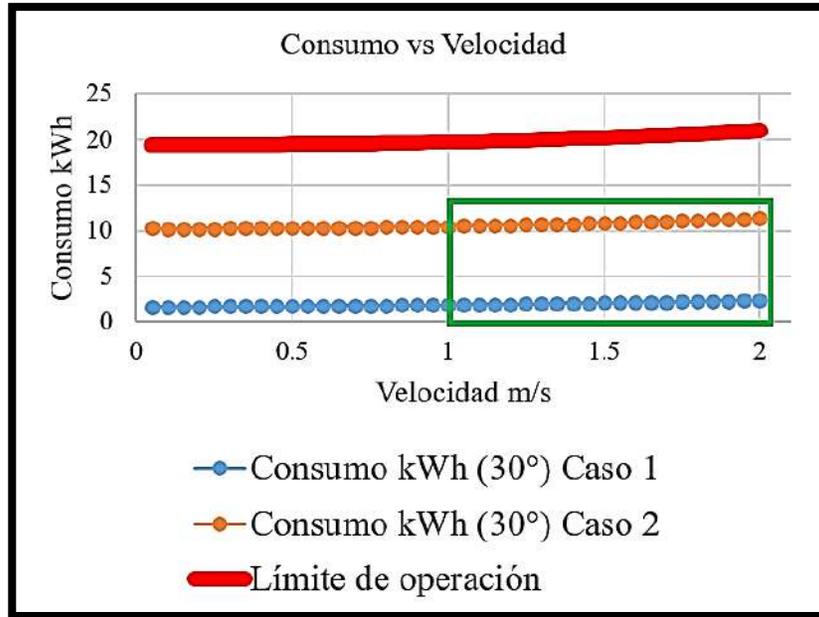


Figura 4-27. Representación del consumo contra la velocidad en los 2 casos de estudio y el límite de operación.

De este modo se estableció un rango adecuado para trabajar el modelo ya que mientras exista mayor humedad la potencia para arrastrar el arado aumentará (ver Figura 4-27), siendo el caso I y II donde se presenta el cambio, se seleccionó un rango de 1 a 2 m/s de velocidad dentro de un consumo no superior a los 12 kWh, ya que, sino el motor con el que se arrastre al implemento se forzaría y no se moverá, al contrario, existirá patinaje por el exceso de humedad en el terreno. Presentando un diseño de arado de vertedera capaz de ser movido por un motocultor de una manera más fácil y con el beneficio de disminuir pesos por los materiales de su construcción y además tener un modelo libre para ser modificado geoméricamente para poder adaptarse a diversos terrenos, esto para garantizar un diseño confiable previo a su fabricación y evitar el gasto innecesario en materiales en la etapa de prototipado.

4.3 Comparación de desgaste entre la validación y análisis virtual de la vertedera a escala

Se realizó una comparativa entre la simulación y la validación del desgaste de la vertedera a escala, en la cual pueden observarse similitudes tanto físicas como en el comportamiento mecánico de erosión en las zonas mencionadas con anterioridad. Como se ve en la figura 4-28 se denota la zona de mayor impacto de las partículas de óxido de aluminio de acuerdo con la validación física en el cual se muestra un desgaste mayor en la punta de la vertedera a escala, por otro lado, en la simulación se puede ilustrar la zona en la que la tasa de erosión es mayor, lo que nos indica que las partículas simuladas están impactando más constantemente en ese punto.

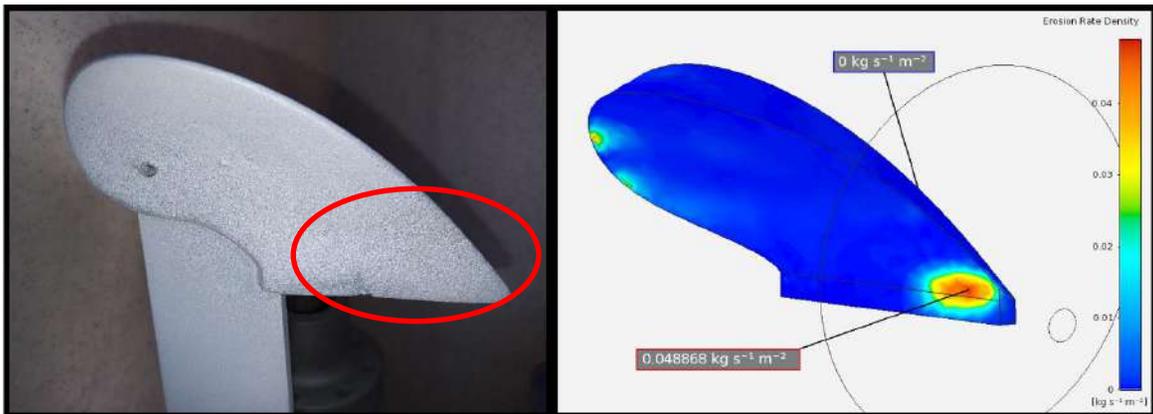


Figura 4-28. Comparación de la zona de desgaste entre la validación del arado de vertedera a escala y la simulación a escala.

De igual manera una vez que se desmontó el prototipo a escala de la base donde se realizaron los experimentos de sandblasteo, se limpió y de forma más notoria se pudieron observar pequeños orificios en el material de aluminio vaciado, lo cual nos indica que la concentración del flujo de partículas de óxido de aluminio estaba afectando principalmente en esta zona provocando un desgaste excesivo con la aparición de esta afectación por orificios, dicho desgaste puede apreciarse en la figura 4-29 denotado por el círculo rojo, por otro lado se muestra la velocidad de choque de partículas lo cual indica que en esas zonas habrá mayor interacción del flujo en la estructura, indicando que en ese espacio del modelo habrá desgaste o la aparición de él.

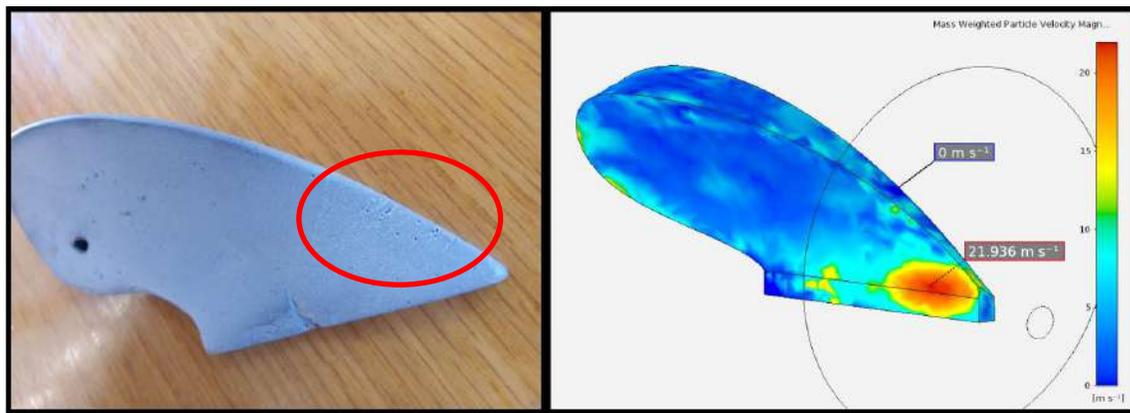


Figura 4-29. Principales zonas de aparición prematura del desgaste por erosión debido al choque de partículas de óxido de aluminio en el modelo a escala.

Para el cálculo de la tasa de erosión de forma analítica como se mencionó con anterioridad en la parte teórica de la investigación, se utilizó el modelo de Oka et al. (2005) para calcularlo lo cual implica el uso de la ecuación (3) el cual es un cálculo en relación a la tasa de masa de erosionante, pero primero se calculó la parte adimensional y después hay que multiplicarlo por el valor del flujo para obtener las unidades correspondientes.

$$E_{ratio} = CV_p^n f(\alpha) \quad (3)$$

Donde:

C – (*Características geométricas del modelo*)

V_p – (*Velocidad del material erosionante*)

n = $2.3(Hv)^{0.038}$ – (*Exponente de la velocidad de impacto*)

Hv – (*Es la dureza del material objetivo expresada en GPa*)

$f(\alpha)$ = $(\sin \alpha)^{n1} (1 + Hv(1 - \sin \alpha))^{n2}$ – (*Función del ángulo de impacto*)

α – (*Ángulo de impacto de las partículas erosionantes*)

$n1$ = $0.71(Hv)^{0.14}$ – (*Exponentes en función de la dureza*)

$n2$ = $2.4(Hv)^{-0.94}$ – (*Exponentes en función de la dureza*)

Para el valor de C se tiene un valor constante de 1 ya que no se tienen geometrías complejas en el modelo a escala, la velocidad de salida de las partículas V_p es igual a 7 m/s y el valor de la dureza Hv que se usará será el del aluminio 6061 lo cual corresponde a 12.6 Kgf/mm² correspondiendo a 0.1235 GPa, por último el ángulo de impacto α serán 30° similar al que se realizó en la simulación para la entrada de las partículas.

$$C = 1$$

$$V_p = 7 \frac{m}{s}$$

$$Hv = 0.1235 \text{ GPa} = 0.1235 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

Lo que se desarrolló después fue el cálculo de los exponentes n , $n1$ y $n2$, para poder calcular el exponente de la velocidad de impacto y los exponentes correspondientes para el desarrollo de la función del ángulo de impacto $f(\alpha)$. Sustituyendo se tienen:

$$n = 2.3(Hv)^{0.038} = 2.3(0.1235 \times 10^9)^{0.038} = 4.6689 \text{ Pa}$$

$$n1 = 0.71(Hv)^{0.14} = 0.71(0.1235 \times 10^9)^{0.14} = 9.6410 \text{ Pa}$$

$$n2 = 2.4(Hv)^{-0.94} = 2.4(0.1235 \times 10^9)^{-0.94} = 5.9406 \times 10^{-8} \text{ Pa}$$

Realizando el cálculo para la función $f(\alpha)$ se obtuvo el siguiente desarrollo:

$$f(\alpha) = (\sin \alpha)^{n1} (1 + Hv(1 - \sin \alpha))^{n2}$$

$$f(30) = (\sin(30))^{9.6410} (1 + 0.1235 \times 10^9 (1 - \sin(30)))^{5.9406 \times 10^{-8}}$$

$$f(30) = 0.0012$$

Una vez que se tienen todos los datos numéricos de las literales se sustituyeron los datos en la ecuación (3), obteniendo entonces:

$$Eratio = CV_p^n f(\alpha)$$

$$Eratio = (1)(6)^{4.6689} (0.0012) = 11.0532$$

Por último, se multiplica por el flujo másico para obtener la tasa de erosión en función de la tasa de flujo másico

$$Eratio = (0.004402)(11.0532) = 0.04865 \frac{\text{Kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Como puede observarse en la tabla 4-1 se concentra el compilado de los experimentos realizados en cada prueba de erosionado como se mencionó con anterioridad se desplazó una masa de 2.1 Kg de polvo de óxido de aluminio por un tiempo de 477 segundos generando un flujo másico de 0.004402 Kg/s, para poder generar el cálculo analítico se mencionó que los cálculos estuvieron en función de la dureza del material objetivo, en este caso aluminio 6061, la validación generó una reducción en la masa del modelo de 0.5 g por los 5 experimentos realizados, cada ciclo del sandblasteo consistió en verter la masa antes mencionada por el tiempo requerido.

El software ANSYS es una alternativa al ser un software de aproximaciones matemáticas el cual es de ayuda para poder calcular por métodos numéricos la respuesta más cercana al comportamiento mecánico real del sistema de erosionado, de acuerdo a las condiciones frontera y condiciones iniciales que se le proporcionaron para cada estudio es que se calculó la validación la cual generó una respuesta similar al estudio simulado, agregando que esta alternativa puede ahorrar el tiempo de fabricación y experimentación física usando los cálculos de simulación como un banco de pruebas para poder tener respuestas más rápido de algún sistema mecánico que se requiera ver la integridad del mismo ante el impacto de partículas a diferentes velocidades, lo cual implicaría tener un desgaste por erosión, disminuyendo la vida útil del sistema mecánico. Por otro lado

Tabla 4-1. Resultados de la validación experimental de desgaste.

| Experimento # | Masa inicial (Kg) | Masa final (Kg) | Masa desplazada por experimento (Kg) | Tiempo para cada experimento (s) | Flujo másico inyectado en cada experimento (Kg/s) | Tasa de erosión calculada para el experimento virtual (Kg/s*m²) | Tasa de erosión calculada para el experimento analítico |
|----------------------|--------------------------|------------------------|---|---|--|---|--|
| 1 | 0.0638 | 0.0637 | 2.1 | 477 | 0.004402 | 0.04886 | 0.04865 |
| 2 | 0.0637 | 0.0636 | | | | | |
| 3 | 0.0636 | 0.0635 | | | | | |
| 4 | 0.0635 | 0.0634 | | | | | |
| 5 | 0.0634 | 0.0633 | | | | | |

5. CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS

Conclusiones

- Se realizó un análisis de los trabajos relacionados con el laboreo primario del suelo y el diseño de implementos agrícolas, comprobando que el ámbito es muy poco investigado y la simulación se ha basado completamente en el estudio fluidodinámico y no multifísico.
- Se obtuvo un diseño de la vertedera capaz de ser modificada de una forma interactiva ya que cuenta con cotas paramétricas y es posible cambiar la geometría del modelo dependiendo de las necesidades del diseñador, de igual manera se pueden establecer materiales diversos para comprobar resistencia en diferentes diseños.
- Se realizaron estudios a la vertedera para comprobar el comportamiento mecánico mediante la utilización de la simulación por elementos finitos, de este modo se realizó un estudio multifísico para observar la incidencia de un flujo de partículas interactuando con el modelo y comprobar principales zonas de falla.
- Se generó un banco de pruebas con la ayuda de ANSYS para poder comprobar la integridad de un arado de vertedera universal, observando su desempeño ante el choque de partículas aleatorias, verificar las principales zonas de erosión y determinar si el modelo presenta fallas mecánicas por la interacción de las partículas en su estructura.
- Se analizó el banco de pruebas de simulación y se estableció un flujo de trabajo capaz de ser modificado y tener un fin interactivo para agregar nuevos modelos de prueba y establecer las características de las físicas de la simulación, haciendo que el diseñador modifique a su agrado dependiendo el fluido utilizado y las partículas inyectadas.

- La construcción del prototipo a escala sirvió de entrenamiento sobre el manejo de nuevos equipos para adquirir experiencia necesaria para su aprovechamiento y la impartición de la forma de uso de cada herramienta.
- El aprovechamiento de los materiales como la pistola de gravedad y el polvo de óxido de aluminio pueden servir en un futuro para su uso en el laboratorio en caso de limpieza de piezas con óxido haciendo uso de ellos de manera didáctica.
- Se calculó de forma simulada una tasa de erosión en un banco de pruebas para validar de forma experimental un arado de vertedera a escala en el cual se pudo comprobar que tanto la parte virtual como experimental tienen similitudes en cuanto a la tasa de erosión en relación al área aplicada de sandblasteo.
- El desgaste realizado en la pieza por medio del sandblasteo fue para acelerar el proceso de desgaste y validar el modelo completamente, ya que si se hubiera elaborado el experimento a escala y con los materiales como acero y a la velocidad de 2.5 m/s, hubiera tomado demasiado tiempo observar un desgaste en las zonas en comparación con el experimento realizado con aluminio.

Prospectivas

- Al ser un modelo paramétrico y tener un diseño capaz de adaptarse a cualquier terreno es posible modificar las características operacionales y geométricas del modelo para adaptarlo a alguna zona en específico.
- Se deja abierta la posibilidad del uso del banco de pruebas, así como de la información generada en la investigación para una futura actualización de datos o nuevos implementos de desgaste.
- El ámbito de la tribología en su mayoría las simulaciones trabajadas se centran en la caracterización de tuberías y su deterioro por erosión, para este

caso de estudio se dedicó completamente al ámbito agroindustrial, abriendo una brecha de investigación que sea de interés para próximas generaciones.

- De igual manera el equipo utilizado y manejado está a disposición del laboratorio para ser usado por el alumnado y se pueda incrementar el conocimiento de diversos procesos experimentales, tal como el sandblasteo y la impartición de apoyo para el uso de la mufla para fundición de materiales y/o tratamientos térmicos de los mismos.
- Conforme a los resultados en el diseño simulado y su posible fabricación a escala real, se deja abierta la posibilidad de la utilización de los modelos y procesos de simulación aquí planteados, al igual que los cálculos y modelos quedan de base para su futura modificación y mejora, pudiendo servir de ayuda para una posible optimización de recursos tanto computacionales como económicos en la construcción de prototipos agrícolas.

6. REFERENCIAS

Adedeji, O., Yu, W. & Sanders, S. (2019). Analysis of local wear variables for high-precision erosion modelling in complex geometries. *Wear*, 426-427, pp.562-569.

Ahmadi, I. (2016). Development and evaluation of a draft force calculator for moldboard plow using the laws of classical mechanics. *Soil & Tillage Research*, 161, pp.129–134.

Arabnejad, H., Mansouri, A., Shirazi, S. & McLaury, B. (2017). Abrasion erosion modeling in particulate flow. *Wear*, 376-377, pp.1194-1199.

Catalán, H. (2008). Laboreo primario: el arado de vertedera y de discos. *Maquinaria, Técnica y mecánica*, -, pp.52-54.

Crespo, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México: Limusa.

Domagala, M., Momeni, H., Domagala-Fabis, J., Filo, G., Krawczyk, M. & Rajda, J. (2018). Simulation of Particle Erosion in a Hydraulic Valve. *Materials Research Proceedings*, 5, pp.17-24.

González, J. (2013). Desarrollo de un sistema tribológico con movimiento lineal recíprocante (Tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Nuevo León: Nuevo León, México.

Horvat, Z., Filipovic, D., Kosutic, S. & Emert, R. (2008). Reduction of mouldboard plough share wear by a combination technique of hardfacing. *Tribology International*, 41, pp.778–782.

Ibrahmi, A., Bentaher, H., Hamza, E., Maalej, A. & Mouazen, A.M. (2015). Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough

forces and energy requirement: Part 2. Experimental validation with soil bin test. *Computers and Electronics in Agriculture*, 117, pp.268–275.

Ibrahmi, A., Bentaher, H., Hbaieb, M., Maalej, A. & Mouazen, A.M. (2015). Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 117, pp.258-267.

Li, Y., Zhang, H., Lin, Z., He, Z., Xiang, J. & Su, X. (2019). Relationship between wear formation and large-particle motion in a pipe bend. *R. Soc. open sci*, 6, pp.1-15.

Natsis, A., Petropoulos, G. & Pandazaras, C. (2008). Influence of local soil conditions on mouldboard ploughshare abrasive wear. *Tribology International*, 41, pp.151–157.

Nguyen, Q., Nguyen, V., Lim, C., Trinh, Q., Sankaranarayanan, S., Zhang, Y. & Gupta, M. (2015). Effect of impact angle and testing time on erosion of stainless steel at higher velocities. *Wear*, 321, pp.87-93.

Oka, Y., Okamura, K. & Yoshida, T. (2005). Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. *Wear*, 259, pp.95-101.

Oka, Y., Okamura, K., Yoshida, T. (2005). Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage. *Wear*, 259, pp.102-109.

Rehkugler, G. (2011). *The Rau Model Plow Collection at Cornell University and the Evolution of Plow Design*. Ithaca, NY: Cornell University.

Saucedo, J. (2014). Análisis del desgaste en engranes aplicando el método de elementos finitos (Tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Querétaro: Querétaro, México.

Shrestha, D.S., Singh, G. & Gebresenbet, G. (2000). Optimizing Design Parameters of a Mouldboard Plough. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78, pp.377-389.

Singh, A., G. & G. (2017). Improving wear resistance via hardfacing of cultivator shovel. *Materials Today: Proceedings*, 4, pp.7991–7999.

Trejo, M. (2010). Monitoreo, análisis y modelado fenomenológico del desgaste de la herramienta bajo condiciones de corte variables en torno CNC (Tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Querétaro: Querétaro, México.

Tu, J., Yeoh, G. & Liu, C. (2018). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. USA: Butterworth-Heinemann.

Villagómez, J. (2020). Análisis y diseño de un arado de vertedera universal utilizando análisis por elemento finito (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Querétaro: Querétaro, México.

Wei, M., Zhu, L., Luo, F., Zhang, J., Dong, X. & Jen, T. (2019). Share-soil interaction load and wear at various tillage conditions of a horizontally reversible plough. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, pp.21-30.