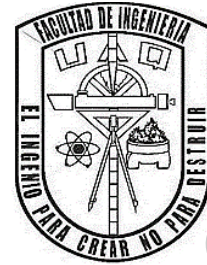




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CAMPUS SAN JUAN DEL RÍO



**ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN ARADO DE VERTEDERA UNIVERSAL
UTILIZANDO ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el título de
Ingeniero Electromecánico línea terminal en Diseño y Manufactura

Presenta:

José Villagómez Moreno

Dirigido por:

Dr. Ángel Pérez Cruz

San Juan del Río, Querétaro.
Agosto, 2020

RESUMEN

El laboreo primario del suelo que implica la interacción de herramientas con la tierra, ha tenido su origen desde tiempos muy remotos, de igual manera la práctica de la agricultura ha ido evolucionando, agregando e innovando nuevas herramientas, técnicas y procesos para acelerar el trabajo y la producción del campo, a lo largo de la historia dichos herramientas han tenido que ir mejorando para poder adaptarse a las características de los suelos de cada región en específico, especialmente a los suelos con mayor o menor dureza, lo que implica tener menor o mayor concentración de humedad en la zona, llevando a la selección de materiales con mejor resistencia y mayor durabilidad. Un ejemplo claro es el arado de vertedera universal, es un utensilio de uso común en las regiones de México, dicho utensilio permite cortar la tierra y resquebrajar los terrones grandes del suelo, preparándolo para su próxima siembra. Los materiales usados, las dimensiones de las partes del arado y la verificación de su resistencia y durabilidad se han realizado mayormente por la experiencia del agricultor, el proceso de selección de un arado es un tanto complicada por las grandes cantidades de marcas que existen en el mercado y con la incertidumbre de saber si el utensilio aguantará las jornadas de trabajo, una solución próxima que sea factible es la que se presenta a continuación, lo cual implica el cálculo de las fuerzas que actúan sobre un modelo elaborado en un entorno CAD, con el uso de la simulación por elementos finitos se pueden aproximar los comportamientos del modelo a la vida real, lo que genera esfuerzos en el modelo, llevándolo a un deterioro constante y su próxima acumulación de fallas, la propuesta es generar un modelo factible, que el usuario pueda seleccionarlo fácilmente dependiendo de las características del suelo donde se ha de trabajar y tener un mejor flujo de trabajo, disminuir pesos excesivos y alejar al modelo de fallas próximas, asegurando un uso constante y aumentar su vida útil.

(Palabras clave: Laboreo primario, Arado de vertedera, Modelo CAD, Simulación por elementos finitos, Esfuerzos, Fallas, Vida útil)

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo principalmente a mis padres José Villagómez Estrada y Ma. De Jesús Moreno Arce, quienes fueron los principales que me apoyaron incondicionalmente a lo largo de la carrera, ya que siempre me brindaron su apoyo tanto emocional como económico.

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 y hacerlo realidad.

También mis compañeros de generación con los cuales tuve una gran vivencia en el transcurso de la carrera y me enseñaron a trabajar en equipo para lograr siempre resultados positivos en las cuestiones académicas y de la vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a la Universidad Autónoma de Querétaro, campus San Juan del Río, Facultad de Ingeniería Electromecánica, por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios y concluirlos de una forma favorable.

Al Dr. Ángel Pérez Cruz por confiar en mí y tener esa visión de poder desarrollar el proyecto a la par, también por darme todo el apoyo necesario durante su transcurso y siempre lograr conjuntar las ideas como un equipo, logrando este trabajo de una forma satisfactoria.

A los profesores Dr. Miguel Trejo Hernández, Dr. Carlos Gustavo Manríquez Padilla y M. en C. Manuel García Quijada, por ser mis sinodales y contar con su apoyo en la revisión y en la aclaración de las ideas de esta tesis, para de este modo poder concluirla de la mejor forma.

Al Fondo Para El Fortalecimiento De La Investigación UAQ (FOFI-UAQ FIN201903), por la beca recibida y su arduo trabajo para la formación de cada uno de los alumnos que pueden contar con su apoyo y financiamiento.

Pero mayormente a mis padres y hermanas 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.

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
DEDICATORIAS.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	4
1.2 OBJETIVOS	10
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	10
1.2.2 <i>Objetivos particulares</i>	10
1.3 JUSTIFICACIÓN	11
1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	12
1.5 PLANTEAMIENTO GENERAL.....	13
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	14
2.1 LABOREO PRIMARIO Y SUS FUERZAS DE INTERACCIÓN.....	14
2.1.1 <i>Tipos de suelo</i>	16
2.1.2 <i>Interacción de fuerzas</i>	17
2.2 DISEÑO MECÁNICO	19
2.3 HERRAMIENTAS Y RECURSOS DE ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO.....	20
2.3.1 <i>Análisis por elemento finito</i>	20
2.3.2 <i>Recursos en SolidWorks</i>	22
3. METODOLOGÍA	25
3.1 ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO	25
3.1.1 <i>Características del suelo</i>	25
3.1.2 <i>Características operacionales</i>	26

3.1.3	<i>Características geométricas</i>	27
3.1.4	<i>Partes que conforman el arado</i>	29
3.1.5	<i>Ensamble del arado</i>	31
3.1.6	<i>Cálculo de las fuerzas</i>	31
3.2	DISEÑO MECÁNICO DEL ARADO	35
3.2.1	<i>Descripción del problema</i>	36
3.2.2	<i>Definición de parámetros de diseño</i>	36
3.2.3	<i>Evaluación</i>	37
3.3	CASOS DE ESTUDIO	37
4.	RESULTADOS	41
4.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS	45
4.1.1	<i>Estático</i>	46
4.1.2	<i>Fatiga</i>	52
4.1.3	<i>Modal</i>	53
4.1.4	<i>Impacto</i>	59
5.	CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS	63
6.	REFERENCIAS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Elementos que componen el cuerpo de un arado 1) Bastidor 2) Vertedera 3) Reja (Rehkugler, 2011).	1
Figura 1-2. Tipos de arado de vertedera (Márquez, 2000).....	2
Figura 1-3. Cálculo de la forma de la vertedera por láser (Gutiérrez de Ravé, 2011)	8
Figura 1-4. Diagrama del planteamiento general.	13
Figura 2-1. Clases texturales de los suelos adaptado de (Crespo, 2004).	16
Figura 2-2. Comportamiento del suelo al ser cortado: Traducido de (Ahmadi, 2016).	18
Figura 2-3. Comportamiento del suelo a lo largo de la vertedera: Traducido de (Ahmadi, 2016).....	18
Figura 2-4. Metodología seguida en el análisis por elemento finito.....	21
Figura 3-1. Etapas seguidas en la metodología.	25
Figura 3-2. Representación del ángulo de corte.....	28
Figura 3-3. Representación del ángulo de elevación.	28
Figura 3-4. Vertedera modelada en SolidWorks.....	29
Figura 3-5. Reja modelada en SolidWorks.....	30
Figura 3-6. Bastidor modelado en SolidWorks.	30
Figura 3-7. Ensamble final del modelo.	31
Figura 3-8. Calculadora usada para el cálculo de las fuerzas.	32

Figura 3-9. Representación de la roca antes del impacto y su dirección de movimiento.....	34
Figura 3-10. Fuerzas de interacción en el ensamble.....	34
Figura 3-11. Fuerzas de interacción en la vertedera.....	35
Figura 3-12. Fases del proceso de diseño. Fuente: (Budynas, R & Keith, J., 2012).	36
Figura 4-1. Render del modelo final del arado.....	41
Figura 4-2. Representación de los esfuerzos en el estudio estático en la vertedera.	46
Figura 4-3. Representación de los esfuerzos en el estudio estático en el ensamble.	47
Figura 4-4. Comparación entre los esfuerzos de cada caso.....	47
Figura 4-5. Representación de los desplazamientos en la vertedera.....	48
Figura 4-6. Representación de los desplazamientos en el ensamble.....	48
Figura 4-7. Comparación de los desplazamientos en cada caso.....	49
Figura 4-8. Representación del factor de seguridad en la vertedera.....	50
Figura 4-9. Representación del factor de seguridad en el ensamble.....	50
Figura 4-10. Factor de seguridad en cada caso.....	51
Figura 4-11. Comprobación de unión por pernos del ensamble.....	52
Figura 4-12. Resultado del estudio de fatiga.....	52

Figura 4-13. Representación del resultado de fatiga en vertedera, no hay falla por fatiga.	53
Figura 4-14. Forma modal 1 para vertedera y ensamble.	54
Figura 4-15. Forma modal 2 para vertedera y ensamble.	55
Figura 4-16. Forma modal 3 para vertedera y ensamble.	56
Figura 4-17. Forma modal 4 para vertedera y ensamble.	57
Figura 4-18. Forma modal 5 para vertedera y ensamble.	58
Figura 4-19. Frecuencia calculada para cada caso.	59
Figura 4-20. Representación de los resultados de impacto del ensamble y su límite elástico.	60
Figura 4-21. Esfuerzos de impacto en cada caso para el ensamble.	61
Figura 4-22. Arado utilizado en la región de Guanajuato.	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Especificaciones de operación del arado de vertedera (Catalán, 2008).	15
Tabla 2-2. Prestaciones del arado de vertedera (Catalán, 2008).	15
Tabla 3-1. Características del suelo (Ahmadi, 2016).....	26
Tabla 3-2. Características operacionales (Catalán,2008).	27
Tabla 3-3. Características geométricas (Ibrahmi, 2015).....	27
Tabla 3-4. Variables para el Caso 1	38
Tabla 3-5. Variables para el Caso 2	39
Tabla 3-6. Variables para el Caso 3	39
Tabla 4-1. Resultados de los estudios aplicados a la vertedera con las variables del Caso 1.....	42
Tabla 4-2. Resultados de los estudios aplicados a la vertedera con las variables del Caso 2.....	43
Tabla 4-3. Resultados de los estudios aplicados a la vertedera con las variables del Caso 3.....	43
Tabla 4-4. Resultados de los estudios aplicados al ensamble con las variables del Caso 1.....	44
Tabla 4-5. Resultados de los estudios aplicados al ensamble con las variables del Caso 2.....	44
Tabla 4-6. Resultados de los estudios aplicados al ensamble con las variables del Caso 3.....	45

Tabla 4-7. Recálculo del caso 3. 62

Dirección General de Bibliotecas UAQ

1. INTRODUCCIÓN

Como se sabe la labranza de la tierra ha tenido sus orígenes desde tiempos remotos y las herramientas utilizadas para trabajar la tierra de igual manera han evolucionado para tener un mejor manejo de los suelos, mejorando la producción agrícola y el cuidado del mismo suelo donde los productos son cosechados. Además, se han utilizado mejores materiales para la fabricación de maquinaria agrícola, así de esta forma se genera mayor durabilidad ante impactos o esfuerzos que se lleguen a presentar al momento de trabajar el suelo. En años recientes el diseño mecánico aplicado al área agrícola ha cobrado importancia con el objetivo de favorecer el rendimiento de las herramientas de labranza, esto mediante el desarrollo de nuevos diseños.

El laboreo primario es indispensable para el tratamiento de los suelos, este debe hacerse con mucha precaución, ya que el suelo es muy delicado, las herramientas utilizadas, como la vertedera (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, ya que los utensilios que se usan no son los adecuados, por otro lado, la persona que realiza el trabajo debe ser muy cuidadosa y saber manejar dichos aparatos, conociendo sus límites de trabajo.



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

En el caso del arado de vertedera existen varios tipos entre los más importantes se encuentran (Figura 1-2):

- Helicoidales
- Cilíndricas
- Americanas o universales

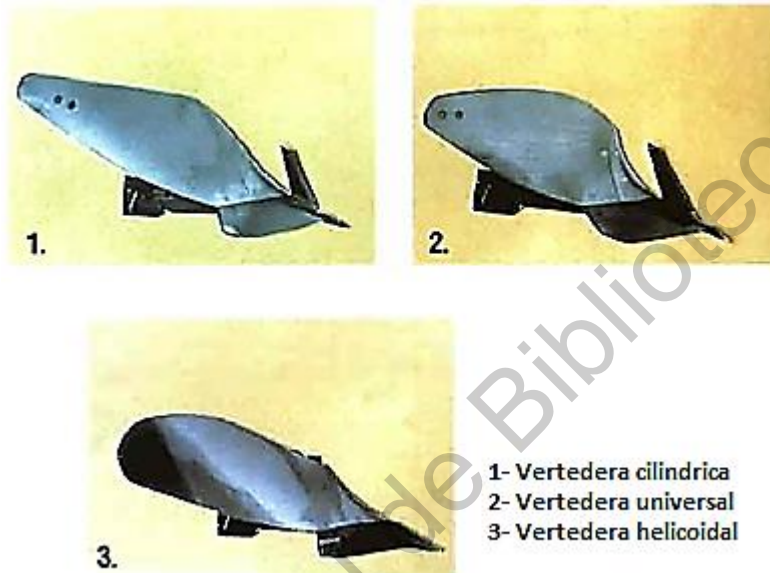


Figura 1-2. Tipos de arado de vertedera (Márquez, 2000).

Las cuales presentan características del resquebrajamiento de la tierra en diferentes rangos, eligiendo la universal como la más apta para el trato primario del suelo, pulveriza terrones y consigue porosidad para mejor almacenamiento del agua. En vista de su desempeño de trabajo podría decirse que es la combinación de la helicoidal y la cilíndrica, ya que su forma geométrica se encuentra en un punto medio entre las características de ambas. El nombre de “universal” no hace referencia a un arado de modelo único, ni tamaños definidos, si no que representa la característica de facilidad de uso, que se logra por su flujo de trabajo en comparación a la cilíndrica y la helicoidal, existiendo como se dijo en diferentes tamaños dependiendo también del aparato que mueve el implemento, pero

conservando características cercanas unas de otras, tanto operacionales como geométricas. Aproximadamente un arado de vertedera típico, como el mostrado en la Figura 1-1 tiende a tener un peso considerable, aproximadamente 30 kilogramos, eso dependiendo de los aditamentos que se usen.

El arado cuenta con más elementos que son de gran funcionalidad, como bien se sabe la reja, ubicada en la parte inferior es la que permite la entrada a la tierra y ocasionalmente genera el corte del terreno, otorgando características operacionales de profundidad de corte y velocidad de avance, el bastidor es el cuerpo en el cual todas las partes están montadas, este mismo puede contar con elementos extras para una mejor manejabilidad y corte para diversos tipos de suelos. En ocasiones el trabajador puede colocar una cuchilla horizontal al corte de la reja, permitiendo más flujo de trabajo, pero mayor sometimiento a esfuerzos.

Es importante saber que las características geométricas y operacionales de cada arado están ligadas al diseño de cada uno de los fabricantes, por lo que cada uno se desempeña de forma diferente ante los diversos terrenos. Es muy difícil hacer 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 cruzar alguna roca o residuos de mayor tamaño, de este modo se pone en riesgo la integridad del arado, pero principalmente se somete a un constante laboreo por terrenos que provocan su degradación o mejor dicho su desgaste y ser próximo a desecharse.

El presente trabajo comienza con el planteamiento del siguiente interrogante: ¿Cuál es el mejor diseño para un arado de vertedera? De manera general pareciera una pregunta simple, pero las tareas de labranza tienen su grado de complejidad y requieren especial atención. Es por eso que a continuación se presenta una revisión de los antecedentes relacionados con este trabajo.

1.1 Antecedentes

Como bien se sabe el laboreo primario de la tierra es muy utilizado para tratar los campos, en algunas ocasiones la compra de los implementos para preparar el suelo se realiza por recomendaciones de amigos o familiares por su uso constante. Por otro lado, el cálculo de las fuerzas que actúan sobre ese apero y la potencia requerida para moverlo son importantes para así conocer si en verdad el apero que se está utilizando es el adecuado. Una calculadora que haga esto de una forma más fácil es práctico para la futura selección de nuevos implementos, Ahmadi (2016) muestra una forma de hacerlo más rápido con el uso de una calculadora hecha en Excel para así por medio de parámetros mecánicos y físicos, las fuerzas que actúan sobre un arado de vertedera y la potencia necesaria para moverlo sean obtenidas al instante. Abriendo un panorama más claro para entender las fuerzas que están en juego en la interacción apero-suelo.

Así como existen trabajos en los cuales las fuerzas que actúan en un arado son consideradas simplemente por la carga generada por una bestia de tiro (Diego, 2012), también se han logrado trabajos tan extensos como el de Godwin (2007) que muestra información del suelo donde se hacen los estudios y la geometría del arado para modelar las fuerzas en la vertedera o la reja, las características del suelo como variables de control son de gran influencia, ya que los suelos cambian conforme a cada región, al igual la geometría del arado es única para cada modelo y dependerá del laboreo y experiencia del trabajador. Su trabajo se basa en principios básicos de mecánica de suelos y mecánica Newtoniana. El desarrollo de las ecuaciones se muestra claro para poder hacer uso de ellas en caso de que se requiera calcular las fuerzas para determinado modelo que se tenga, también se comparan las relaciones que existen entre la velocidad de trabajo y la profundidad en la que el arado entra en la tierra, mostrando que variando ambos parámetros la fuerza de tiro total se modificará.

Como ya se mencionó las fuerzas que el suelo genera al arado tienen gran impacto conforme a la forma que el arado tendrá, 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 se incrementa por el área de la vertedera, afectando principalmente la planeación de producción, calidad de la labranza y el consumo energético.

Esto dependerá del tipo de suelo que se esté laborando y la humedad en el mismo, en conjunto con el tiempo de trabajo y la profundidad de laboreo. Los esfuerzos son provocados principalmente por la presión aplicada, la dureza de la herramienta y del mismo suelo, haciendo que el desgaste sea más constante (Natsis, 2008).

Natsis (2008) indica que la mayoría de las herramientas usadas en el laboreo son fabricadas de acero al carbón con un tratamiento térmico, en ocasiones se utiliza hierro fundido para hacer las rejas del arado, esto permitiendo un desgaste menor, además hace hincapié en la cantidad de humedad del suelo, ya que la relación va de 10% a 26 %, este rango es en el cual el desgaste se presenta más, ya que crece la dureza del suelo donde se trabaja.

Se han hecho estudios completos para la vertedera por medio de sus características operacionales de forma simulada y física, esto para comparar los resultados de desempeño y el grado de error con el cual se trabaja al momento que se conjuntan dichos resultados (Ibrahmi et al., 2015), esto permite tener una amplia información sobre los esfuerzos que sufre dicho artefacto y observar las fuerzas que se producen al hacer el paso por el suelo. Las simulaciones por elemento finito, con el software adecuado, son por lo general utilizadas para reducir los tiempos de experimentación física y las grandes cantidades de materiales que se necesitan para generar un buen estudio o un prototipo, acercándose a resultados similares en la vida real.

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 dice 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 el instrumento. Algunos experimentos para ser observados de mejor forma son realizados en contenedores de suelo, los cuales son controlados con los componentes adecuados para simular el suelo de la región, obteniendo en su caso resultados no similares a los calculados por un FEM (Método de Elemento Finito), sino que coinciden en comportamiento.

Es muy difícil hacer una optimización completa de un arado de vertedera ya que los parámetros geométricos y condiciones de operación son varias, además en casos de experimentación se deben dejar algunos parámetros fijos para observar la variación de otro en relación con los demás, es por eso que Shrestha et al. (2001), además de basarse en los parámetros anteriormente mencionados como principales para el estudio paramétrico del desempeño de un arado, hacen una experimentación en un entorno controlado, para su caso de estudio un contenedor de suelo, basándose en fórmulas de autores que determinan las fuerzas que actúan sobre el apero con relación a las características geométricas y propiedades de los suelos.

En el laboreo se busca una herramienta versátil ante la calidad del suelo, Nava (2012) menciona las características de los materiales utilizados para la construcción de su prototipo y el diseño en CAD que se usó para resquebrajamiento de los suelos de la región de Oaxaca, se le aplicó además un estudio de elementos finitos por medio de un mallado que calcule los esfuerzos a lo largo del implemento, así como los puntos críticos de falla ante fuerzas estáticas, dichas fuerzas son

tomadas por la fuerza axial que genera una bestia de tiro al jalar dicho apero, los resultados mostrados son importantes ya que como se ha dicho anteriormente las características de operación de los aperos quedan limitadas por la experiencia y simplemente por cumplir un determinado trabajo.

La adquisición de datos y la comparativa de resultados físicos y simulados han tenido gran auge a lo largo de años posteriores Morales (2015) hace estudios de elemento finito a cada parte modelada de un nuevo sistema de arado para pequeños agricultores, comparando además las cargas generadas en simulación por las que calcula utilizando sensores y una tarjeta de adquisición de datos, limitado a las respuestas de los sensores y no tomando en cuenta las fuerzas que genera el suelo, teniendo buenos resultados del diseño al momento de someterlo ante el suelo, pero con la limitante de las características abrasivas.

Como se sabe las vertederas que se han fabricado a lo largo de la historia se han realizado por la misma experiencia del fabricante (Gutiérrez de Ravé, 2011), usando en ocasiones la estampación para su producción, lo cual implica someter a presión entre dos moldes el material a usar y darle una geometría establecida, de igual forma la mayoría de las herramientas de laboreo primario en sus inicios han sido elaboradas por prueba y error (Ibrahmi, 2017).

Basados en estudios de los años 90's la caracterización de la forma de la vertedera se hizo por medio de modelos paramétricos de aproximación de la superficie en los planos x-y (Figura 1-3) de la vista frontal de la vertedera, esto para tener la forma de la cara principal, una vez teniendo los puntos de control usando incidencias de un láser, por medio del algoritmo de optimización se puede generar un balance de pesos para la posterior fabricación (Gutiérrez de Ravé, 2011). Para estos estudios realizados se han utilizado fotografías, puntos de contacto en la vertedera y láser para determinar la forma a la cual se le generará el estudio de optimización o mejora, se generan perfiles de la vertedera que, desde el punto de vista de manufactura, contienen formas que son difíciles de hacer por medio de un

proceso de manufactura convencional. Concluyendo que los ángulos de elevación y corte son los incidentes para la forma de la vertedera que entra en función con su método analítico paramétrico.

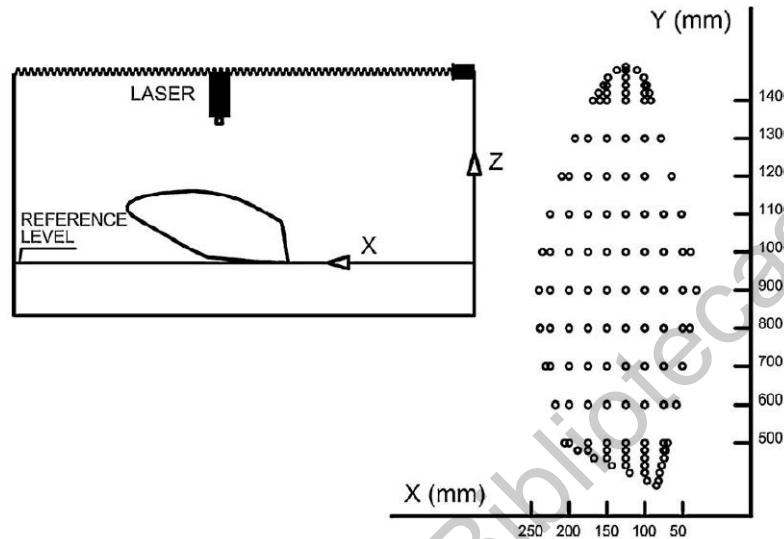


Figura 1-3. Cálculo de la forma de la vertedera por láser (Gutiérrez de Ravé, 2011)

Ghahramanian (2014) muestra no sólo una nueva forma geométrica de la vertedera, sino que también muestra la implementación de la mezcla de un arado de vertedera convencional y uno reversible, generando un arado de vertedera con doble cara o doble sentido, concluyendo por uso de información posterior que su desempeño se muestra dentro de los rangos de trabajo y es buena opción a la hora de seleccionar la herramienta de laboreo primario para evitar el gran consumo de combustible y pesos innecesarios.

Hablando del punto de vista geométrico y de las características de suelo incidentes sobre la vertedera, como puede ser la fuerza de la ruptura del suelo, el peso, la inercia del mismo implemento y las fuerzas de tiro necesarias para moverlo, Formato (2017) busca una forma óptima de la vertedera que sea de ayuda para minimizar los costos y el consumo de potencia. El caso de estudio se basa en un arado comercial para ser comparado con la optimización, los puntos que se generan

a su vez son después convertidos en una superficie paramétrica que está ligada a las fuerzas que se calcularon y a las propiedades del suelo con el que se está trabajando, en su caso las características del suelo no cambian, es por eso que al último se genera un poco de incertidumbre, pero concluyendo que el estudio puede ser aplicado aun con los grandes cambios naturales que presentan los suelos.

En efecto el estudio de la vertedera es sino una larga brecha de investigación, sus comportamientos han generado que los estudios se vuelvan más enfocados a un sólo propósito, en este caso al desgaste que sufre, por un lado se sabe que la vertedera y su acción sobre el terreno genera mucha demanda de energía, es por eso que Horvat et al. (2008) dicen que en años recientes la tribología ha tomado las riendas de estos avances, dicha ciencia se encarga de los estudios de fricción, el desgaste y la lubricación que hay durante el contacto entre dos superficies. Los autores dan una herramienta muy versátil para evitar el desgaste, la cual consiste en aplicar capas de soldadura en la reja de la vertedera, que es la que sufre un mayor deterioro en el avance del corte, su técnica se basa en la aplicación de material por medio de la técnica SMAW (Shielded Metal Arc Welding) y un tratamiento térmico por HFIW (High Frequency Induction Welding).

La selección del apero perfecto es una tarea un poco complicada considerando las características anteriores con las que los autores hacen sus estudios, los instrumentos no están limitados sólo a las propiedades geométricas o de laboreo, si no que en algunos estudios es posible cambiar sus características de desempeño en tracción y dureza (Singh et al., 2016). Es muy versátil aplicar un recubrimiento de acero con porcentajes altos de cromo, para así disminuir el desgaste ante el arrastre y choque de materia en los suelos. Se ha estudiado el caso en palas de resquebrajamiento del terreno, aumentando así sus propiedades mecánicas del mismo implemento, generando una mayor tasa de trabajo en terrenos secos, aguantando en su caso más que un tratamiento térmico convencional. La normativa ASTM G 99, muestra el desgaste de una pieza ante el

deslizamiento en un plato giratorio, generando así cálculos del desgaste de la pieza en pérdida de masa, para después ser comparados de forma física con la acción verdadera del trabajo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar y diseñar un arado de vertedera universal usando el método de elemento finito, para adaptarse a las características de los suelos de una región específica, favoreciendo a la disminución en las fallas del apero por el constante laboreo.

1.2.2 Objetivos particulares

- Realizar revisión de literatura para determinar características de desempeño del arado.
- Determinar variables y necesidades del diseño para plantear el problema de diseño.
- Modelar el diseño del arado en SolidWorks.
- Calcular las fuerzas estáticas y dinámicas que interactúan con el apero.
- Analizar por elemento finito el arado.
- Aplicar metodología de diseño mecánico para obtener el diseño factible.
- Realizar el análisis de tres casos de estudio bajo diferentes condiciones de suelos.

1.3 Justificación

Como bien se sabe el arado de vertedera es el más utilizado para labores de preparación de los suelos, además de ser un utensilio muy común y de buen aguante ante suelos diversos, por lo que se ha de enfocar el estudio a mejorar su desempeño ante terrenos de la región.

La experimentación física en este caso de estudio es un tanto pesada por las condiciones que se deben llevar y características que se vayan a considerar, como tal vez el suelo de experimentación con sus componentes específicos en cantidad y espacio, los materiales de construcción para los prototipos y además la instrumentación de los utensilios para la medición de las variables a tratar. Por lo que una alternativa viable es la de simulación por medio del Método de Elementos Finitos el cual permite tener un modelo claro de estudio y la facilidad de variar los parámetros de acuerdo con las necesidades del diseñador. Para así de este modo generar estudios específicos y determinar las características operacionales y geométricas del arado. Además de tener un conocimiento sobre las fuerzas que el suelo ejerce sobre el apero, en consecuencia, esto genera esfuerzos sobre cada parte del arado, llevando a un constante deterioro de las partes.

No hay un método general para diseñar la vertedera del arado, es por eso que en el modelo que se propondrá de acuerdo con la revisión de literatura, además del cálculo de las fuerzas que actúan sobre el arado, deberán considerarse el estudio de impacto, análisis modal, fatiga y estudios estáticos, esto con la ayuda de la simulación por elementos finitos en un entorno CAD.

1.4 Descripción del problema

La amplia gama de selección de un arado para determinado trabajo es una tarea muy cansada, más si no se sabe con seguridad el terreno en el que se va a trabajar, llevando el arado que se seleccionó a sometimiento de esfuerzos muy elevados, esto provoca que se dañe o su vida útil se reduzca considerablemente.

Conociendo las partes fundamentales del arado y la geometría de éste es de gran ayuda al momento de seleccionar el apero adecuado, además de las condiciones del suelo que se presentan a lo largo del año, ya que el tipo de suelo y la cantidad de humedad en el mismo son de gran impacto en el desgaste que se pueda presentar si no se hace de manera correcta el laboreo primario.

La geometría de la vertedera varía conforme la experiencia de cada trabajador al momento de seleccionarla y utilizarla en el suelo, si el trabajador conoce las zonas que son más próximas a desgastarse o dañarse ante algún impacto, entonces la persona pensaría más sobre la incidencia de su herramienta ante el suelo y así podría ahorrar tiempo de trabajo y consumo de combustible, ya que el trabajo se estaría realizando de una forma correcta, esto implica el conocimiento de las fuerzas que actúan sobre el arado al momento de trabajarlo. Dichas fuerzas pueden variar por las características operacionales, mayormente por la velocidad y la profundidad de trabajo del apero.

De este modo la simulación para la observación de estos puntos críticos es una herramienta muy útil para identificar y prevenir el daño de su herramienta, aumentando la vida útil de la misma.

1.5 Planteamiento general

Encontrar un diseño factible de un arado de vertedera considerando como variables de diseño: las características operacionales (velocidad y profundidad de trabajo), así como las fuerzas de interacción: 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. Siguiendo además el diagrama del planteamiento general (Figura 1-4).

Conforme a la aplicación de los estudios y las fuerzas calculadas, dichos estudios deberán cumplir con las siguientes características: el estudio estático deberá cumplir con un factor de seguridad mayor a dos, para el estudio de fatiga y las cargas constantes se deberá tener un ciclo de vida infinito, para el estudio modal, la frecuencia de trabajo debe estar por encima o por debajo de la frecuencia fundamental del sistema, esto para que el sistema no entre en resonancia y por último el estudio de impacto no debe sobrepasar el esfuerzo último a la fluencia, ya que si lo hace el diseño se verá afectado.

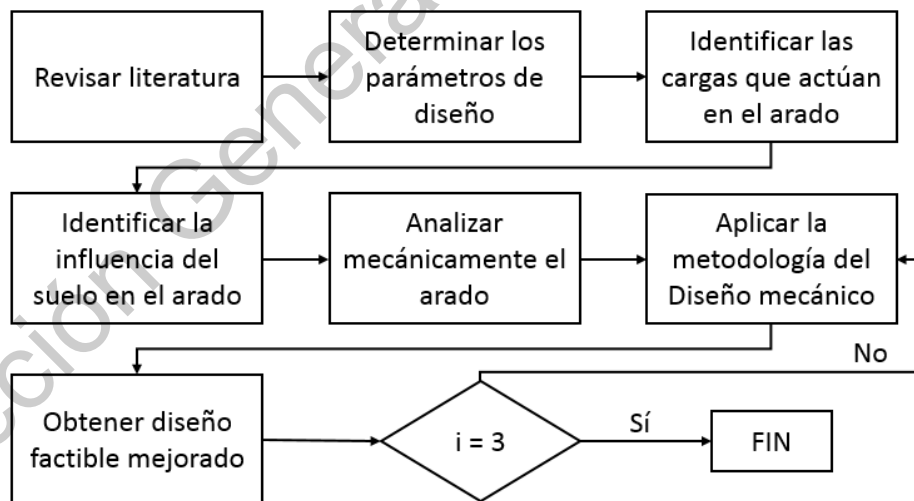


Figura 1-4. Diagrama del planteamiento general.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

A lo largo del texto se han especificado las características y formas más comunes de la vertedera, seleccionando el arado de vertedera universal por sus características operacionales y por su gran impacto en el trabajo de la tierra.

2.1 Laboreo primario y sus fuerzas de interacción

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 es 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, tomando la universal como la más apta para el trato primario del suelo, pulveriza terrones y consigue porosidad para mejor almacenamiento del agua.

El arado se compone principalmente de la vertedera, reja y opcional la cuchilla en caso de suelos con mayor humedad, el trabajo del arado dependerá más de la velocidad del trabajo y el largo de la reja para mayor profundidad de trabajo, esto relacionado a lo realizado por Catalán (2008), el cual muestra tablas de especificaciones de trabajo y prestaciones que otorga el mismo apero (Tabla 2-1 y 2-2). De igual manera la velocidad del laboreo da 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).

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

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

2.1.1 Tipos de suelo

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

- 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

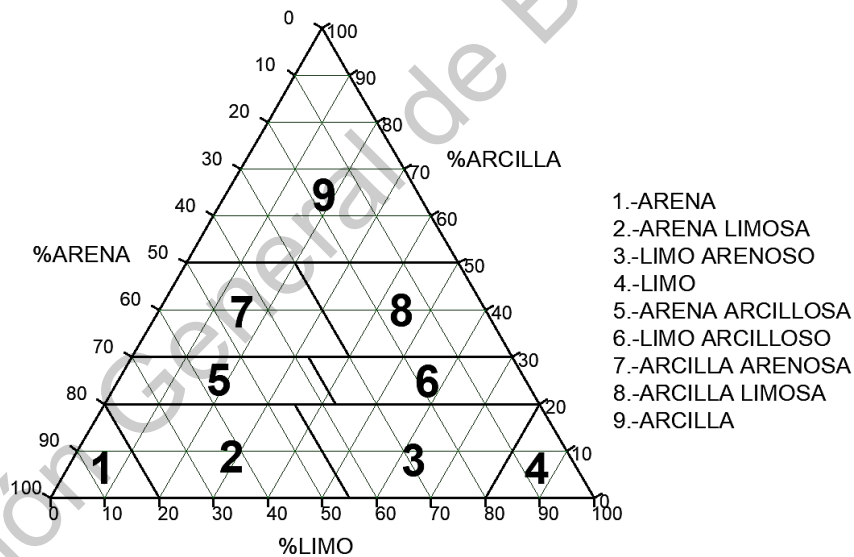


Figura 2-1. Clases texturales de los suelos adaptado de (Crespo, 2004).

Los suelos de estudio son por lo general los mencionados con anterioridad (arcillosa, limosa, arenosa) 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 establecidas para los casos de estudio, dichas fuerzas fueron calculadas con lo establecido por Ahmadi (2016).

2.1.2 Interacción de fuerzas

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

- Debido al corte del suelo (Figura 2-2 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

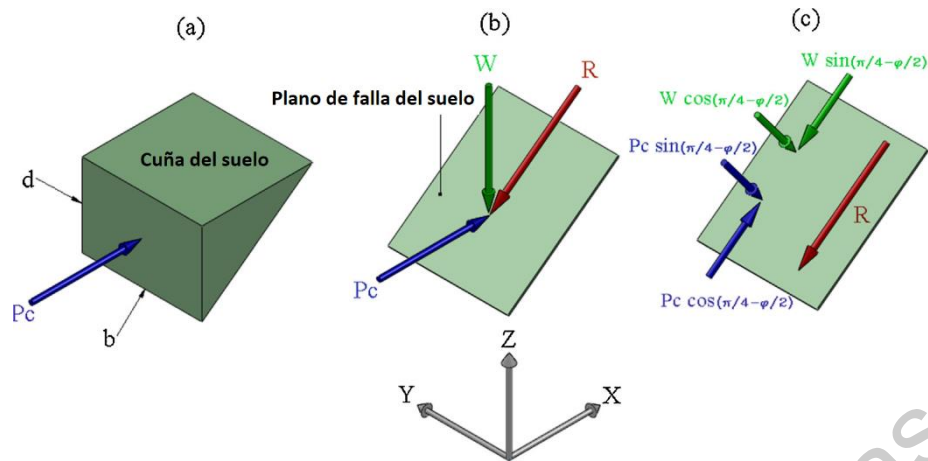


Figura 2-2. Comportamiento del suelo al ser cortado: Traducido de (Ahmadi, 2016).

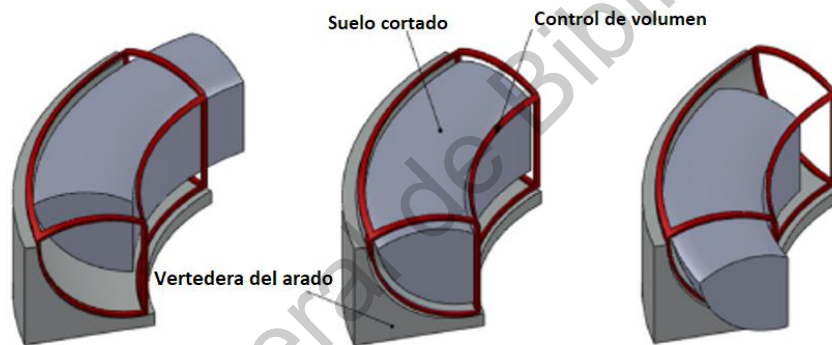


Figura 2-3. Comportamiento del suelo a lo largo de la vertedera: Traducido de (Ahmadi, 2016).

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 (Figura 2-3) y la cohesión del suelo debido a la cantidad de humedad.

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, 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.

2.2 Diseño mecánico

Diseñar es formular un plan para satisfacer una necesidad específica o resolver un problema particular. Si el plan resulta en la creación de algo físicamente real, entonces el producto debe ser funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que pueda fabricarse y comercializarse.

Las consideraciones de diseño son puntos clave para poder determinar características en el mismo diseño y determinar los puntos frontera, estas consideraciones están relacionadas unas con otras, ya que influyen directamente a otras características en el diseño.

Para las tareas agrícolas es necesario que las herramientas utilizadas tengan una buena resistencia ante la tarea que se presenta, en este caso la interacción con el suelo, los herramientas entonces además de contar con una buena resistencia, deben cumplir con la dureza necesaria para evitar fallas, dicho de otro modo, debe ser capaz de oponerse a ser rayado, penetrado o desgastado de una manera muy fácil.

Según la norma ISO 5718 las herramientas de trabajo agrícola deben cumplir con una dureza mínima de 38 HRC, con la cual será referencia para seleccionar el material adecuado en el diseño, además de contar con una masa ligera la cual pueda ser trasladada de forma sencilla por el sistema de arrastre usado.

2.3 Herramientas y recursos de análisis por elemento finito

Puede decirse que algunas herramientas muy prácticas y sencillas de usar son las computacionales, tomando en cuenta los entornos CAD, que permiten el desarrollo de modelos tridimensionales, para tener prototipos rápidos, de igual manera pueden aplicarse estudios a los diversos cuerpos diseñados para observar su comportamiento ante diversas cargas. Todo esto del apoyo de la simulación por elementos finitos la cual es una herramienta de solución matemática versátil para el cálculo de resultados en tiempos cortos.

2.3.1 Análisis por elemento finito

Es de forma general un método numérico que ayuda a aproximar soluciones de problemas que cuentan con ecuaciones diferenciales difíciles de resolver de forma analítica. El tomar mediciones o muestras en ocasiones puede ser peligroso para poder observar cómo es que se comporta algún sistema o simplemente para validar algún resultado ya obtenido y sólo compararlo, por lo que esta técnica ahorra tiempo y evita accidentes, la simulación en este sentido se vuelve más factible y los resultados son próximos a la experimentación física o de campo.

La metodología que se siguió para el análisis está determinada por el siguiente diagrama (Figura 2-4):

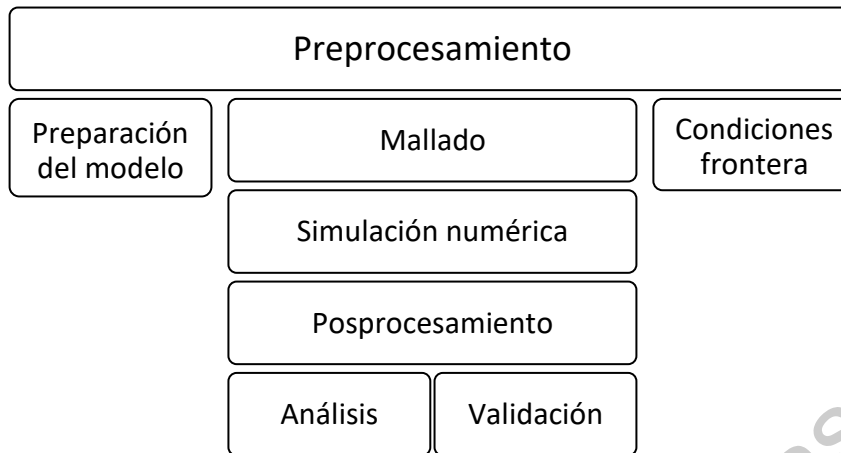


Figura 2-4. Metodología seguida en el análisis por elemento finito

Preprocesamiento: de forma general se debe construir una geometría en un entorno CAD, la cual se usará para la aplicación de la simulación, adicionar las condiciones frontera y la aplicación de cargas

Preparación del modelo: se estableció un modelo CAD a usar con el uso de SolidWorks, en ocasiones sólo se exporta, teniendo dificultades para resolver las formas complejas como esquinas inusuales y dejarlo listo para el mallado, para este caso la geometría se hizo desde cero, además cada pieza tiene cotas paramétricas que ayudan a modificar el diseño de una manera más rápida.

Mallado: son las zonas en el modelo donde las ecuaciones se aplicarán, dichas zonas están establecidas con un diseño de malla adaptativo, el cual presenta la característica de acercarse lo más posible a la forma de la geometría propuesta, estableciendo zonas de cálculo a lo largo del diseño. Debe ser un mallado de calidad para tener buenos resultados y además reducir tiempos de la simulación. Evitando además los errores computacionales a la hora de resolver.

Condiciones frontera: ayudan a la mejor resolución de las ecuaciones, las cuales pueden estar en estado estable o transitorio, las primeras no cambian a lo largo de la tarea computacional, mientras que las otras generan cambios y la

computadora debe ser capaz de interpretar dichos cambios al mismo tiempo que se resuelven las ecuaciones del modelo.

Simulación numérica: la solución es el proceso del cómputo actual para resolver el modelo, lo cual implica la resolución por lo general de ecuaciones no lineales definidas como funciones. La solución se hace a partir de iteraciones por métodos numéricos, generando iteraciones para cada elemento de la malla propuesta.

Postprocesamiento: en este caso una vez que las simulaciones ya fueron realizadas, se procede a la verificación de las mismas, lo cual implica revisar los resultados correspondientes y verificar si son confiables los resultados obtenidos.

Análisis: los resultados obtenidos en cada simulación son comparados para poder tener una relación entre ellos, así poder identificar de una forma más rápida cuáles son confiables y cuáles pueden ser descartados.

Validación: en este caso una vez revisados los resultados se tiende a concentrar, ya sea en tablas o un listado de datos, toda la información, que al final servirá para poder hacer los ajustes necesarios y tener un resultado factible que cumpla con las características que requeridas.

En general es necesario usar todo el potencial del análisis para poder generar información útil para el usuario, pero de igual forma se debe saber interpretar dicha información para que no surjan errores en el cálculo al momento de establecer restricciones en el modelo.

2.3.2 Recursos en SolidWorks

SolidWorks es un entorno de diseño asistido por computadora en el cual se puede modelar tanto en 2D como en 3D, no está limitado a la imaginación del diseñador ya que cuenta con una gran variedad de comandos para poder generar

los detalles en dichos modelos, partiendo de formas generales que con la practica hacen que el diseñador plasme sus ideas de una forma más fluida y libre, además con las herramientas extras como la simulación, permite simular estudios con los cuales tenemos acceso a características de las piezas que en forma física serían difíciles de calcular por un método analítico, generando así cálculos de una forma más sencilla y con el beneficio de ahorrar tiempo, obteniendo resultados aproximados a la vida real.

Los recursos utilizados en el modelado de la geometría fueron los comandos más simples que se presentan en las barras de tareas al inicio en la parte de croquis y generación de las geometrías en 3D, de este modo es que se estableció una geometría a la cual se le aplicaron las restricciones necesarias y se establecieron las cargas y fuerzas a lo largo del diseño, esto para poder simular dicho modelo con las características más cercanas a la física del mundo real.

Algunos de los estudios que se pueden realizar en SolidWorks son los siguientes:

2.3.2.1 Estudio estático

Se refiere a la concentración de esfuerzos causado por la aplicación de fuerzas que a la larga pueden llegar a afectar a un cuerpo o un punto en específico, poniendo en riesgo la integridad del dispositivo o herramienta. En su caso podría llegar a deformarse o fallar.

2.3.2.2 Estudio de fatiga

Para el caso ideal las cargas se consideran estáticas a lo largo del cuerpo, pero en su mayoría de aplicaciones, los elementos de máquinas, como ejes, brazos, eslabones, etc., están sometidos a esfuerzos fluctuantes los cuales por la cantidad de ciclos de trabajo pueden hacer que falle dicho componente, viéndose afectado en su vida útil.

2.3.2.3 Estudio modal

Se refiere al comportamiento de un componente ante una carga variante, provocando que el cuerpo al que se le aplique dicha carga oscile en frecuencias que pueden llegar a afectar la integridad de dicho cuerpo, las oscilaciones varían dependiendo del efecto y posición de la fuerza, teniendo en su caso puntos clave donde dicha oscilación afecta más.

2.3.2.4 Estudio de impacto

El impacto se refiere a la colisión de dos masas con velocidad inicial relativa. Para el caso de estudio en la vertedera, la incidencia es presente cuando en el terreno existen rocas o gravas, las cuales dentro del laboreo no están contempladas, de este modo se tendrá la afectación de la carga puntual en un instante de tiempo.

3. METODOLOGÍA

La metodología se llevó a cabo en 3 etapas como se muestra en el siguiente diagrama (Figura 3-1):

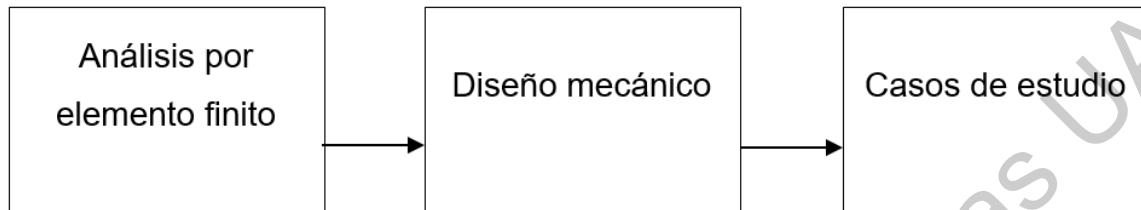


Figura 3-1. Etapas seguidas en la metodología.

Se realizó el análisis de las fuerzas que repercuten en el diseño conforme a las características del suelo, operacionales y geométricas, de igual forma los modelos realizados por medio de SolidWorks son paramétricos para poder modificar el ángulo de corte de una forma rápida en cada caso.

3.1 Análisis por elemento finito

Considerando las características y las variables de diseño es que se procedió a definir cada uno de los casos de estudio, los cuales tienen variables que pueden modificarse y unas que se dejaron fijas para evitar la generación de una gran cantidad de combinaciones en el universo de diseños posibles.

3.1.1 Características del suelo

Las características del suelo principales (Tabla 3-1) en el diseño son la cohesión (c), la densidad (ρ) y el ángulo de fricción interna del suelo, de los cuales las variables modificadas fueron la cohesión y la densidad entre sus rangos establecidos, en el caso del ángulo de fricción se tomó como un valor fijo para

cumplir con el equilibrio de fuerzas presentadas por Ahmadi (2016), mostrando el cálculo de la resistencia al corte del suelo en dos formas diferentes y concluyendo que la suma de dicha resistencia debe ser cercana a cero para poder tener un suelo cortado y volteado esto con el ángulo de fricción interna del suelo igual al ángulo de fricción entre el suelo y el metal.

Tabla 3-1. Características del suelo (Ahmadi, 2016).

<i>Tipo de suelo</i>	<i>Cohesión(kPa)</i>	<i>Densidad(ton/m3)</i>	<i>Ángulo de fricción interna del suelo (°)</i>
	<i>c</i>	<i>ρ</i>	<i>φ</i>
Arenoso	0	1.74-2.11	18-55
Arcilloso	0-28.2	0.84-1.89	0-37

3.1.2 Características operacionales

Con las características operacionales (Tabla 3-2) entorno a lo mencionado por Catalán (2008) tanto como la velocidad (v), profundidad (d) y anchura (b), son variables que se pueden modificar para el cálculo de las fuerzas a lo largo del implemento, cabe mencionar que los rangos a utilizar pueden modificarse o utilizar los rangos recomendables establecidos en la Tabla 2-1, para los casos de estudio los rangos de velocidad va de 1 a 2 m/s y la profundidad de 21 a 35 cm, la anchura se mantuvo fija en un rango de 30 cm establecido por el largo de la reja.

Tabla 3-2. Características operacionales (Catalán,2008).

<i>Velocidad (m/s)</i>		<i>Profundidad(cm)</i>		<i>Anchura(cm)</i>	
<i>v</i>		<i>d</i>		<i>b</i>	
<i>MÍNIMA</i>	<i>MÁXIMA</i>	<i>MÍNIMA</i>	<i>MÁXIMA</i>	<i>MÍNIMA</i>	<i>MÁXIMA</i>
1	2	21	35	30	50

3.1.3 Características geométricas

En el caso de los parámetros geométricos (Tabla 3-3) tanto el ángulo de elevación y el ángulo de corte son de importancia para el desempeño de la vertedera al momento de cortar el suelo, un ángulo de elevación (Figura 3-3) fijo garantiza un mejor paso en el corte de la tierra (Ibrahmi, 2015), para el caso del ángulo de corte (Figura 3-2), es el que determina la potencia gastada en la forma de arrastre, ya que a mayor ángulo de corte, mayor será el área de contacto de la tierra, aumentando así los esfuerzos.

Tabla 3-3. Características geométricas (Ibrahmi, 2015).

<i>Ángulo de elevación (°)</i>		<i>Ángulo de corte (°)</i>	
<i>β</i>		<i>θ</i>	
<i>MÍNIMO</i>	<i>MÁXIMO</i>	<i>MÍNIMO</i>	<i>MÁXIMO</i>
25	40	30	45

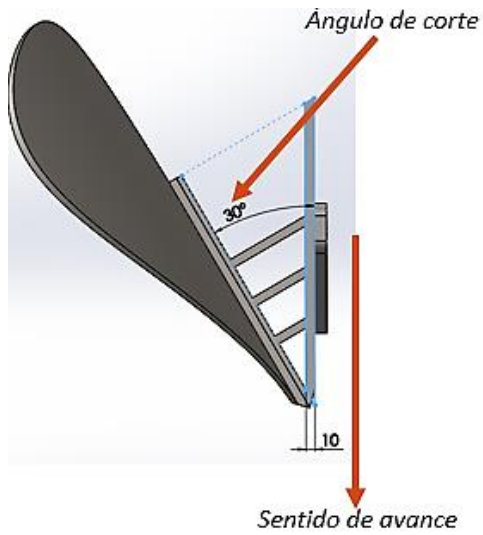


Figura 3-2. Representación del ángulo de corte.



Figura 3-3. Representación del ángulo de elevación.

3.1.4 Partes que conforman el arado

Márquez (2000) muestra las partes principales para tener un arado de vertedera, además de las partes extras para el laboreo primario del suelo, en el caso del diseño seleccionado, las partes que conformaran el ensamble final fueron la vertedera (Figura 3-4), reja (Figura 3-5) y el bastidor (Figura 3-6), los tres modelados en SolidWorks, la vertedera fue modelada basándose en las formas que hay en el mercado y las descritas por Ibrahmi (2015) por medio de la simulación, Ibrahmi (2017) por medio de líneas o splines y Formato (2017) utilizando la nube de puntos para generar la forma de la vertedera. La reja y el bastidor son propuestos para ser partes modeladas que puedan ser genéricas y modificarlas en tamaño y geometría de forma libre por cotas inteligentes.

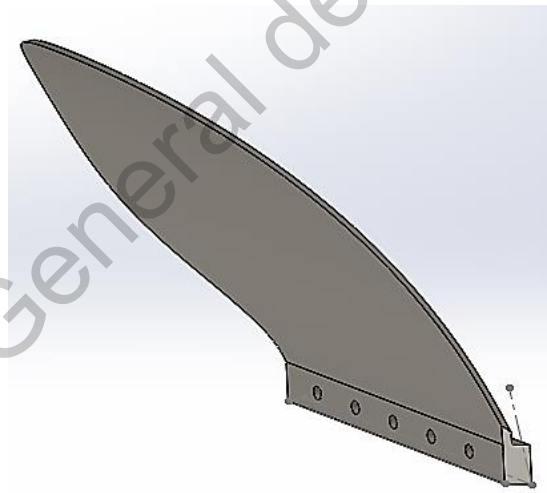


Figura 3-4. Vertedera modelada en SolidWorks.

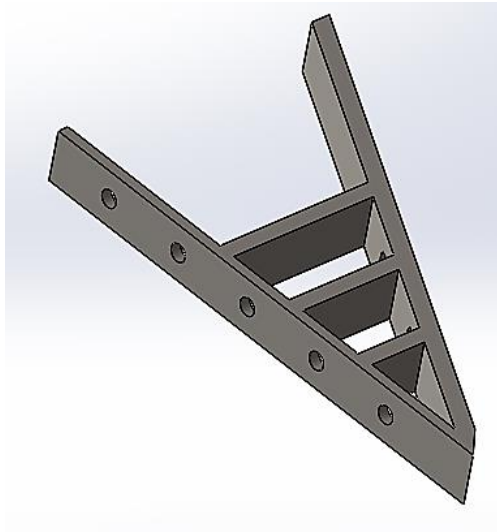


Figura 3-5. Reja modelada en SolidWorks.

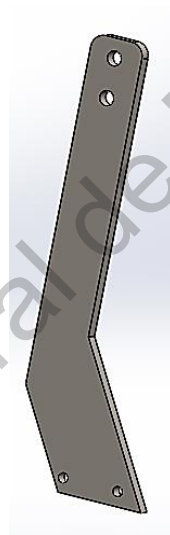


Figura 3-6. Bastidor modelado en SolidWorks.

3.1.5 Ensamble del arado

El ensamble de cada una de las piezas (Figura 3-7) se realizó con las restricciones por medio de los barrenos que sirvieron como referencia para hacer la unión por pernos del diseño, dichos pernos deben soportar los esfuerzos a lo largo del diseño para mantener la unión rígida con el constante laboreo.



Figura 3-7. Ensamble final del modelo.

3.1.6 Cálculo de las fuerzas

Ahmadi (2016) da la alternativa de poder calcular dichas fuerzas por medio de una calculadora interactiva (Figura 3-8), en la cual se hizo el vaciado de los datos de las características principales y así poder calcular las fuerzas totales a lo largo del implemento. Las variables de diseño junto con las características del suelo, operacionales y geométricas sirvieron para el cálculo de las fuerzas que repercuten en el arado y así poder establecer cada uno de los estudios y obtener los resultados.

Moldboard plow draft force and power calculator											
Inputs					Outputs						
	Name	Definition	Value	Unit	Value	Unit	Name	Definition	Value	Unit	
Soil parameters	c	Soil cohesion	1	kPa	1000	Pa	Pc	Draft force due to the soil cutting	379.53	N	
	φ	Angle of soil internal friction	30	deg	0.52	rad	Pdx	X component of force due to the soil displacement	46.94	N	
	$(\pi/4-\varphi/2)$	Angle of soil failure plane with horizon			0.53	rad	Pdy	Y component of force due to the soil displacement	26.29	N	
	ρ	Soil bulk density	0.84	ton/m ³	840	kg/m ³	Pf	Draft force due to the soil-metal friction	157.89	N	
	W	Weight of the soil wedge			93	N	Pu	Draft force of a plow bottom	584.36	N	
(Ahmadi, (2016))											
Plow parameters		Name	Definition	Value	Unit	Value	Unit	DP	Required power of a plow bottom	0.58	kW
		θ	Moldboard tail angle	30	deg	0.52	rad	Ps	Specific draft of the moldboard plow	0.92	N/cm ²
		M	Mass of a plow bottom			9.68	kg	P	Draft force of the moldboard plow	0.58	kN
		δ	Angle of soil-metal friction	30	deg	0.52	rad	DPR	Power requirement of the plow	0.58	kW
		$\mu=\tan(\delta)$	Coefficient of soil-metal friction			0.57					
	N	Number of plow bottoms	1		1						
(Ibrahmi, (2015))											
State parameters		Name	Definition	Value	Unit	Value	Unit	R	Soil shearing resistance	280.43	N
		v	Forward velocity	3.6	km/h	1	m/s	R'	Soil shearing resistance	279.74	N
		d	Working depth of a plow bottom	21	cm	0.21	m	C	Real cohesion	1005.57	
	b	Working width of a plow bottom	30	cm	0.3	m					
(Catalán, (2008))											

Figura 3-8. Calculadora usada para el cálculo de las fuerzas.

Los estudios realizados al modelo se presentan a continuación con una breve explicación de las características de cada uno:

- Estudio estático

Como bien se sabe para el estudio estático se usaron las fuerzas establecidas con la calculadora a lo largo del implemento, al aplicar el estudio con las fuerzas en la posición indicada (Figura 3-10 y Figura 3-11) se calcularon los esfuerzos a lo largo del diseño, los desplazamientos y el factor de seguridad, los esfuerzos deben estar por debajo del límite elástico, los desplazamientos deben ser pequeños y se establece en tanto un factor de seguridad mayor a 2 para garantizar un estudio factible del diseño.

- Estudio de fatiga

En el caso de la fatiga primero se estableció un diagrama de vida infinita del material, establecido por su límite a la fluencia en torno a los ciclos de trabajo, las iteraciones o ciclos son alternados, el diseño entonces debe soportar la carga de trabajo en ciclos, 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.

- Estudio modal

Para el estudio modal dependiendo de la frecuencia fundamental del sistema de arrastre es que se estableció el valor aceptable, esto para determinar que el sistema no entre en resonancia, en el caso de que el sistema tenga una frecuencia cercana a la de operación del motor de 3600 rpm hará que el sistema de ensamble oscile provocando así una falla por el fenómeno de resonancia, las frecuencias calculadas entonces deben estar por debajo o por encima de dicha frecuencia nominal del sistema, en este caso 60 Hz.

- Estudio de impacto

El impacto resulta cuando un objeto en movimiento choca con otro en un periodo de tiempo muy pequeño, provocando que en el choque que se generen esfuerzos a lo largo de ambos cuerpos, dichos esfuerzos no deben ser mayores a los esfuerzos últimos a fluencia, de forma contraria el material tendría un fallo por deformación debido al choque. Para este caso la velocidad y el ángulo de corte tendrán el papel principal en el estudio de impacto, ya que la roca (Figura 3-9) tendrá una velocidad inicial y estará en dirección del ángulo de corte, la altura de la posición de la roca se seleccionó de forma aleatoria, de la misma forma que se pudiese encontrar algún cuerpo en el terreno.



Figura 3-9. Representación de la roca antes del impacto y su dirección de movimiento.

Las dos fuerzas principales calculadas que actúan en el diseño son las mostradas en la Figura 3-10 para el caso del ensamblaje y Figura 3-11 para el caso de la vertedera, dichas fuerzas son, la fuerza en el fondo del arado y la componente Y de la fuerza debido al desplazamiento del suelo en la vertedera respectivamente, las cuales se establecieron en dirección del corte y perpendicular a la cara de la vertedera.

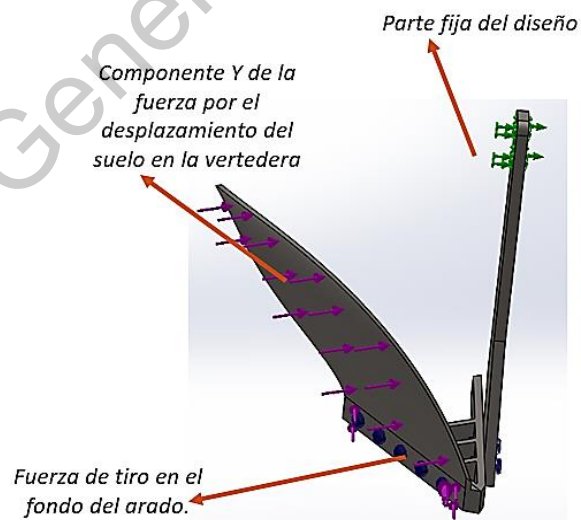


Figura 3-10. Fuerzas de interacción en el ensamblaje.

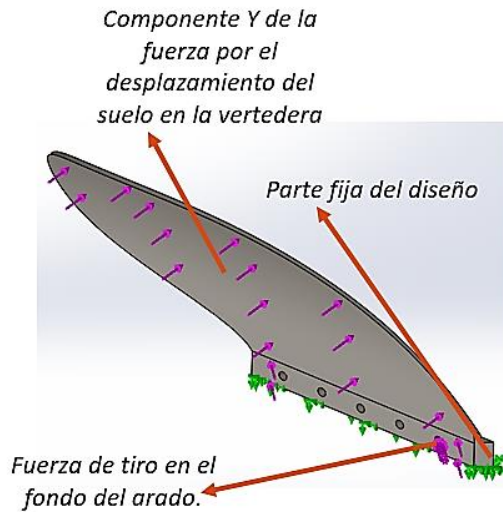


Figura 3-11. Fuerzas de interacción en la vertedera.

3.2 Diseño mecánico del arado

Se requiere que el diseño cumpla con especificaciones en cada uno de los estudios de los cuales al cumplirse se podrá establecer un diseño factible y seleccionarse para una tarea de laboreo primario. Los estudios estáticos, fatiga y modal fueron aplicados tanto en el ensamble como en la vertedera, el estudio de impacto sólo en el ensamble total.

Las fases de proceso de diseño (Figura 3-12) una vez seleccionada la necesidad se procede a hacer el análisis y optimización en cada caso de estudio para poder generar la simulación y obtener resultados factibles con lo establecido con anterioridad en cada simulación, de caso contrario las iteraciones se repiten hasta obtener resultados positivos.

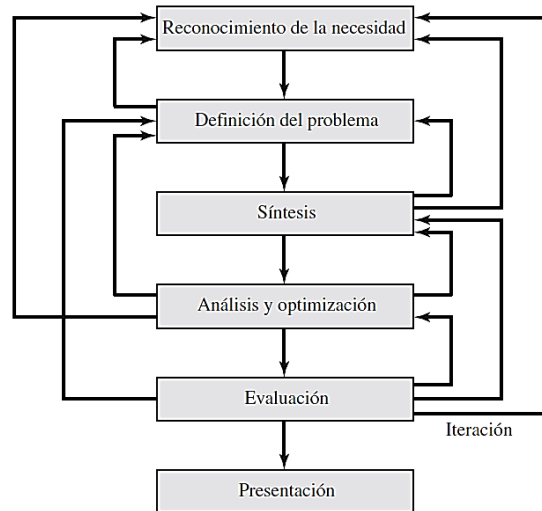


Figura 3-12. Fases del proceso de diseño. Fuente: (Budynas, R & Keith, J., 2012).

3.2.1 Descripción del problema

Para cada uno de los estudios mencionados se deben de cumplir los lineamientos requeridos para tener un modelo factible, se seleccionaron los rangos conforme a la bibliografía, en caso de que no se cumpla la factibilidad, se procede a modificar el modelo, en este caso se modificaron sus características geométricas para alcanzar el nivel adecuado aceptable y dentro de los rangos establecidos.

3.2.2 Definición de parámetros de diseño

Los parámetros seleccionados están ligados principalmente a la geometría del modelo, los cuales se establecieron para que fueran paramétricos y así poder modificar las formas del modelo al gusto del diseñador, de este modo se puede alcanzar la factibilidad de una forma más rápida, los parámetros más importantes fueron los ángulos de corte y de elevación para cada caso de estudio. Las características del suelo que se ingresaron en la calculadora se eligieron de tal modo que cumpla con las características de la humedad del suelo sin saturación,

media saturación y saturación total, con lo cual la cohesión se modificó considerablemente y se calcularon esfuerzos muy grandes en el modelo.

3.2.3 Evaluación

Se produjo una vez que cada una de las simulaciones se realizaron, de este modo podemos observar cuál de las simulaciones que no alcanza lo aceptable relacionado con las características que debe de tener, esto para asegurar que el modelo no presenta alguna falla, de modo contrario se estableció un dictamen para elegir la pieza del modelo a modificar de forma geométrica y aplicar la simulación hasta que se alcance un nivel aceptable sin fallas.

3.3 Casos de estudio

Para los tres casos de estudio se establecieron los valores conforme a las variaciones en las características del suelo y geométricas, que son las principales que afectan al momento de modificar las variables (Tablas 3-4 a 3-6), respectivamente para cada caso se tiene:

- Caso 1: Simula las características del suelo cuando la humedad es casi nula, presentando una cohesión de las partículas baja, de este modo el ángulo de corte no debe ser tan abierto, se optó por tener el ángulo menor de operación (30°), por estas características las variables como la profundidad y la velocidad se consideraron en los valores más bajos, esperando resultados en el cálculo de las fuerzas de igual manera mínimos, para después generar los estudios y cumplir con los lineamientos establecidos y que el diseño sea factible.
- Caso 2: Para este caso la humedad en el terreno aumentó, pero no se tiene una saturación, de tal modo que la cohesión se modifica, la velocidad como

la profundidad se aumentaron para tener un cálculo del efecto por las variables de operación.

- Caso 3: En este último caso el terreno cuenta con saturación por consiguiente espera la mayor cohesión de las partículas y la mayor oposición al corte de la tierra.

Para cada caso se calcularon las fuerzas generadas con dichas variables con la ayuda de la calculadora establecida por Ahmadi (2016). Calculando las fuerzas en el fondo del arado y en la cara de la vertedera, las cuales sirvieron después para aplicar las restricciones al diseño y generar de forma más simple las simulaciones.

Para aplicar cada uno de los estudios los casos se dividieron en dos, 3 casos de estudio para la simulación de sólo la vertedera y 3 casos en los cuales las simulaciones se aplicaron al ensamble completo, esperando los resultados factibles.

Tabla 3-4. Variables para el Caso 1

Variable	Caso 1
$C(kPa)$	1
$\phi (^{\circ})$	30
$\rho(Ton/m^3)$	0.84
$\theta (^{\circ})$	30
$\delta (^{\circ})$	30
N	1
$v(m/s)$	1
$d(cm)$	21
$b(cm)$	30
$M(kg)$	9.1
$F. Vertedera (N)$	26.29
$F. Fondo (N)$	581.11

Tabla 3-5. Variables para el Caso 2

Variable	Caso 2
$C(kPa)$	14.1
$\phi (^{\circ})$	30
$\rho(Ton/m^3)$	1.37
$\theta (^{\circ})$	37.5
$\delta (^{\circ})$	30
N	1
$v(m/s)$	1.5
$d(cm)$	28
$b(cm)$	30
$M(kg)$	9.347
$F. Vertedera (N)$	156.13
$F. Fondo (N)$	5130.72

Tabla 3-6. Variables para el Caso 3

Variable	Caso 3
$C(kPa)$	28.2
$\phi (^{\circ})$	30
$\rho(Ton/m^3)$	1.89
$\theta (^{\circ})$	37.5
$\delta (^{\circ})$	30
N	1
$v(m/s)$	2
$d(cm)$	35
$b(cm)$	30
$M(kg)$	9.68
$F. Vertedera (N)$	480.4
$F. Fondo (N)$	12635.77

Las variables seleccionadas que se dejaron fijas no repercuten tanto en el diseño, en cambio las variables como la cohesión, la densidad específica, el ángulo de corte, la velocidad y la profundidad, son las variables que han de ser modificadas y son además las que tienen mayor repercusión en el cálculo de las fuerzas totales que afectan al diseño en general.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

4. RESULTADOS

En la Figura 4-1 se muestra el render del modelo final que se ha usado durante las simulaciones, tiene características geométricas paramétricas, con las cuales es fácil modificar tamaños y formas del modelo, de esta manera las simulaciones para elegir el mejor modelo son más fáciles. Evitando generar muchos resultados o varias simulaciones, por lo cual en un solo modelo es probable aplicar todos los estudios dependiendo de las variables de entrada y las condiciones frontera que el diseñador proponga.



Figura 4-1. Render del modelo final del arado.

Los resultados fueron concentrados en las tablas 4-1 a 4-6, en las cuales se muestran los datos arrojados por el cálculo en cada uno de los estudios de cada caso en específico. La señalización en la celda con un color verde indica que el valor calculado cumplió con lo establecido en cada estudio y el resultado es factible. En caso de que la celda sea roja, indica que el resultado calculado no cumplió con

lo indicado, en dicho caso se habrá que realizar modificaciones en los parámetros del diseño para que la iteración se cumpla y se tenga un ensamble de diseño factible. Esto se logró con los gráficos realizados, se comparó el desempeño de la vertedera por sí sola y el ensamble.

De forma general los estudios primeramente se realizaron solamente a la vertedera, obteniendo que por sí sola la vertedera no sufre ninguna falla, aún con las condiciones que cada variable presenta, se observa que para el Caso 1 (Tabla 4-1) los esfuerzos que se generan por la simulación y con las variables de la Tabla 3-4 no superaron las condiciones establecidas para no ser un diseño factible.

Tabla 4-1. Resultados de los estudios aplicados a la vertedera con las variables del Caso 1.

<i>Vertedera</i>			
Caso 1	Estático	Esfuerzo	10.7 (MPa)
		Desplazamientos	0.207 (mm)
		Factor de seguridad	50
	Fatiga	Vida infinita	Sí
	Modal	Frecuencia	39.7 (Hz)

En la Tabla 4-2 las variables con las que se calcularon cada uno de los estudios ya son diferentes, para este caso es una condición en la cual la humedad ya se presenta en las condiciones de suelo, aumentando las características de cohesión, es por eso por lo que los esfuerzos aumentaron y el factor de seguridad disminuyó, las fuerzas en la cara y el fondo del arado son mayores, pero resultó en un diseño factible de la vertedera.

Tabla 4-2. Resultados de los estudios aplicados a la vertedera con las variables del Caso 2.

<i>Vertedera</i>			
Caso 2	<i>Estático</i>	<i>Esfuerzo</i>	63.5 (MPa)
		<i>Desplazamientos</i>	1.24 (mm)
		<i>Factor de seguridad</i>	8.3
	<i>Fatiga</i>	<i>Vida infinita</i>	Sí
	<i>Modal</i>	<i>Frecuencia</i>	39.6 (Hz)

Para los resultados de la Tabla 4-3 de cada uno de los estudios el terreno cuenta con saturación en la humedad, por consiguiente, se obtuvo la mayor cohesión de las partículas y la mayor oposición al corte de la tierra. Calculando fuerzas de mayor magnitud en sus respectivas posiciones para la siguiente aplicación de la simulación, por sí sola la vertedera mostró ser una pieza con un buen diseño, no se generó ninguna dificultad, por lo que su modelado es bueno para su aplicación en tierras con las características de cada caso es estudio.

Tabla 4-3. Resultados de los estudios aplicados a la vertedera con las variables del Caso 3.

<i>Vertedera</i>			
Caso 3	<i>Estático</i>	<i>Esfuerzo</i>	195 (MPa)
		<i>Desplazamientos</i>	3.8 (mm)
		<i>Factor de seguridad</i>	2.7
	<i>Fatiga</i>	<i>Vida infinita</i>	Sí
	<i>Modal</i>	<i>Frecuencia</i>	39.74 (Hz)

El problema se generó en el ensamble, ya que se tienen más piezas en su trabajo de modelado, de igual forma las condiciones frontera para aplicar cada estudio cambian, generando resultados diferentes a la vertedera por sí sola. La Tabla 4-4 muestra el cálculo de los estudios aplicados a los ensambles, de igual manera se calcularon las fuerzas en el fondo y cara de la vertedera conforme a cada caso de estudio, generando esfuerzos, desplazamientos, factores de seguridad y frecuencias diferentes.

Tabla 4-4. Resultados de los estudios aplicados al ensamble con las variables del Caso 1.

Ensamble			
Caso 1	Estático	Esfuerzo	38.9 (MPa)
		Desplazamientos	2.7 (mm)
		Factor de seguridad	6.8
	Fatiga	Vida infinita	Sí
	Modal	Frecuencia	22.5 (Hz)
	Impacto	Esfuerzo	27 (MPa)

Para el ensamble con características de las variables de Caso 2, los resultados mostrados en la Tabla 4-5 muestra un factor de seguridad bajo, donde se centró la atención para corregir el resultado.

Tabla 4-5. Resultados de los estudios aplicados al ensamble con las variables del Caso 2.

Ensamble			
Caso 2	Estático	Esfuerzo	39.3 (MPa)
		Desplazamientos	29 (mm)
		Factor de seguridad	0.79
	Fatiga	Vida infinita	Sí
	Modal	Frecuencia	20.55 (Hz)
	Impacto	Esfuerzo	38.5 (MPa)

La Tabla 4-6 es donde se calcularon los esfuerzos y desplazamientos más altos y en donde también se obtuvo el Factor de seguridad más bajo, debido a que las fuerzas en este caso son las más grandes generadas por la calculadora, por lo que al conjunto o el ensamble le costará más trabajar bajo estas condiciones.

Tabla 4-6. Resultados de los estudios aplicados al ensamble con las variables del Caso 3.

<i>Ensamble</i>			
Caso 3	<i>Estático</i>	<i>Esfuerzo</i>	1940 (MPa)
		<i>Desplazamientos</i>	90 (mm)
		<i>Factor de seguridad</i>	0.27
	<i>Fatiga</i>	<i>Vida infinita</i>	No
	<i>Modal</i>	<i>Frecuencia</i>	18.5 (Hz)
	<i>Impacto</i>	<i>Esfuerzo</i>	59.5 (MPa)

4.1 Análisis de resultados

Al tener una gran cantidad de variables, además de que se compararon los resultados de cada uno de los estudios se observó que las variables que se han dejado fijas para aplicar los cálculos de igual forma pueden cambiar de valor, estableciendo así una gran cantidad de información, por lo que con los resultados generados se procede a ser una interpretación y dictamen final de las características del arado. Para después establecer los criterios de modificación en los casos que no resultaron factibles.

A continuación, se muestra una interpretación por estudio de cada uno de los resultados que se generaron de las tablas anteriores, donde se presentaron los diseños más factibles y lo que no alcanzaron dicha factibilidad, los cuales han de ser modificados de forma geométrica, para así alcanzar el grado de operabilidad deseado, estableciendo que las variables expuestas en cada caso se asimilen a las del trabajo de campo, dicho de este modo el arado no fallará en ninguno de los casos establecidos. Las modificaciones se pueden realizar a los próximos estudios y generar diseños útiles y garantizados para el laboreo primario y que no presenten fallas muy próximas. La escala de los gráficos se elaboró en escala logarítmica, para que los rangos fueran mejor entendidos.

4.1.1 Estático

Los esfuerzos en la vertedera para los tres casos fueron factibles, en el caso 3 del ensamble en cambio se calculó por encima del esfuerzo último a la fluencia del material, el cual corresponde a 530 MPa, por lo que no es factible trabajar el modelo con esas características que se le dieron, ya que el implemento fallará por la alta concentración de esfuerzos. Los esfuerzos tanto en la vertedera como en el ensamble están representados en las Figuras 4-2 y 4-3. En las Figuras se muestran los esfuerzos mínimos y máximos a los que el modelo está sometido, a su lado derecho está la escala por colores de los esfuerzos, respectivamente los tonos cercanos a rojo representan las concentraciones más altas, los tonos cercanos a azul, las concentraciones más bajas.

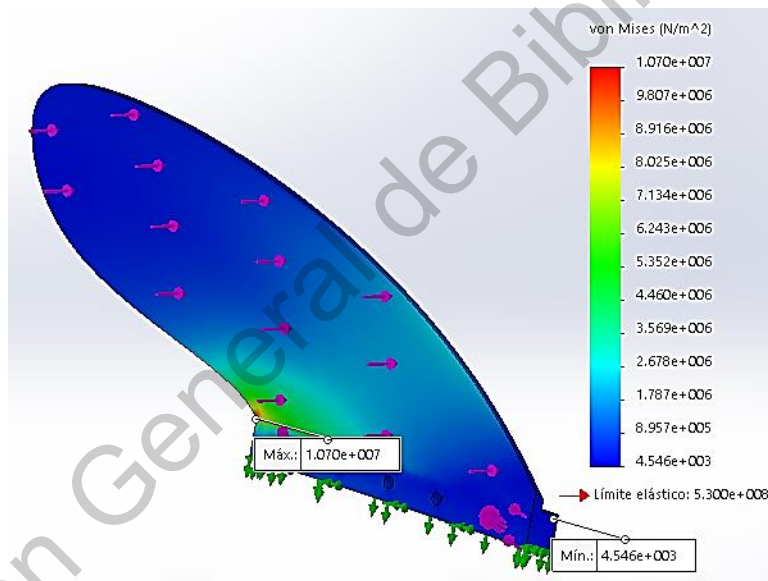


Figura 4-2. Representación de los esfuerzos en el estudio estático en la vertedera.

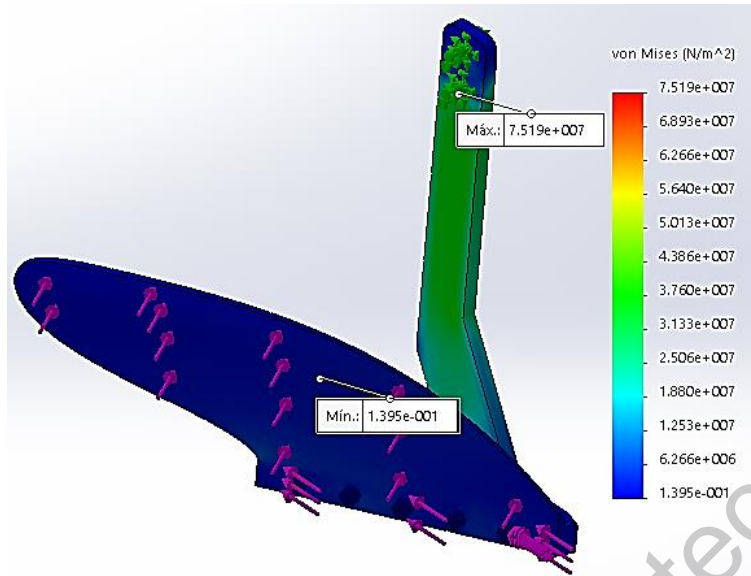


Figura 4-3. Representación de los esfuerzos en el estudio estático en el ensamble.

Para observar una clara representación de los esfuerzos en cada caso de estudio, los resultados se concentraron en un gráfico, la Figura 4-4 muestra la magnitud de los esfuerzos calculados, para el caso 3 del ensamble, el diseño superó el esfuerzo último a la fluencia.

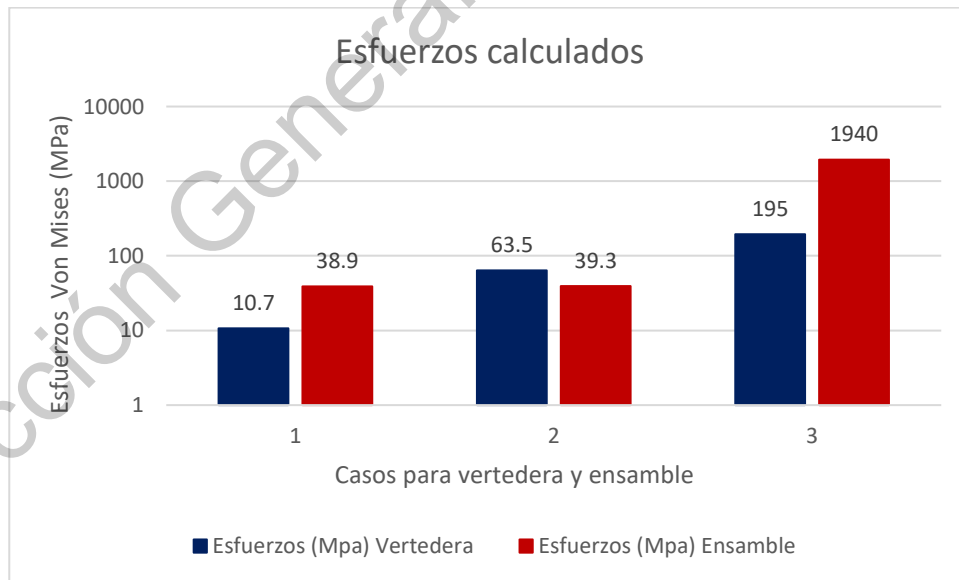


Figura 4-4. Comparación entre los esfuerzos de cada caso.

Los desplazamientos (Figura 4-5 y Figura 4-6) son menores en los casos de estudio de la vertedera, pero aumentan en los casos del ensamble cuando las condiciones del suelo aplicadas aumentan, generando desplazamientos en el material muy grandes y generando deformación en el material.

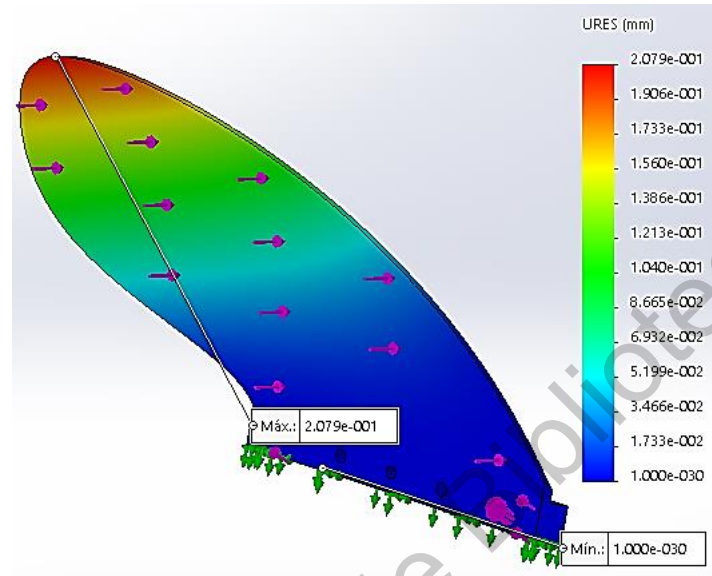


Figura 4-5. Representación de los desplazamientos en la vertedera.

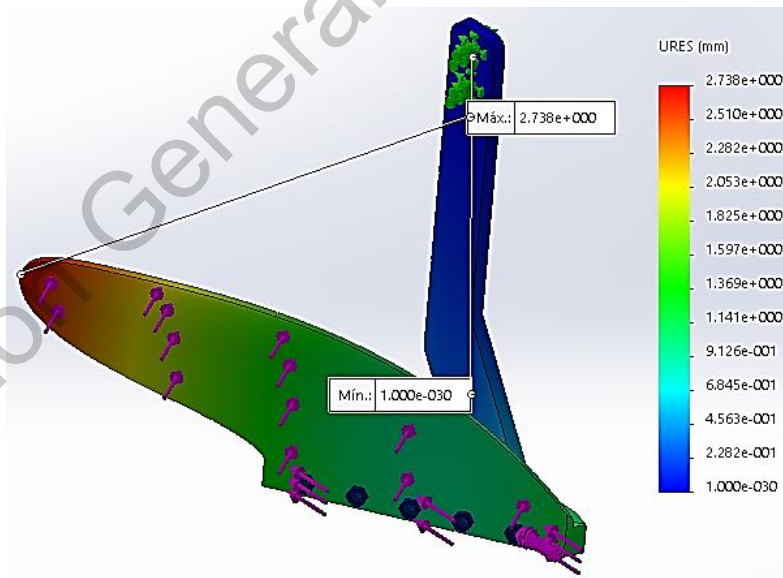


Figura 4-6. Representación de los desplazamientos en el ensamble.

Dada la compilación de los datos del desplazamiento, se puede observar en la Figura 4-7 que para el caso 2 y 3 del ensamble los desplazamientos calculados superan por mucho a los demás desplazamientos tanto de vertedera como el sobrante del ensamble, no se recomienda tener grandes desplazamientos, ya que puede llegar a sufrir deformación plástica el modelo.

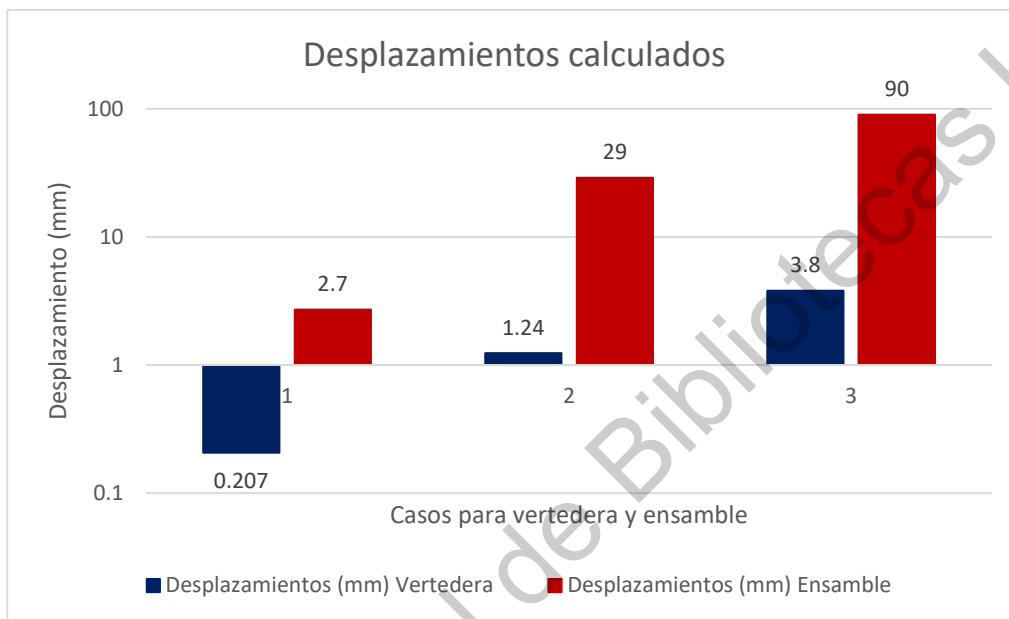


Figura 4-7. Comparación de los desplazamientos en cada caso.

Las Figuras 4-8 y 4-9 representan los resultados obtenidos del factor de seguridad en la simulación de la vertedera y el ensamble, mostrando las zonas en las que el factor es el más alto y bajo, dichas zonas son las próximas a fallar, pues al ser un estudio estático, representa zonas de alta concentración de esfuerzos.

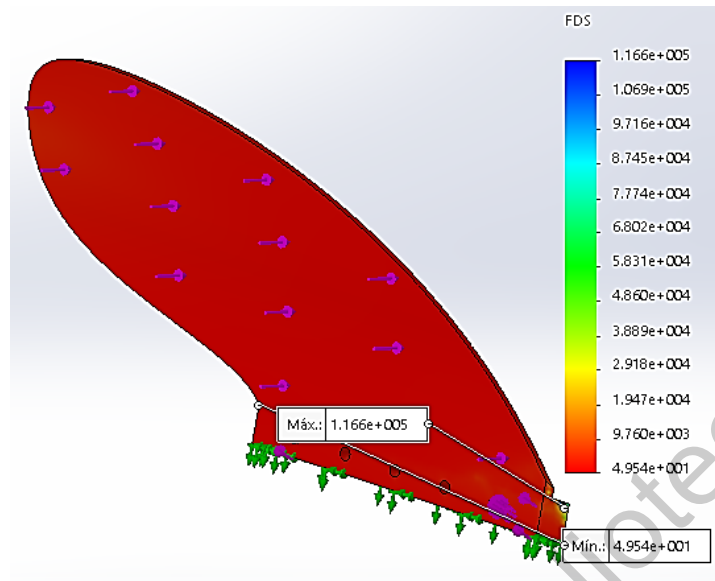


Figura 4-8. Representación del factor de seguridad en la vertebra.

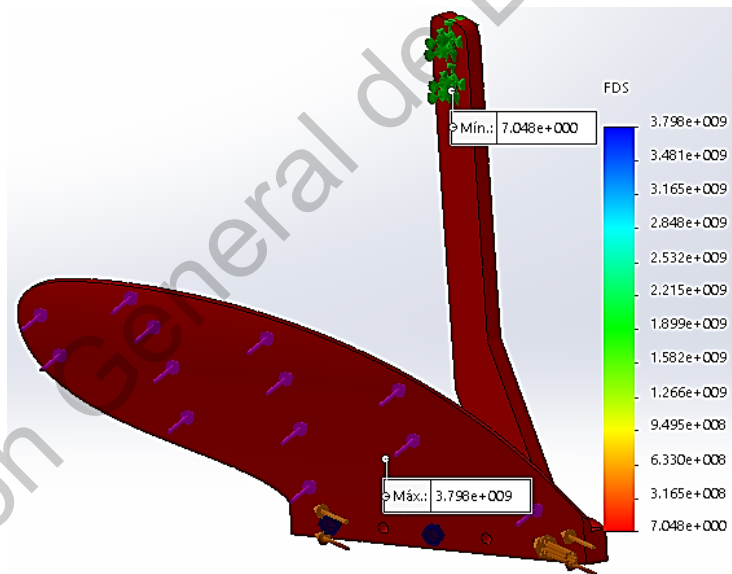


Figura 4-9. Representación del factor de seguridad en el ensamble.

Por tanto, todos los factores de seguridad para cada caso fueron concentrados en el gráfico representado en la Figura 4-10, para este caso en relación con los esfuerzos y desplazamientos de los casos 2 y 3 del ensamble puede darse a notar que sus factores de seguridad en tanto son bajos, obtenido que dichos modelos no son factibles. Para los demás casos, el Factor de Seguridad se calculó por encima de dos, estos casos fueron bien aprobados.

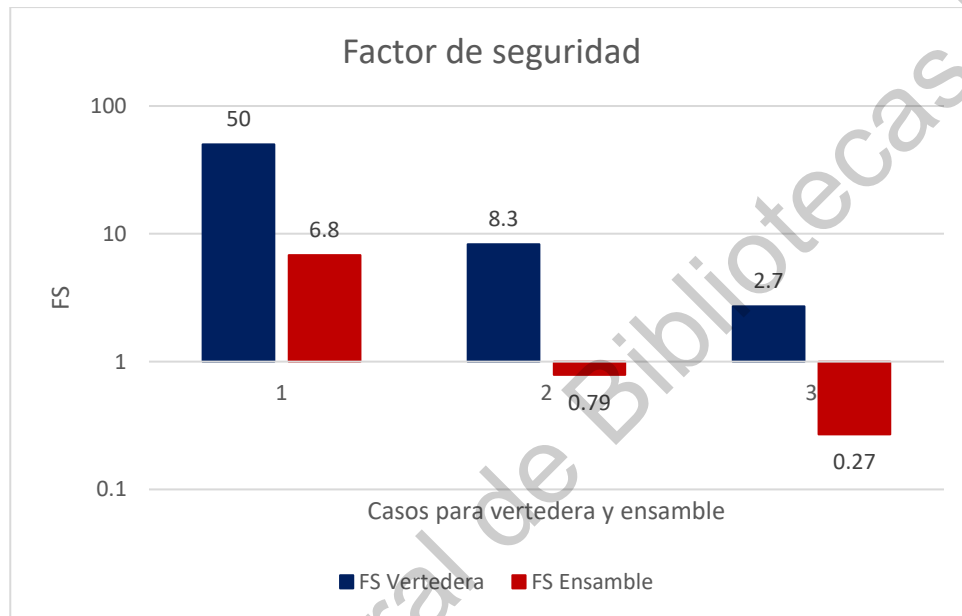


Figura 4-10. Factor de seguridad en cada caso.

En todos los casos la comprobación de la unión rígida por pernos es factible (Figura 4-11), garantizando que no hay falla en los pernos que se usan para mantener el ensamble unido. Dichos pernos son de cabeza hexagonal, simulados con un acero 1045. Por lo que se recomienda el uso de pernos de grado 2 o 5 para hacer la unión rígida entre las piezas más segura, designando los diámetros específicos del perno de acuerdo con la norma SAE-J-429.

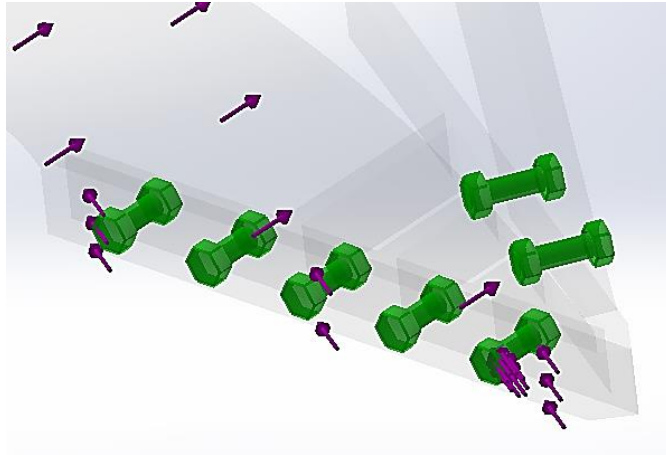


Figura 4-11. Comprobación de unión por pernos del ensamble.

4.1.2 Fatiga

Los resultados para los estudios en general fueron factibles, el único que falló por fatiga fue el caso tres del ensamble ya que presenta la mayor fuerza concentrada en el cuerpo, los demás estudios no sobrepasan la curva de deformación, así que los estudios realizados en su mayoría soportan el constante laboreo, entonces se dice que tienen una vida infinita (Figura 4-13). Cuando el software termina de calcular las iteraciones de la simulación despliega un mensaje el cual muestra que el diseño está por debajo de la curva S-N (tensión – ciclos) (Figura 4-12).

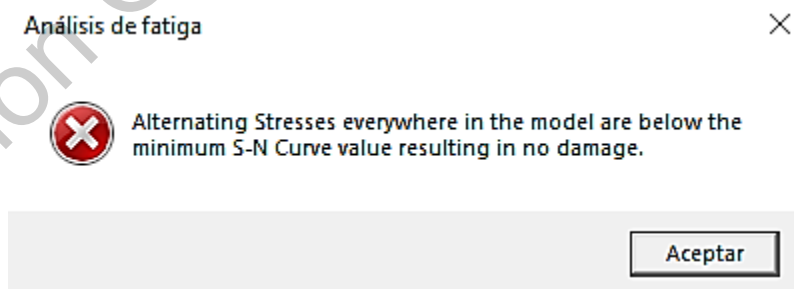


Figura 4-12. Resultado del estudio de fatiga.

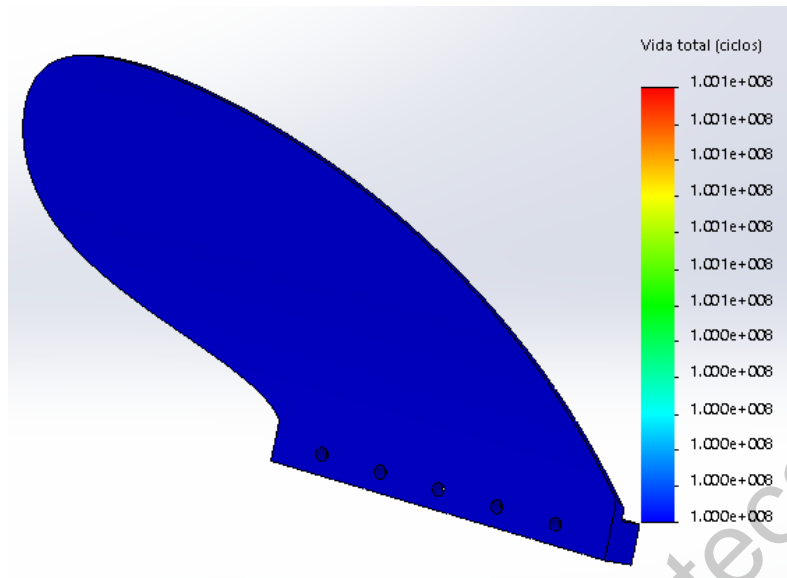


Figura 4-13. Representación del resultado de fatiga en vertedera, no hay falla por fatiga.

4.1.3 Modal

La frecuencia en su caso no debe estar cercana a la frecuencia nominal del sistema, ya que si se presenta dicha situación el sistema entra en resonancia, aumentando el valor de los esfuerzos, dicha frecuencia está establecida por las revoluciones del motor que se usa para el arrastre de la vertedera, por lo general los motores trabajan a 3600 rpm, teniendo así una frecuencia nominal de 60 Hz, por lo que se debe ser cuidadoso al calcular dichas frecuencias en el arado, las cuales deben estar por debajo o de la frecuencia nominal para evitar el efecto de resonancia. Las frecuencias debidas al corte del arado en la tierra y las repercusiones de amortiguamiento no se contemplaron para este análisis, solamente las frecuencias fundamentales del sistema en general.

En el caso de los resultados para los estudios modales en comparación con la frecuencia nominal del sistema debida al motor de impulso para el arrastre, los casos de simulación en la vertedera todos cumplieron con la frecuencia de

operación estando por debajo de la nominal (Figuras 4-14 a 4-18). De igual manera el caso 3 del ensamble no cumplió con lo establecido, por consiguiente, se denotó como diseño no factible.

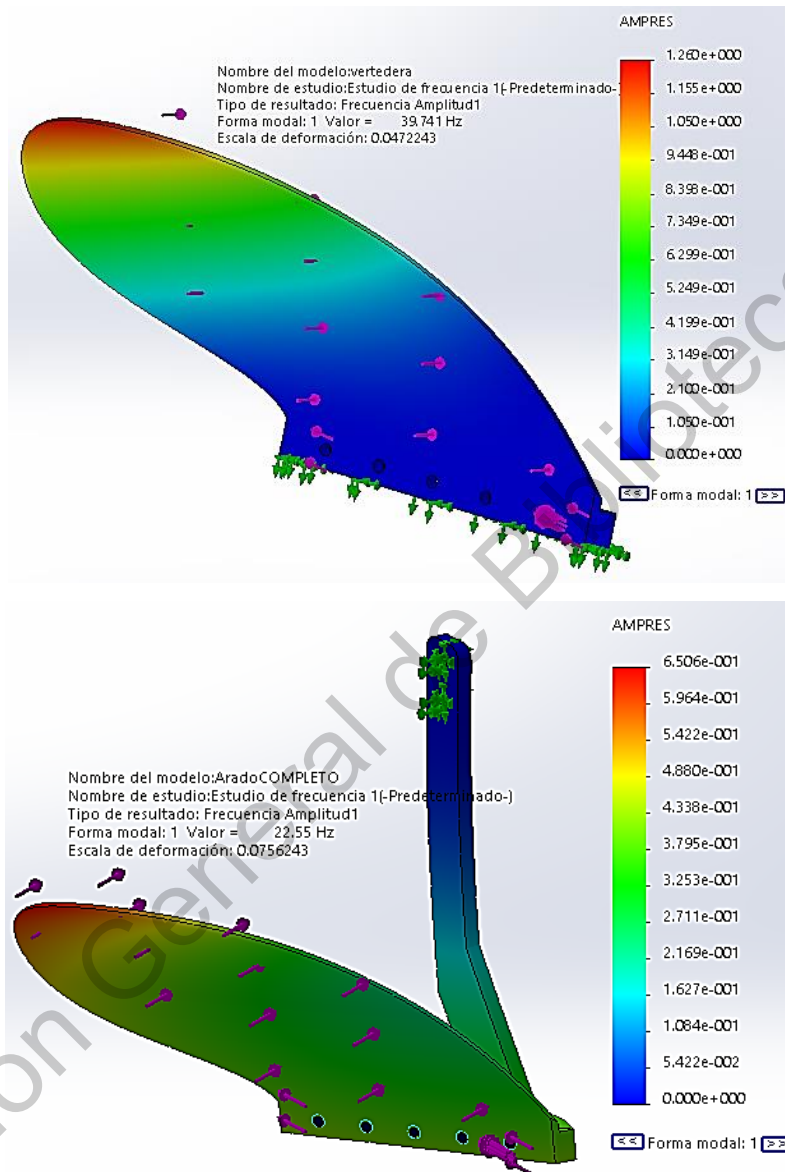


Figura 4-14. Forma modal 1 para vertedera y ensamble.

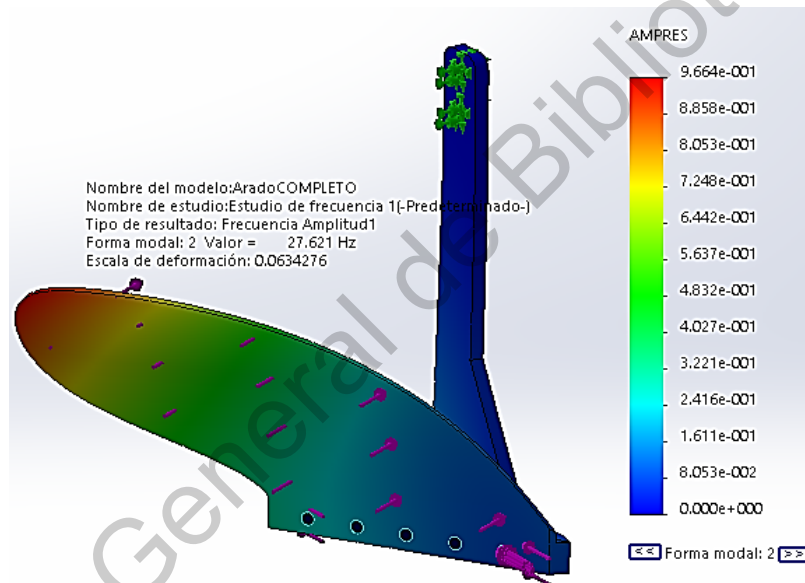
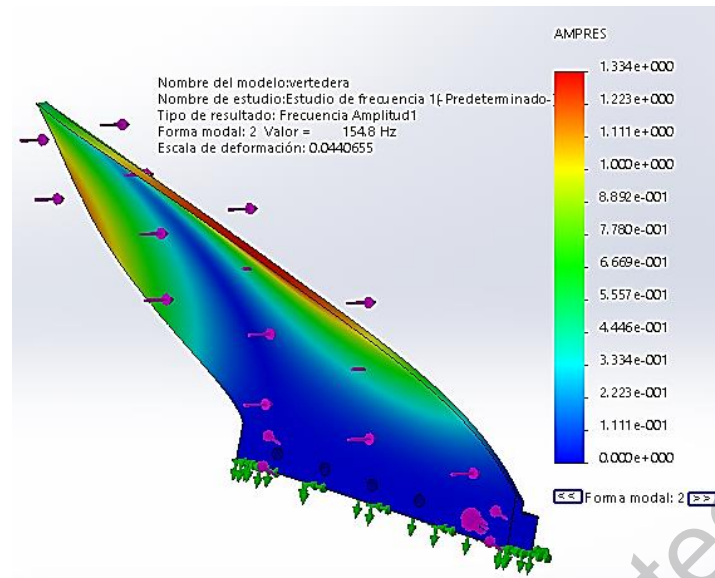


Figura 4-15. Forma modal 2 para vertedera y ensamble.

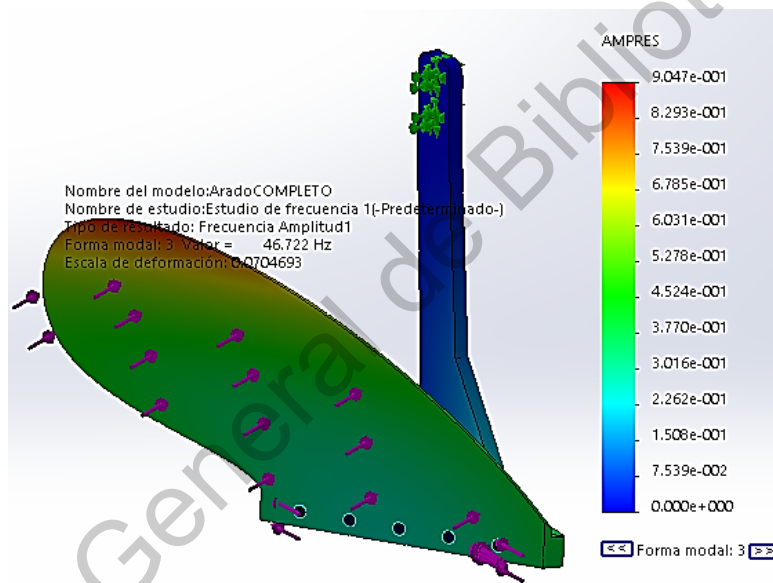
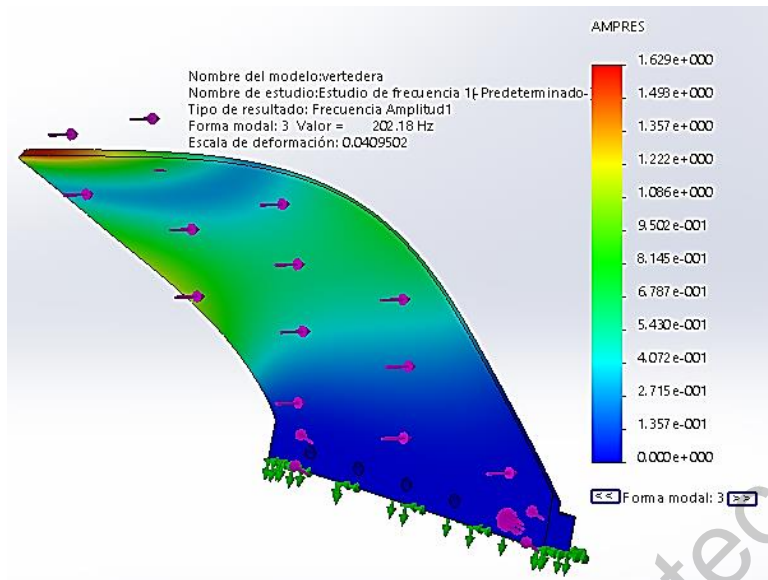


Figura 4-16. Forma modal 3 para vertedera y ensamble.

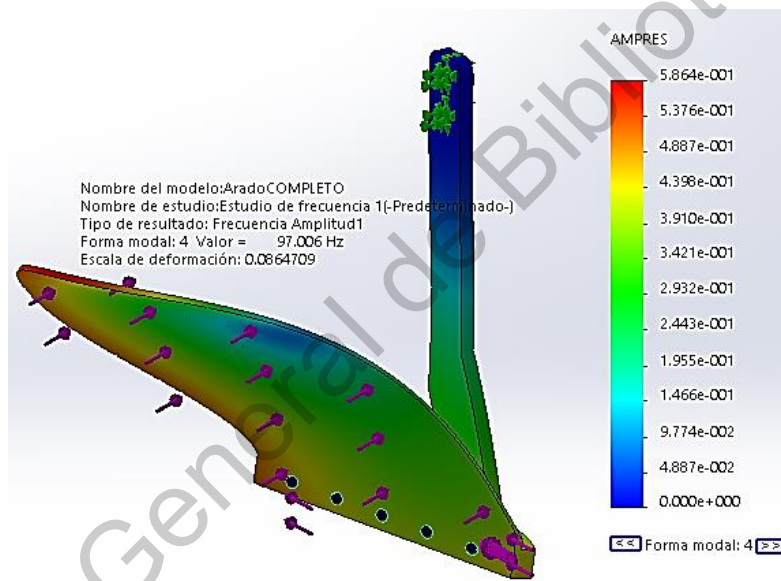
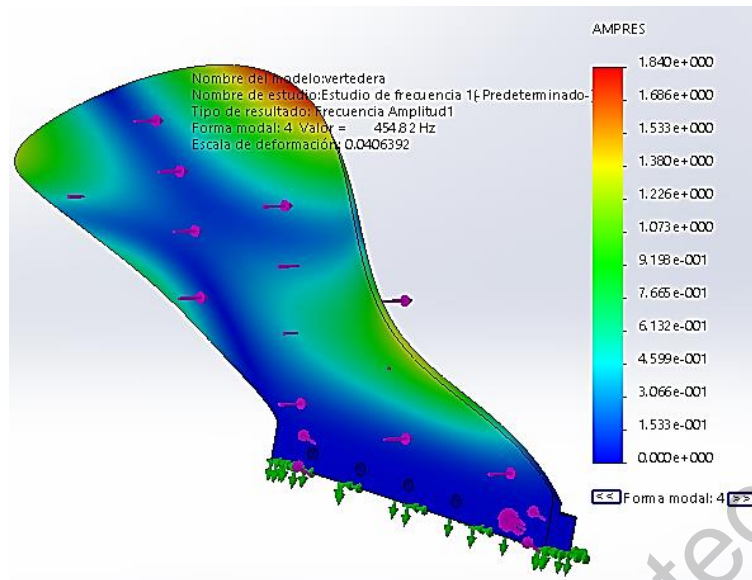


Figura 4-17. Forma modal 4 para vertedera y ensamble.

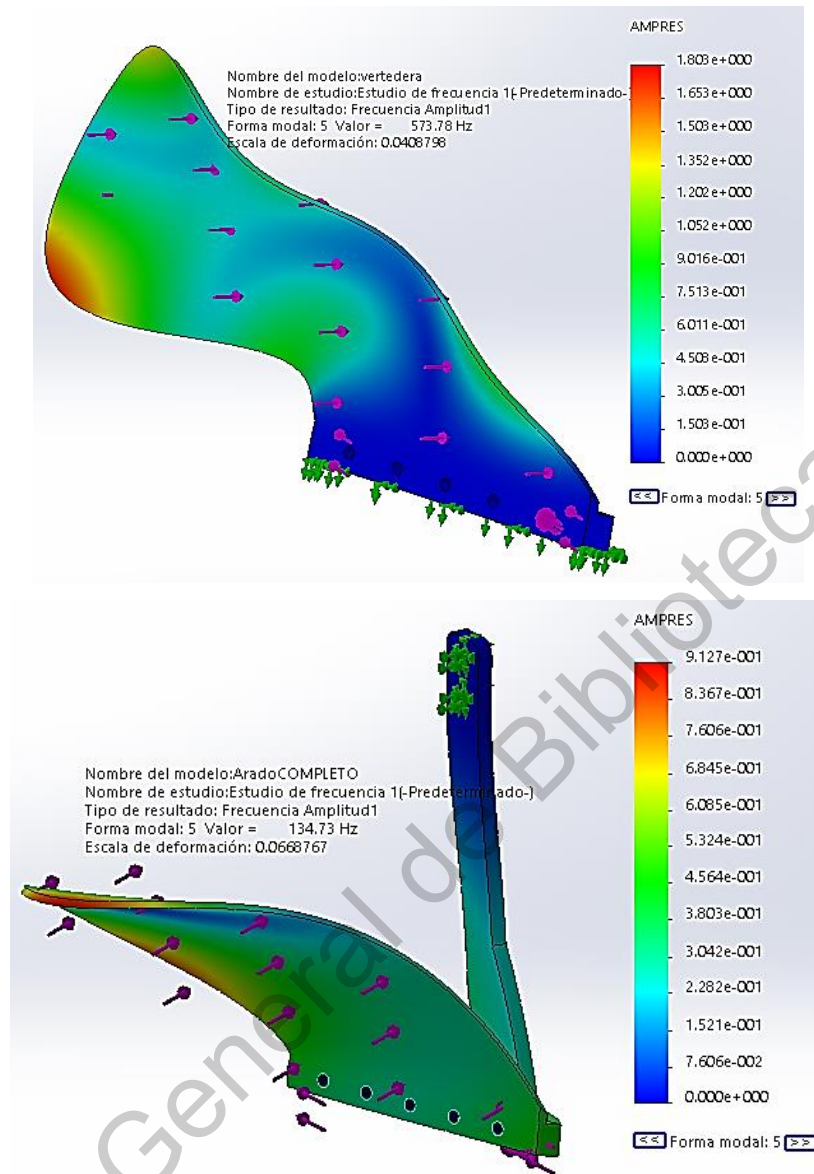


Figura 4-18. Forma modal 5 para vertedera y ensamble.

Las formas modales establecidas en las figuras anteriores muestran cómo se comporta el sistema en sus diferentes frecuencias, debido a esto es recomendable no llegar a ningún valor de los que se calcularon, para el caso de análisis de resultados, las frecuencias más pequeñas son las que afectan de una forma más grave al sistema, dichas frecuencias son mostradas en la Figura 4-19, mostrando para todos los casos de estudio frecuencias por debajo de la nominal, en este caso

60 Hz. Observando que el sistema de la vertedera por sí sola vibró más que el ensamble, esto por las consideraciones de las condiciones frontera y las sujeciones.

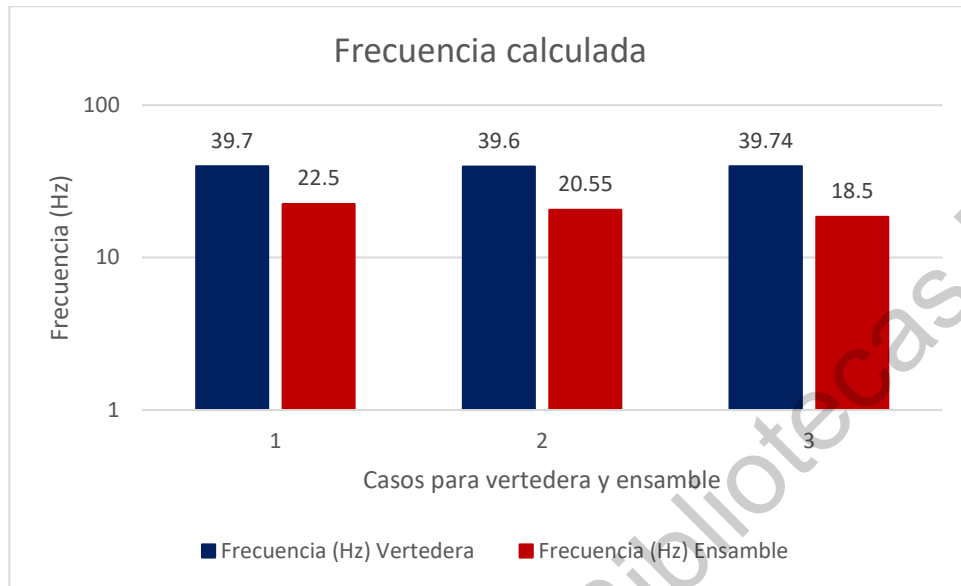


Figura 4-19. Frecuencia calculada para cada caso.

4.1.4 Impacto

El estudio de impacto solo se realizó en el ensamble, llevándolo a las condiciones más cercanas de la vida real, la comprobación de los esfuerzos generados por el impacto no sobrepasó el límite elástico (Figura 4-20), estableciendo no se afectó de gran forma al implemento al encontrarse con alguna roca u objeto al momento de hacer el laboreo primario. En la Figura además se pueden apreciar los esfuerzos en zonas específicas del ensamble, los tonos que tienden a rojo fueron las zonas donde más se ve afectado el implemento.

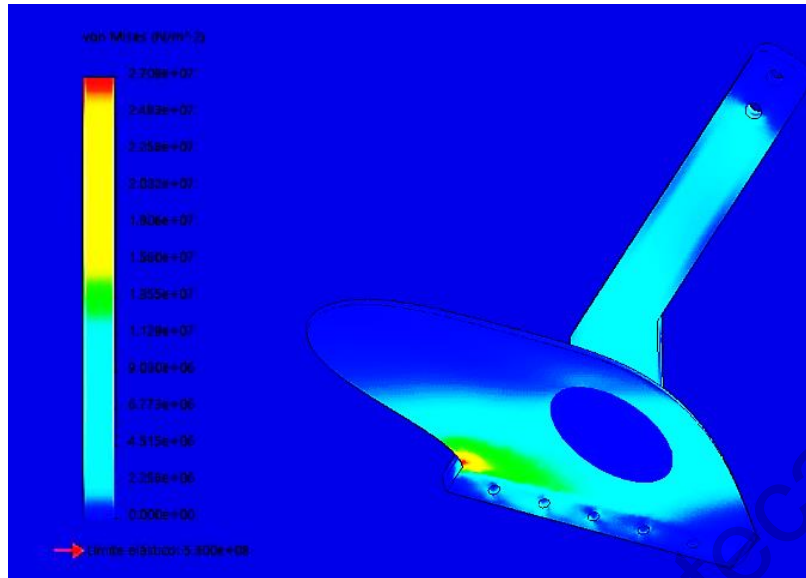


Figura 4-20. Representación de los resultados de impacto del ensamble y su límite elástico.

El estudio de impacto fue una opción a tomar, ya que así se obtiene un estudio más cercano a la vida real, por lo general no se sabe qué tipo de suelo se trabaja, por consiguiente, es probable encontrar rocas u objetos que repercuten al implemento, los esfuerzos por impacto están por debajo del esfuerzo último (Figura 4-21), por consiguiente, el modelo no sufre de falla por impacto.

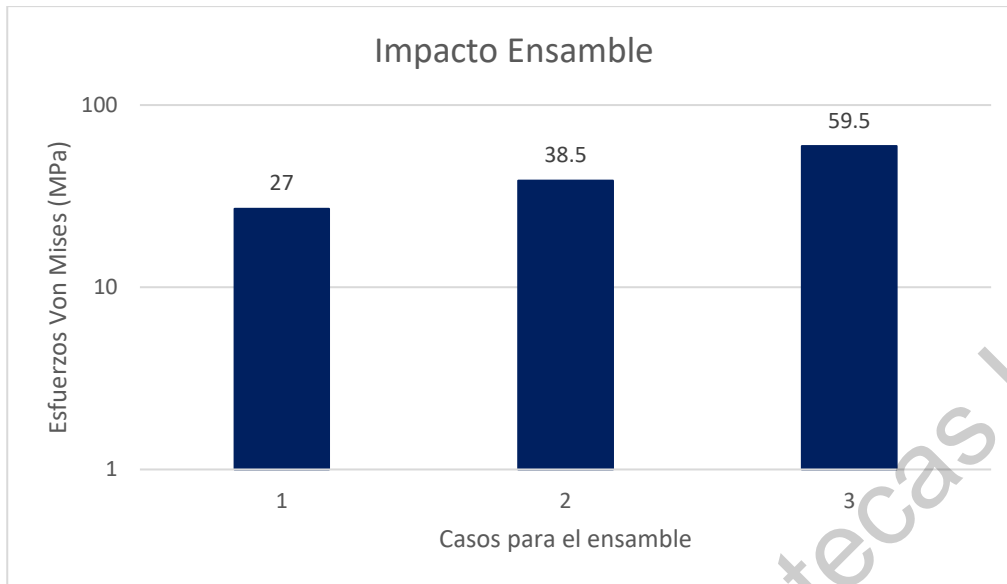


Figura 4-21. Esfuerzos de impacto en cada caso para el ensamble.

- **Recálculo para el caso 2 y 3 del ensamble**

A lo largo de los resultados mostrados con anterioridad, se mencionó que el modelo que menos resistía ante las fallas provocadas por cada uno de los estudios era el Caso 3 del ensamble, por lo que se procedió a hacer las modificaciones pertinentes en geometría, las modificaciones se centraron en el bastidor (Figura 3-5), el cual cuenta con un espesor de 14 mm, llevándolo a una modificación de hasta 25.4 mm, generando un aumento de masa. El modelo resultante sin la modificación pesaba 10 kg, con la modificación, el aditamento aumentó hasta 14 kg.

Debe considerarse además que el FS es menos a 2, en este caso 1.4 fue el calculado, enfrentándose a estar cerca de su límite de trabajo. Se debe ser claro que el peso original promedio de un arado de este tipo es aproximadamente 30 kg. Dicha magnitud fue comprobada por el pesaje de los arados utilizados en una zona agrícola del estado de Guanajuato, un ejemplo de ellos puede ser visualizado en la Figura 4-22.



Figura 4-22. Arado utilizado en la región de Guanajuato.

De igual manera se modificaron los orificios donde se sujeta el implemento al método de tracción, aumentando el número de orificios para tener un mejor agarre y disminuir las zonas de falla. En la Tabla 4-7 se muestra un resumen de los esfuerzos y el factor de seguridad calculado. Para este recálculo la fatiga no se presentó en el modelo y la frecuencia aumentó.

Tabla 4-7. Recálculo del caso 3.

<i>Ensamble</i>			
Caso 3	<i>Estático</i>	<i>Esfuerzo</i>	385.8 (MPa)
		<i>Desplazamientos</i>	11.9 (mm)
		<i>Factor de seguridad</i>	1.4
	<i>Fatiga</i>	<i>Vida infinita</i>	Sí
	<i>Modal</i>	<i>Frecuencia</i>	34.5 (Hz)
	<i>Impacto</i>	<i>Esfuerzo</i>	62.3 (MPa)

5. CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS

Conclusiones

- Se realizó el análisis de los antecedentes para observar los cálculos que se han realizado en torno al modelado del diseño geométrico y operacional de un arado de vertedera, observando que en la mayoría de los análisis no se presentan estudios estáticos completos que involucren esfuerzos ni el factor de seguridad definido. De igual manera se realizaron estudios de fatiga, modales y de impacto al diseño para comprobar diferentes formas de falla.
- Las variables se determinaron con diferentes rangos, dejando algunas fijas para evitar una gran variedad de resultados, las principales variables consideradas son la cohesión, la densidad específica, el ángulo de corte, la profundidad y la velocidad, de las cuales los autores no las toman en su totalidad para el cálculo de las fuerzas en el diseño. Dejando brechas para el cálculo de una fuerza total bien definida.
- La nueva iteración para aumentar el FS en el diseño total, se realizó de forma geométrica, aumentando el grosor del brazo del bastidor, de igual manera aumentado los orificios donde el artefacto se unirá con el dispositivo de tracción, generando así un nuevo estudio para poder determinar un FS superior a 1. Donde los esfuerzos ya no están por encima del límite elástico evitando la deformación plástica del arado.
- Los nuevos cálculos garantizan que al ser el Caso 3 el de mayor sometimiento de esfuerzos, sabiendo que este mismo caso no fallará ahora con las modificaciones, de igual manera se disminuyeron más las probabilidades de que falle con los valores de las variables de los otros casos, siendo el Caso 3 el más peligroso al operar el arado.
- El peso del arado en el último modelo aumentó 4 kg calculando entonces un peso final de 14 kg, pero recordando que el peso promedio es de 30 kg,

resulta útil tener un menor peso en el implemento a la hora de operar con él, garantizando una mejor fluencia de trabajo y operabilidad.

Prospectivas

- Los diseños modelados y analizados en SolidWorks se realizaron con características paramétricas, de este modo se pueden modificar las características geométricas de una forma más fácil y aplicar cada uno de los estudios, para así observar el comportamiento del ensamble.
- Las fuerzas calculadas con la herramienta en Excel son de gran ayuda para poder definir la concentración de la fuerza, de igual forma se dejó genérica para poder observar el buen volteo del suelo con el cálculo de la resistencia al corte del suelo.
- Los análisis realizados por elemento finito fueron más completos a los realizados por los autores mencionados en los antecedentes, abriendo un panorama más amplio para la selección apropiada de las características operacionales y geométricas del modelo y así evitar someterlo a grandes esfuerzos y tener próximas fallas.
- Entorno a la simulación y alcance de las especificaciones de diseño factible se deja abierto a la posibilidad de que el usuario teniendo las características del suelo pueda calcular las fuerzas y seleccionar la forma adecuada de usar el arado, tanto el ángulo de corte y las características operacionales como velocidad, profundidad y ancho de corte.
- De igual manera, las simulaciones multifísicas han tomado un gran ramo de investigación, para este caso se realizaron los estudios por separado para observar de qué manera el arado se afecta más por cada tipo de falla, pero el análisis como se dijo podría resolverse de manera multifísica, generando así un estudio completo, involucrando todas las variables físicas, convirtiendo al modelo en un sistema muy cercano a lo que se tendría en la vida real,

teniendo en él todas las condiciones y fenómenos que se generan en un laboreo de tierra real.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

6. REFERENCIAS

Ahmadi, I. (2016, Abril 4). Development and evaluation of a draft force calculator for moldboard plow using the laws of classical mechanics. *Soil & Tillage Research*, 161, pp.129–134.

Budynas, R & Keith, J. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

Catalán, H. (2008, enero). 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.

Diego, F., Herrera, M., García de la Figal, A. & Ruiz, J. (2012, noviembre 10). Análisis resistivo de un nuevo arado de tracción animal mediante el Método de Elementos Finitos (MEF). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21, pp.63-67.

Formato, A., Ianniello, D., Villecco, F., Lenza, T. & Guida, D. (2017, octubre 18). Design optimization of the plough-working surface by computerized mathematical model. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 29, pp.36-44.

Ghahramanian, G., Çakir, E. Klonowski, J. & Lisowski, A. (2014, Julio 15). Performance of New Design Mouldboard Plough Model (Double Sided Plough) in a Soil Bin. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 10, pp.195-198.

Godwin, R.J., O'Dogherty, M.J., Saunders, C. & Balafoutis, A.T. (2007, febrero 1). A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed. *Biosystems Engineering*, 97, pp.117 – 129.

Gutiérrez de Ravé, E., Jiménez, F.J., Muñoz J.M. & Giráldez, J.V. (2011, noviembre 26). The geometric characterization of mouldboard plough surfaces by using splines. *Soil & Tillage Research*, 112, pp.98–105.

Horvat, Z., Filipovic, D., Kosutic, S., & Emert, R. (2008, enero 23). 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, agosto 6). 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., Hamza, E., Maalej, A. & Mouazen, A.M. (2017, abril 18). Advanced analytical method of mouldboard plough's design. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, pp.781–788.

Ibrahmi, A., Bentaher, H., Hbaieb, M., Maalej, A. & Mouazen, A.M. (2015, agosto 6). 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.

Márquez, L. (2000, Julio). Arados de vertedera, Evolución y componentes esenciales. *agrotécnia*, -, pp.48-55.

Morales, O. (2015). Diseño de un sistema de arado para la preparación del suelo en cultivos orgánicos dirigido a pequeños agricultores. (Tesis de pregrado). Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

Natsis, A., Petropoulos, G. & Pandazaras, C. (2008, junio 4). Influence of local soil conditions on mouldboard ploughshare abrasive wear. *Tribology International*, 41, pp.151–157.

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

Shrestha, D. S., Singh, G. & Gebresenbet, G. (2000, octubre 18). 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.

Dirección General de Bibliotecas UAQ