



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Análisis del diseño y optimización de un arado de  
vertedera de cinco brazos

**MEMORIA**

*Autor/es*

Alberto Laguia Pérez  
Grado de Ingeniería mecánica

*Director/es*

Dr. Hugo Malón Litago  
Área Ingeniería mecánica

Escuela de ingeniería y arquitectura / Universidad de Zaragoza  
2016



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. Alberto Lagua Pérez

con nº de DNI 18453654H en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

Grado \_\_\_\_\_, (Título del Trabajo)

Análisis del diseño y optimización de un arado de vertedera de cinco brazos

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 20 de SEPTIEMBRE de 2016

Fdo: Alberto Lagua Pérez

# RESUMEN

El presente trabajo de fin de grado analiza las tensiones y desplazamientos a las que está sometido un arado de vertedera de cinco brazos con capacidad para variar su anchura, mediante técnicas numéricas basadas en el Método de Elementos Finitos. El software empleado es SOLIDWORKS 2015. Para ello se han determinado los esfuerzos a los que está sometido dicho apero en función de la velocidad, profundidad, anchura de trabajo y tipo de suelo.

Una vez obtenidos estos esfuerzos, se ha procedido al análisis de un arado de vertedera existente en la actualidad, según criterios de rigidez y resistencia.

La metodología seguida ha consistido en medir todos los componentes estructurales del arado, para posteriormente proceder a su modelado en 3D mediante el software SOLIDWORKS 2015. Una vez determinados los esfuerzos a los que están sometidos este tipo de aperos, se han realizado los diferentes estudios en función de la velocidad, profundidad, anchura de trabajo y tipo de suelo. Con respecto a los estudios, se han realizado dos estudios para el voladizo (anchura máxima y anchura mínima), seis estudios del apero en condiciones de trabajo con anchura máxima (tres estudios para velocidad media y tres para velocidad máxima recomendable) y otros seis estudios del apero en condiciones de trabajo con anchura mínima (tres estudios para velocidad media y tres para velocidad máxima recomendable).

Tras determinar las tensiones y desplazamientos a los que está sometido el apero, se ha procedido a calcular los factores de seguridad, para saber cuáles son los componentes más afectados y en qué condiciones se producen.

La optimización se ha llevado a cabo en los componentes, o partes de los componentes con un factor de seguridad menor que tres. Las optimizaciones que se han realizado han sido variaciones en el espesor, cambios en el material para aumentar su límite elástico, introducción de nuevos componentes para disminuir la tensión y suavizado de zonas con concentradores de tensiones.

Una vez finalizado el modelado de las diferentes optimizaciones, se han vuelto a determinar las tensiones y desplazamientos, utilizando tablas comparativas entre el modelo sin optimizar y el modelo optimizado.

## TABLA DE CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN.....   | 1  |
| 1.1. Definición del arado de vertedera.....  | 1  |
| 1.2. Descripción del arado de vertedera.....   | 2  |
| 2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....   | 5  |
| 3. ALCANCE DEL PROYECTO.....   | 5  |
| 4. MODELO INICIAL.....   | 6  |
| 4.1. Descripción del modelo.....   | 7  |
| 4.2. Denominación de los elementos principales.....                                    | 8  |
| 4.3. Materiales considerados.....  | 9  |
| 4.4. Modelo discretizado por el MEF.....   | 9  |
| 4.5. Condiciones de contorno, conexión entre componentes y aplicación de la carga..... | 11 |
| 4.5.1. Condiciones de contorno.....  | 11 |
| 4.5.2. Conexión entre componentes.....   | 11 |
| 4.5.3. Cargas aplicadas.....   | 14 |
| 4.5.4. Casos de carga analizados.....  | 17 |
| 4.5.4.1. Voladizo.....   | 17 |
| 4.5.4.2. Profundidad máxima y anchura mínima.....                                      | 18 |
| 4.5.4.3. Profundidad y anchura máximas.....  | 18 |
| 5. RESULTADOS DEL MODELO INICIAL.....  | 19 |
| 5.1. Modelo en voladizo.....   | 19 |
| 5.1.1. Anchura máxima.....   | 19 |
| 5.1.2. Anchura mínima.....   | 22 |
| 5.2. Modelo trabajando a máxima profundidad y anchura mínima.....                      | 24 |
| 5.2.1. Velocidad media.....  | 24 |
| 5.2.1.1. Suelo limoso.....   | 24 |
| 5.2.1.2. Suelo franco.....   | 25 |
| 5.2.1.3. Suelo arenoso.....  | 25 |
| 5.2.2. Velocidad máxima recomendable.....  | 26 |
| 5.2.2.1. Suelo limoso.....   | 26 |
| 5.2.2.2. Suelo franco.....   | 27 |
| 5.2.2.3. Suelo arenoso.....  | 27 |
| 5.3. Modelo trabajando a máxima profundidad y anchura máxima.....                      | 28 |
| 5.3.1. Velocidad media.....  | 28 |
| 5.3.1.1. Suelo limoso.....   | 28 |
| 5.3.1.2. Suelo franco.....   | 29 |
| 5.3.1.3. Suelo arenoso.....  | 30 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 5.3.2.   | Velocidad máxima recomendable.....                                  | 30 |
| 5.3.2.1. | Suelo limoso.....   | 30 |
| 5.3.2.2. | Suelo franco.....   | 31 |
| 5.3.2.3. | Suelo arenoso.....  | 32 |
| 5.4.     | Conclusiones sobre los diferentes casos analizados.....             | 33 |
| 6.       | PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.....  | 36 |
| 6.1.     | Estudios tenidos en cuenta para la optimización.....                | 36 |
| 6.2.     | Optimización variando únicamente el material.....                   | 37 |
| 6.3.     | Optimización variando componentes.....                              | 38 |
| 6.3.1.   | Viga central.....   | 38 |
| 6.3.2.   | Viga lateral.....   | 39 |
| 6.3.3.   | Cabezal fijo.....   | 39 |
| 6.3.4.   | Unión cabezal fijo-viga central.....                                | 41 |
| 6.3.5.   | Separadores.....  | 41 |
| 6.4.     | Resultados de la optimización con variación en los componentes..... | 42 |
| 6.4.1.   | Voladizo.....   | 42 |
| 6.4.2.   | Anchura máxima, velocidad máxima y suelo limoso.....                | 44 |
| 7.       | CONCLUSIONES.....   | 47 |
| 8.       | BIBLIOGRAFIA.....   | 49 |
|          | ANEXO A: ARADOS DE VERTEDRA ANTIGUOS.....                           | 51 |
| A.1.     | Arado de timón.....   | 51 |
| A.2.     | Arado de vertedera antiguo.....                                     | 51 |
| A.3.     | Arado de garabato.....  | 52 |
| A.4.     | Bernete.....  | 52 |
| A.5.     | Arado rusá.....   | 52 |
|          | ANEXO B: COMPONENTES DEL MODELO.....                                | 53 |
| B.1.     | Componentes del chasis.....   | 53 |
| B.1.1    | Viga Central.....   | 53 |
| B.1.2.   | Viga lateral.....   | 54 |
| B.1.3.   | Unión viga central-viga lateral-brazo.....                          | 55 |
| B.1.4.   | Brazo o cuerpo.....   | 56 |
| B.1.5.   | Cabezal fijo.....   | 57 |
| B.1.6.   | Unión cabezal fijo-viga central.....                                | 58 |
| B.1.7.   | Unión viga lateral-brazo.....                                       | 59 |
| B.1.8.   | Unión viga lateral-cabezal fijo.....                                | 60 |
| B.1.9.   | Separadores.....  | 61 |
| B.2.     | Componentes del conjunto reja-vertedera.....                        | 62 |

|  |    |
|--|----|
| B.2.1. Reja y puntera .....  | 62 |
| B.2.3. Cuchilla vertical .....   | 63 |
| B.2.4. Vertedera.....  | 63 |
| B.2.5. Protector vertedera .....   | 64 |
| B.2.6. Unión conjunto reja-vertedera a cuerpo.....                                   | 64 |
| ANEXO C: SOLIDWORKS 2015 .....   | 65 |
| ANEXO D: TIPOS DE SUELO.....   | 66 |
| D.1. Principales propiedades y comportamientos del suelo .....                       | 66 |
| D.2. Ecuaciones empleadas para la obtención de fuerzas según el tipo del suelo ..... | 67 |
| ANEXO E: CASOS DE CARGA.....   | 68 |
| E.1. Voladizo.....   | 68 |
| E.2. Apero agrícola trabajando con anchura máxima, velocidad máxima y suelo limoso   | 72 |
| E.3. Resultados de los casos de carga .....  | 77 |
| E.3.1. Modelo trabajando a máxima profundidad y anchura mínima .....                 | 77 |
| E.3.1.1. Velocidad media .....   | 77 |
| E.3.1.1.1 Suelo limoso .....   | 77 |
| E.3.1.1.2 Suelo franco .....   | 78 |
| E.3.1.1.3 Suelo arenoso .....  | 80 |
| E.3.1.2. Velocidad máxima .....  | 81 |
| E.3.1.2.1. Suelo limoso .....  | 81 |
| E.3.1.2.2 Suelo franco .....   | 83 |
| E.3.1.2.3. Suelo arenoso .....   | 84 |
| E.3.2. Modelo trabajando a máxima profundidad y anchura máxima.....                  | 86 |
| E.3.2.1. Velocidad media .....   | 86 |
| E.3.2.1.1 Suelo limoso .....   | 86 |
| E.3.2.1.2. Suelo franco .....  | 87 |
| E.3.2.1.3. Suelo arenoso .....   | 89 |
| E.3.2.2. Velocidad máxima .....  | 90 |
| E.3.2.2.1. Suelo limoso .....  | 90 |
| E.3.2.2.2. Suelo franco .....  | 92 |
| E.3.2.2.3. Suelo arenoso.....  | 93 |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....  | 95 |
| ÍNDICE DE TABLAS .....   | 99 |



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Definición del arado de vertedera

Los arados de vertedera son aperos de labranza (en la actualidad arrastrados por un tractor agrícola) que se emplean para la realización de las labores primarias sobre el suelo, estas consisten en el acondicionamiento del suelo a gran profundidad actuando sobre la permeabilidad, el saneamiento y el enterrado de restos, enmiendas y abonos, entre otros.

Hace más de 2000 años, que el arado de vertedera apareció en la agricultura, y transcurrieron muchos siglos desde que se comenzaron a utilizar las primeras herramientas rústicas de madera, destinadas al laboreo, hasta que se desarrollaron y probaron las fórmulas matemáticas creadas por Tomas Jefferson para el diseño del arado de vertedera. Charles Nawold patentó el arado de hierro fundido en 1776. La década de 1830 marcó el comienzo de la fabricación comercial de arados de vertedera de acero, gracias a las mejoras que Webster introdujo en el diseño. En 1864, Fowles fabrica un arado arrastrado por dos máquinas de vapor.

En la antigüedad estos aperos eran arrastrados por animales, pero el objetivo era el mismo, remover la tierra para enterrar las posibles hierbas y sacar a la superficie la mayor cantidad de nutrientes necesarios para el crecimiento de la siembra. Algunos de estos arados antiguos (ANEXO A) son: el arado de timón, el arado de vertedera, el arado de garabato, el bernetete y el arado rusá. Más tarde con la creación de la máquina de vapor aparecieron los primeros arados arrastrados por dicha máquina, lo cual supuso un gran avance. En la actualidad los arados de vertedera son arrastrados por tractores agrícolas, los cuales han facilitado en gran medida las labores de labranza.

Las funciones que desempeñan los arados de vertedera sobre el suelo son las siguientes:

- Enterrado de restos vegetales y residuos superficiales.
- Aireación y mullido de la capa arable.
- Calentamiento del suelo.
- Formación de la cama de siembra.
- Reparto y localización de la tierra fina y de los pequeños terrones.
- Nivelación del suelo.
- Corrección del exceso de porosidad.
- Aireación del suelo por debajo de la capa arable.
- Control de malas hierbas, parásitos y enfermedades.
- Incorporación de fertilizantes.

A continuación, se muestran las ventajas y desventajas del arado de vertedera frente a otros tipos de arado para la realización de las labores primarias:

### **Ventajas:**

- Envuelve completamente las malezas y residuos de cosechas anteriores favoreciendo a su descomposición.
- Gran penetración en suelos limpios y livianos, presentando gran regularidad en la profundidad de trabajo.
- Tiene gran separación entre cuerpos, lo que permite realizar una gran achura de labor optimizando los tiempos de trabajo.
- Las operaciones de enganche y desenganche se realizan de modo rápido.



- Mejoran la adherencia del tractor al suelo, impidiendo que este pueda llegar a patinar.
- Son capaces de adaptarse a cualquier tractor, siempre que este tenga potencia suficiente para arrastrarlo.

**Desventajas:**

- No son aptos para trabajar en suelos con abundancia de piedras, ya que sus cuerpos son rígidos y podrían llegar a dañarse, teniendo que reparar o cambiar las piezas dañadas, suponiendo un alto coste.
- Produce poca penetración en suelos secos y duros.
- Para obtener una labor eficaz es necesario afilar o cambiar los elementos de corte (reja y puntera).
- Menor duración de las piezas debido a la fricción producida entre el suelo y el acero.
- No trabaja bien si el suelo tiene una humedad por debajo o por encima de las del estado fiable, si la humedad es escasa, existe la posibilidad de someter al apero a altas tensiones, y si la humedad es elevada, las ruedas del tractor pueden llegar a patinar impidiendo el avance del tractor.

## 1.2. Descripción del arado de vertedera

Existen básicamente dos tipos de arados de vertedera, fijos los cuales están compuestos únicamente de cuerpos en la parte inferior y envuelven la tierra en cada pasada hacia un lado diferente (figura 1), o reversibles compuestos de cuerpos tanto en la parte inferior como en la superior y un cabezal giratorio que les permite envolver la tierra siempre hacia el mismo lado formando una labor más uniforme (figura 2).



*Figura 1: Arado de vertedera fijo.*



*Figura 2: Arado de vertedera reversible.*

Los arados de vertedera están compuestos básicamente por los siguientes componentes (figura 3):

- Cabezal: Elemento que une el chasis del arado con el tractor y permite el giro en caso de que el arado sea reversible.
- Bastidor: Elemento que sirve de unión entre el cabezal y cada uno de los brazos que componen el arado, este requiere una gran sección ya que tiene que soportar los esfuerzos de cada uno de los brazos, así como el propio peso del conjunto.
- Brazo: Elemento que sirve de unión entre el bastidor y cada uno de los conjuntos reja-vertedera.
- Reja: Elemento encargado de realizar el corte en el suelo. Este elemento debe ser sustituido cada cierto tiempo debido al desgaste que se produce por el constante rozamiento con el suelo.
- Vvertedera: Elemento que se encarga de envolver la hierba, abonos, etc una vez que la reja ha realizado el corte en el suelo.
- Rueda de profundidad: Elemento que, como su propio nombre indica, sirve para regular la profundidad de trabajo, haciendo de tope con el suelo.

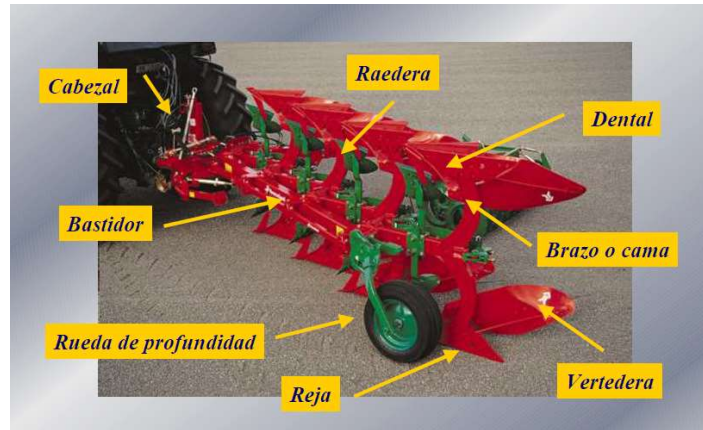


Figura 3: Partes básicas de un arado de vertedera.

Dentro de los arados de vertedera una de las partes fundamentales es el conjunto reja-vertedera, ya que se encuentra en contacto permanente con el suelo y es el encargado de cortarlo y envolver tanto los abonos como hierbas indeseables para la siembra. Debido a este contacto permanente con el suelo se produce un gran desgaste haciendo necesaria su sustitución, por lo que tienen que estar fabricados de tal manera que su montaje y desmontaje sea lo más fácil posible (figura 4)

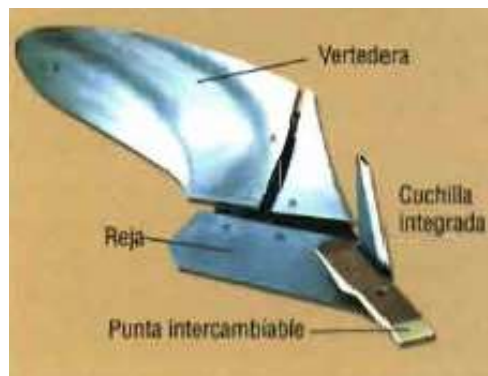


Figura 4: Conjunto reja vertedera.

Existen varios tipos, tanto de rejas como, de vertederas en función del tipo de labranza que se quiera llevar a cabo, así como de las propiedades del suelo.

- Tipos de vertederas: helicoidal, cilíndrica, universal, enrejada, rombale (figura 5 enumeradas de manera descendente).
- Tipos de rejas: con punta reversible, pico de pato, recta, con formón, de doble punta, entre otras (figura 5).

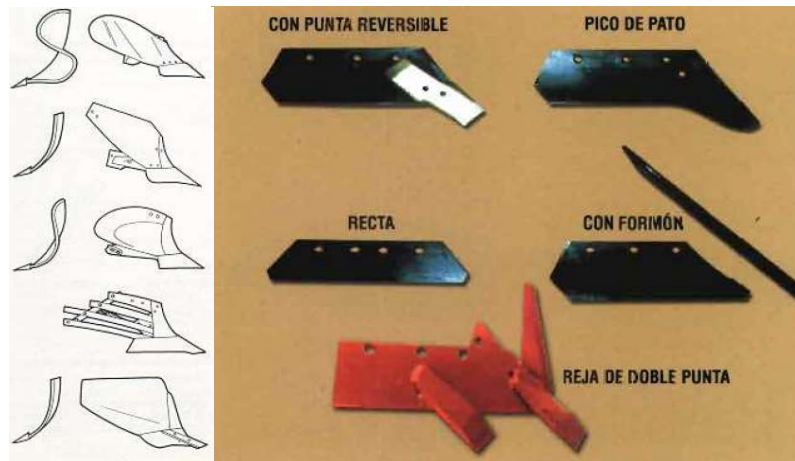


Figura 5: Tipos de vertederas (izquierda) y tipos de reja (derecha).

## 2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo principal del proyecto es el análisis y optimización del chasis de un arado de vertedera de cinco brazos, capaz de variar la anchura, obteniendo una labor entre 1132mm y 1520mm, mediante técnicas numéricas basadas en el Método de Elementos Finitos. Para ello se tendrán que determinar los esfuerzos a los que está sometido este tipo de apero agrícola en función de la velocidad y profundidad de trabajo, así como el tipo de suelo.

Para la obtención de los esfuerzos a los que está sometido dicho arado se plantearán varios supuestos, todos ellos a máxima profundidad, ya que será en este punto donde se producirán las mayores cargas.

En primer lugar, se calcularán los esfuerzos con el apero en voladizo. Estos esfuerzos se producen cuando el apero se encuentra suspendido en el aire, ya sea por el transporte a las diferentes parcelas o cuando el tractor levanta el apero para voltearlo.

En segundo lugar, se calcularán los esfuerzos cuando el apero está trabajando, teniendo en cuenta, tanto la anchura mínima, como la máxima, así como los diferentes tipos de suelos para cada una de las anchuras.

Analizados los resultados, se llevará a cabo el proceso de optimización del arado en el caso más desfavorable, para asegurar que no se sobrepasan los límites elásticos en ninguno de los casos. Para la optimización se buscará reducir espesores o cambiar el material en determinadas piezas manteniendo los criterios de resistencia y rigidez exigidos, o se aumentarán espesores y pondrán refuerzos en zonas críticas para reducir esfuerzos.

## 3. ALCANCE DEL PROYECTO

Para llevar a cabo el análisis por el Método de Elementos Finitos del arado de vertedera de cinco brazos, en primer lugar, se realizó una toma de medidas manual in situ del modelo real, anotando las medidas y espesores de cada uno de los componentes del arado, así como las anchuras de laboreo y los ángulos con los que este arado varía su anchura.

Posteriormente se produjo el modelado en 3D con el software SOLIDWORKS, al mismo tiempo que se determinaron las fuerzas de trabajo existentes en este tipo de apero en función de la velocidad y profundidad de trabajo, así como en tipo de suelo.

Una vez modelado y conocidas las fuerzas existentes, se procedió al análisis numérico mediante el Método de Elementos Finitos, para estudiar posteriormente los resultados según criterios de rigidez y resistencia.

Finalmente se realizó una optimización del chasis del apero, aligerándolo en zonas descargas y reforzándolo en zonas críticas.

El modelo real de arado de vertedera estudiado en un Kverneland reversible con cinco cuerpos, modelo ES, tipo KKES-85-200, año 2014 (Figura 6).



Figura 6: Arado real.

## 4. MODELO INICIAL

El modelo a analizar se ha creado a partir del modelo real, en este caso es un arado de vertedera de cinco brazos con capacidad de volteo, cuyas especificaciones se encuentran en la siguiente tabla 1.

|        |             |
|--------|-------------|
| Marca  | Kverneland  |
| Modelo | ES          |
| Tipo   | KKES-85-200 |
| Año    | 2014        |
| Peso   | 1300Kg      |

Tabla 1: Características del arado real.

Para crear el modelo, el primer paso, fue la toma de medidas directas del apero in situ, una vez tomadas las medidas, se ha realizado el modelado en 3D mediante el software específico de dibujo industrial SOLIDWORKS 2015.

#### 4.1. Descripción del modelo

El modelo se ha creado pieza por pieza (excluyendo el cabezal respecto del que se produce el giro) y una vez que todos los componentes estaban creados se procedió a su ensamblaje final, el modelo creado se puede ver en la figura 7. El peso de este modelo es de 1302 Kg.

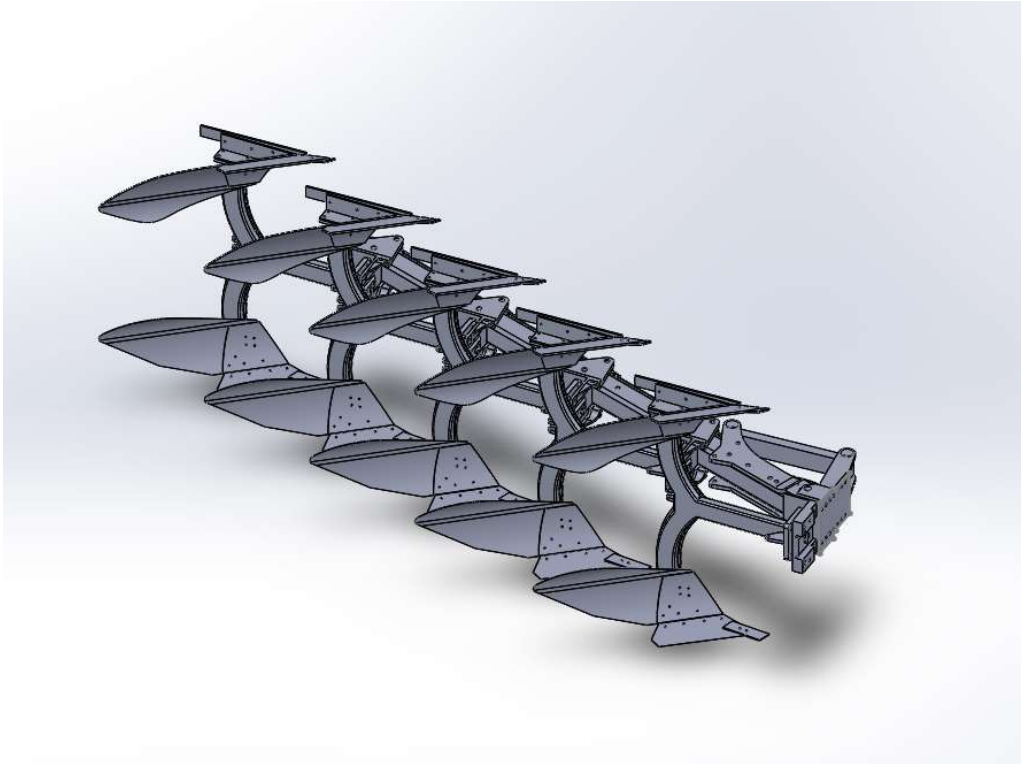


Figura 7: Modelo 3D.

Para los diferentes estudios se ha tenido en cuenta únicamente el propio chasis, excluyendo el cabezal giratorio, el conjunto reja-vertedera y la rueda de regulación de profundidad. En el análisis del apero en voladizo, se han tenido en cuenta tanto, los pesos de los diferentes conjuntos reja-vertedera como, el peso de la rueda. El chasis analizado se puede observar en la figura 8.

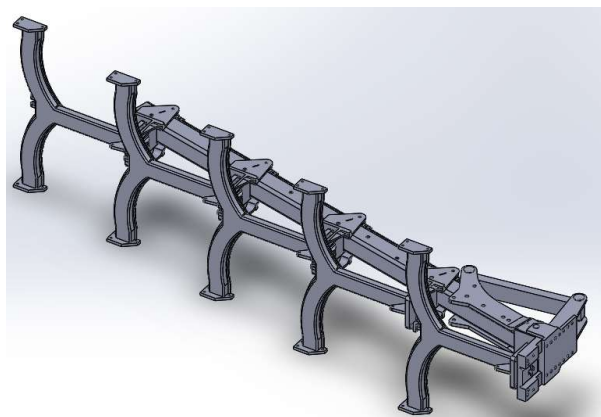


Figura 8: Modelo 3D para el análisis.

## 4.2. Denominación de los elementos principales

En las siguientes figuras se han nombrado cada uno de los componentes por los que está formado el chasis, incluyendo además los componentes que constituyen el conjunto reja-vertedera (figura 9 y figura 10 respectivamente).

En el ANEXO B se han incluido con mayor detalle, cada una de las piezas que componen, tanto el chasis a estudiar, como el conjunto reja-vertedera.

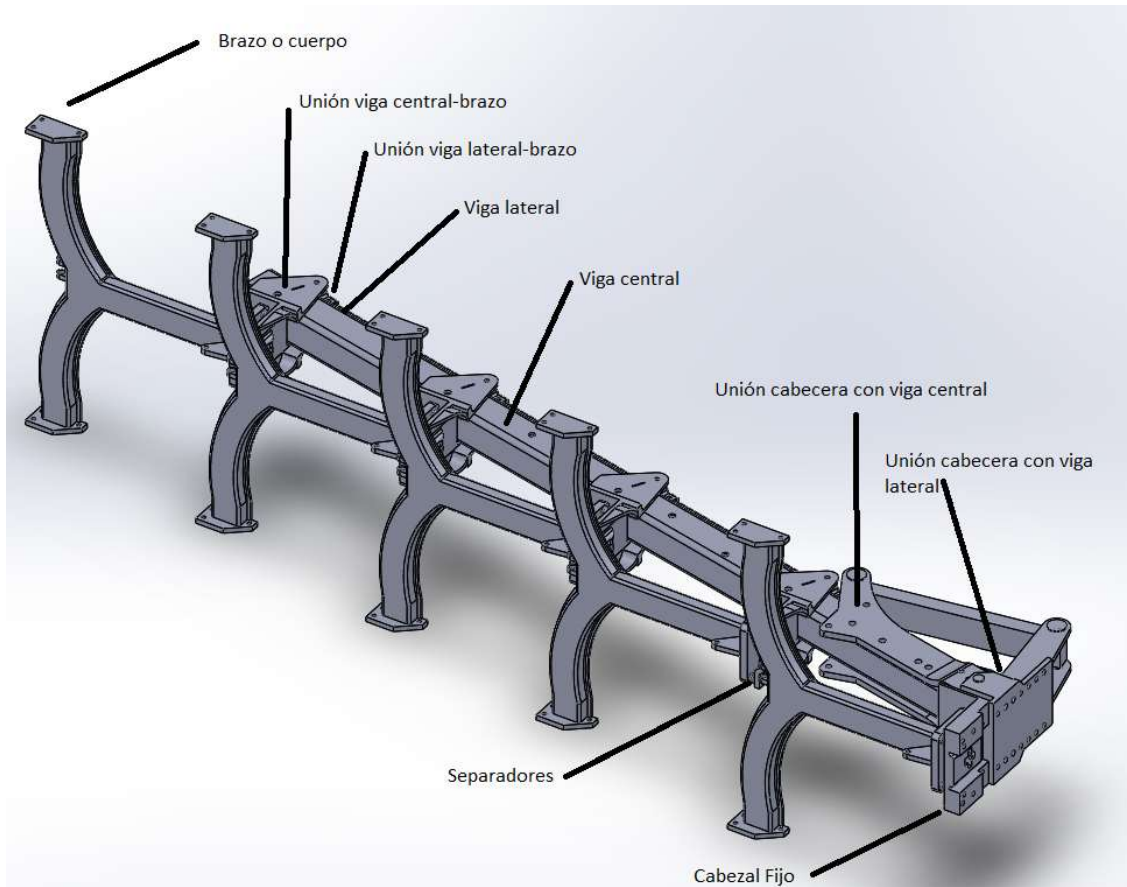


Figura 9: Partes que componen el chasis.

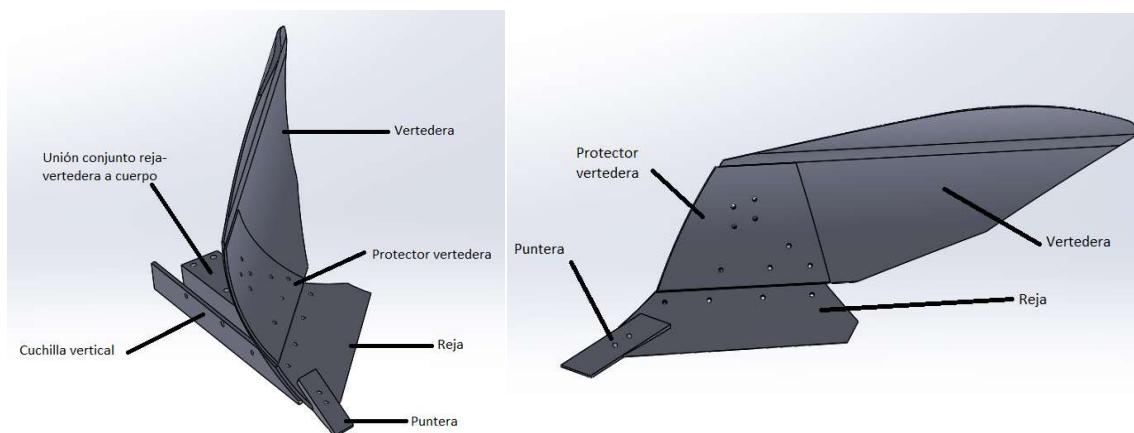


Figura 10: Partes que componen el conjunto reja vertedera.

### 4.3. Materiales considerados

Utilizando los manuales de usuario de este propio arado de vertederas, los materiales en los que está fabricado su chasis son: acero estructural S275JR y acero estructural S355JR. Todas las piezas del chasis están fabricadas con acero S275JR, excepto los separadores, que están fabricados con acero S355JR. Es necesario que el límite elástico de estos separadores sea superior, ya que son las partes del arado que hacen de “amortiguadores” en el caso de que el arado llegara a impactar con un obstáculo que ejerciera una fuerza superior a la del propio suelo.

En la tabla 2 se pueden observar las propiedades de ambos aceros.

| Propiedades                   | Materiales empleados |        |
|-------------------------------|----------------------|--------|
|                               | S275JR               | S355JR |
| Densidad (Kg/m <sup>3</sup> ) | 7800                 | 7800   |
| Coefficiente de Poisson       | 0,28                 | 0,28   |
| Módulo de Young (Mpa)         | 210000               | 210000 |
| Límite elástico (Mpa)         | 275                  | 355    |

Tabla 2: Materiales del chasis del arado.

### 4.4. Modelo discretizado por el MEF

El programa utilizado para el cálculo, ha sido el mismo que para el diseño de modelo, SOLIDWORKS 2015, en el ANEXO C aparece una breve descripción del programa.

En primer lugar, se ha creado una malla gruesa (figura 11) y se ha estudiado el caso de mayor carga, para analizar cuáles de los componentes están sometidos a un mayor esfuerzo, y así, poder aplicar a dichos componentes un control de mallado más fino, para la obtención de unos resultados más exactos.

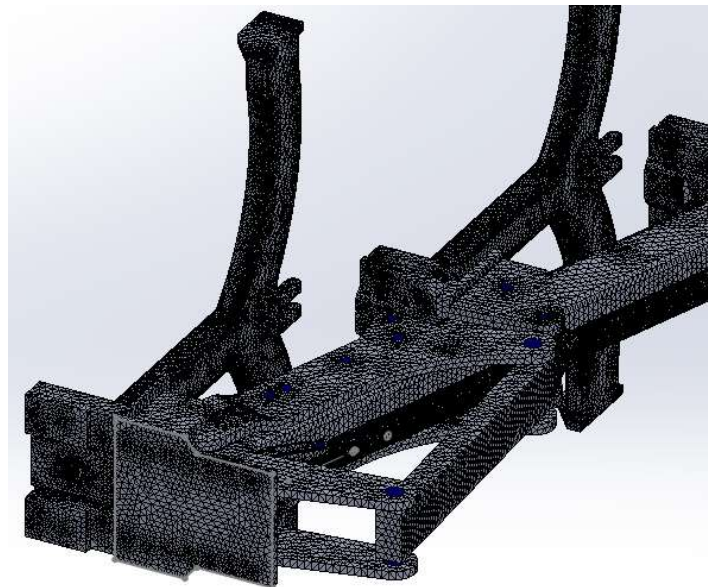


Figura 11: Malla gruesa.



Una vez creada la malla y analizados los componentes sometidos a mayores tensiones (figura 12) se ha procedido a aplicar controles de mallado a estos componentes.

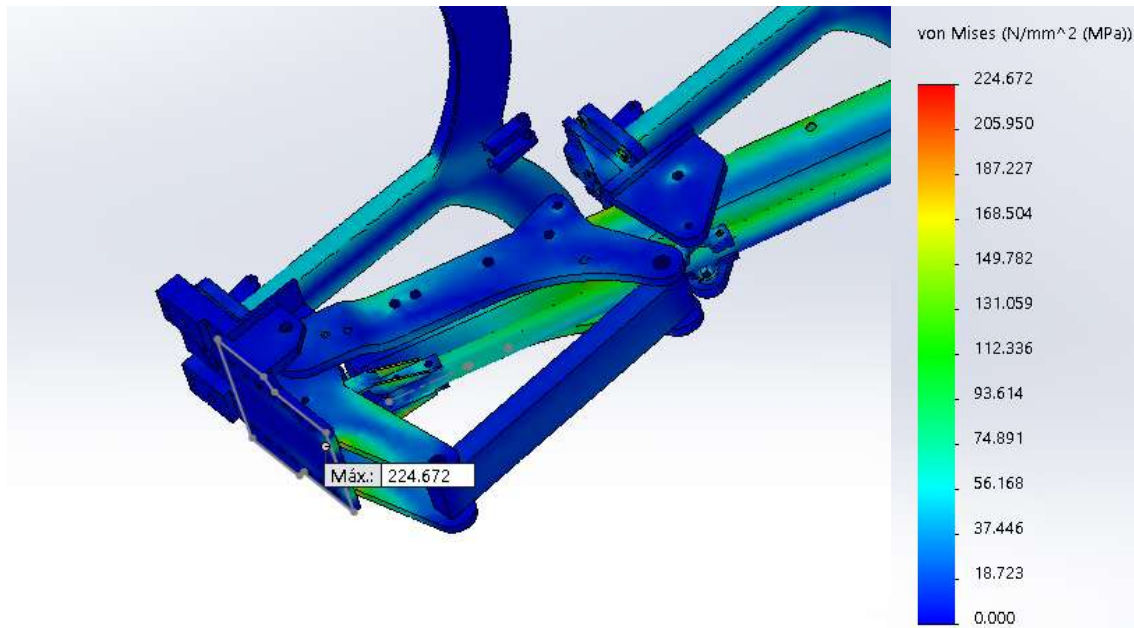


Figura 12: Análisis de las tensiones para establecer controles de mallado.

En la anterior imagen se puede apreciar que los componentes con mayor tensión son: la viga central, la viga lateral, el cabezal fijo, los separadores, la unión viga lateral-cabezal fijo y la unión cabezal fijo-viga central.

Los controles de malla que se han creado son los siguientes:

- Separadores y viga lateral:
  - Tamaño de elemento: 2mm.
  - Ratio: 1.5.
- Viga central, cabezal fijo, unión cabezal fijo-viga central:
  - Tamaño de elemento: 10mm.
  - Ratio: 1.5.
- Unión viga lateral-cabezal:
  - Tamaño de elemento: 2.5mm.
  - Ratio: 1.5.

Para el resto de los componentes se ha creado una malla basada en curvatura con los siguientes parámetros:

- Tamaño máximo de elemento: 18mm.
- Tamaño mínimo de elemento: 3.6mm.
- Número de elementos por círculo: 8.
- Ratio de crecimiento: 1.2.

Con estos parámetros y los controles de mallado, la malla creada tiene las siguientes características:

- Número de nodos: 458979.
- Número de elementos: 1819655.

#### 4.5. Condiciones de contorno, conexión entre componentes y aplicación de la carga

##### 4.5.1. Condiciones de contorno

La única condición de contorno que se ha aplicado es, una sujeción fija en el cabezal fijo (figura 13), ya que se ha supuesto que el tractor agrícola se encuentra parado, y es el propio suelo el que ejerce la fuerza sobre el apero agrícola. Esta condición de contorno se ha aplicado en la cara a través de la cual el apero se une al cabezal de giro.

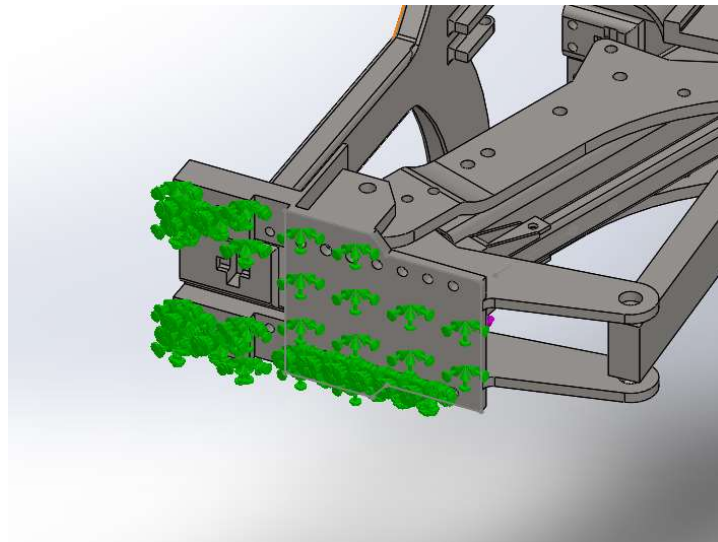


Figura 13: Sujeción fija en cabezal fijo.

##### 4.5.2. Conexión entre componentes

Las conexiones que se han realizado son: conector tipo pasador, unión rígida y contacto sin penetración.

- **Contacto tipo pasador:** Permite el giro relativo entre los componentes seleccionados, esta conexión se ha impuesto entre los componentes que hace posible que el apero agrícola varíe su anchura. Las uniones con este tipo de conexión son: unión cabezal fijo-viga central, unión cabezal fijo-viga lateral, unión viga lateral-brazo, unión viga central-brazo y unión cabezal fijo-fijación anchura. En la figura 14 aparecen señaladas estas uniones.

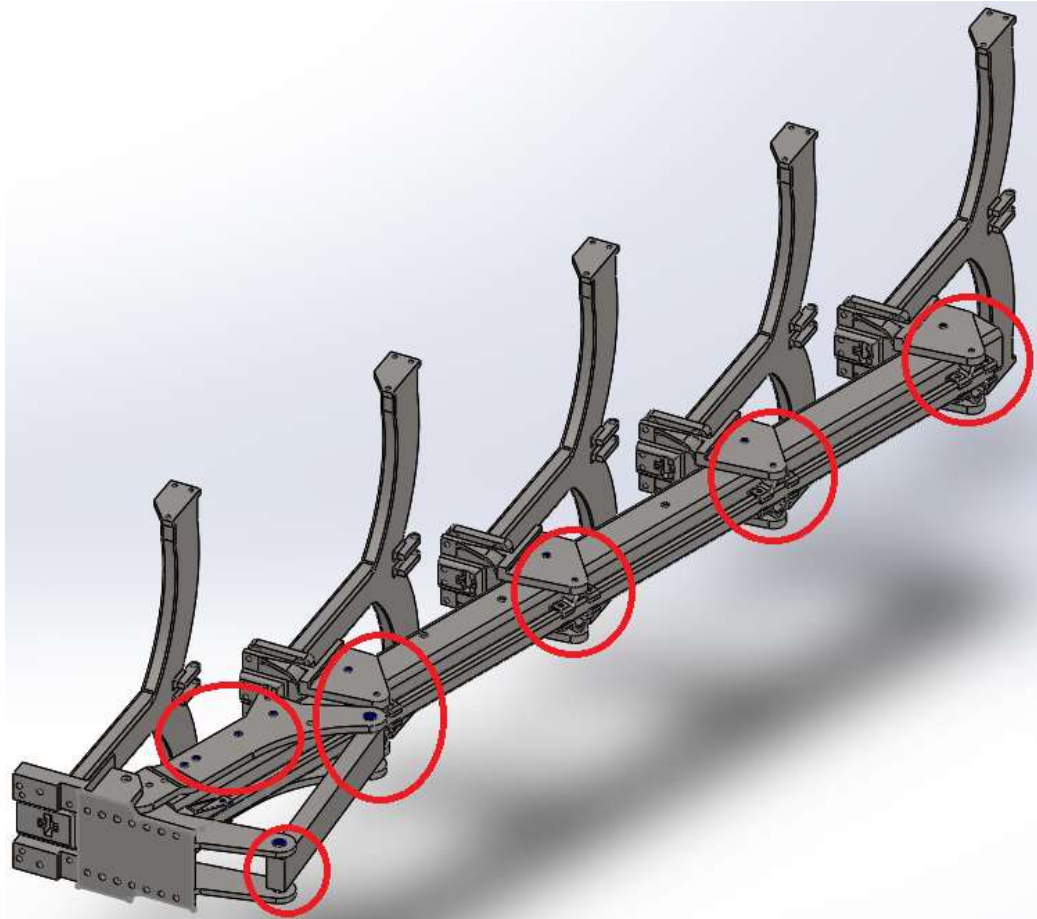


Figura 14: Conexiones conector tipo pasador.

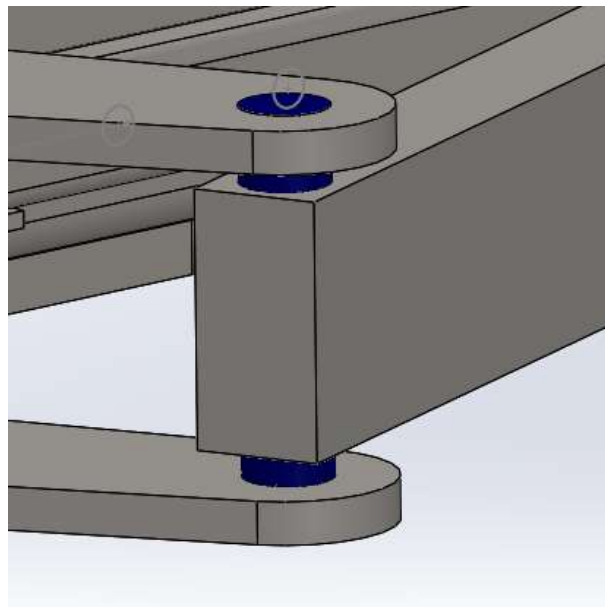


Figura 15: Detalle del conector tipo pasador.

- **Contacto sin penetración:** Esta conexión (figura 16) permite que un componente deslice encima de otro, obligando a que solo actúe la conexión tipo pasador, y así, evitar que aparezcan tensiones erróneas en las uniones entre componentes que tienen giro relativo (figura 17). Este tipo de conexión se ha impuesto entre componentes que poseen giro relativo cuando el apero varía su anchura, como, por ejemplo, el componente unión viga centra-brazo y el componente viga central.

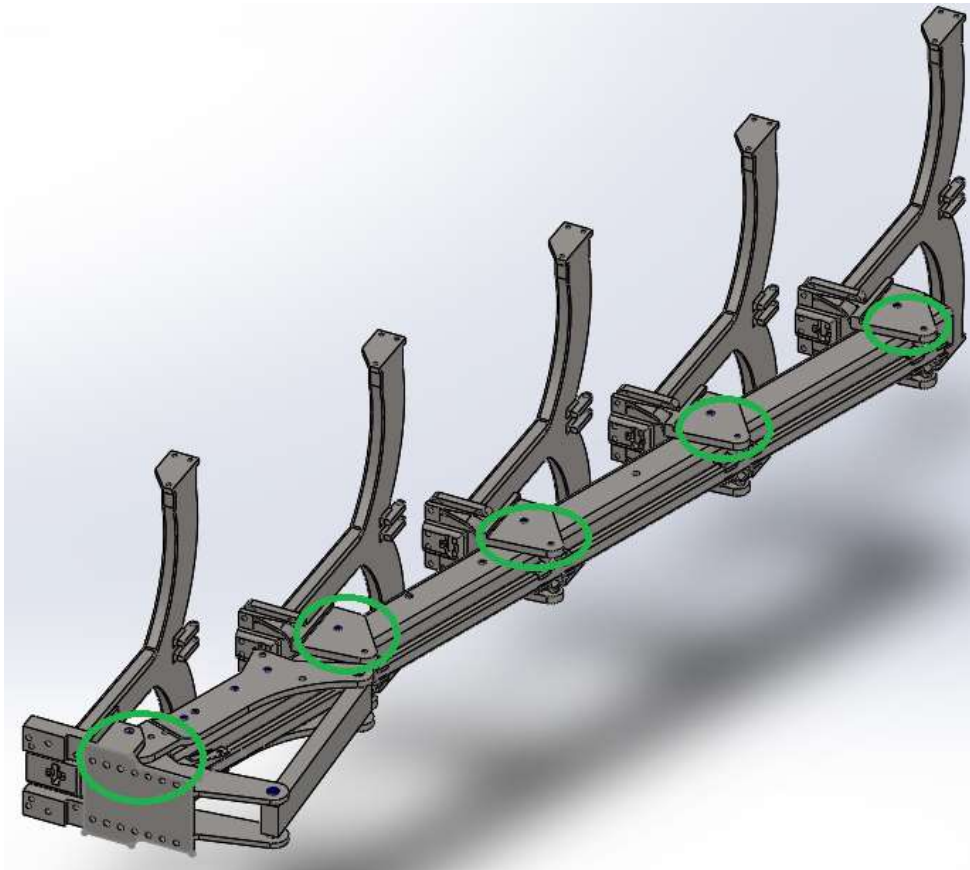


Figura 16: Conexiones contacto sin penetración.

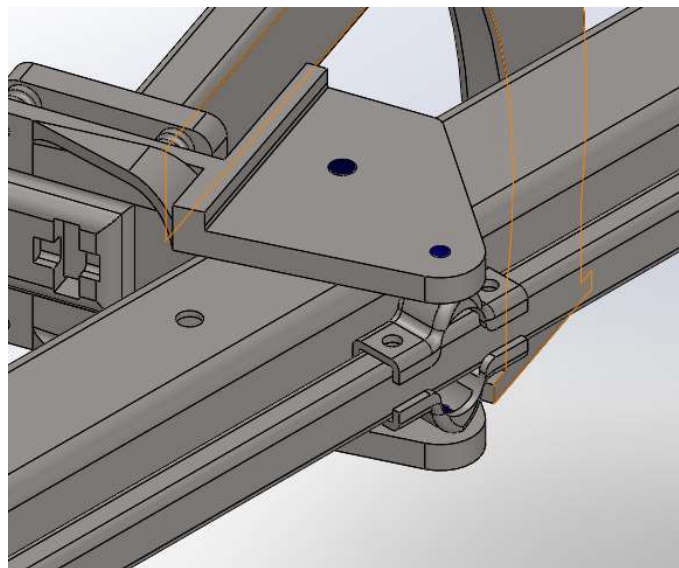


Figura 17: Detalle de dos componentes que poseen giro relativo.

- **Conexión unión rígida:** Este tipo de conexión establece todos los sólidos en contacto, como si solo fueran uno. Estas conexiones han sido aplicadas entre los componentes que no poseen giro relativo, como, por ejemplo, los separadores y el brazo.

#### 4.5.3. Cargas aplicadas

En el análisis del apero agrícola en funcionamiento, las cargas aplicadas varían en función de la anchura, de la velocidad y del tipo de suelo, con relación a la anchura (tabla 3), se han realizado análisis con anchura máxima (1132mm) y con anchura mínima (1520mm), con relación a la velocidad, se han realizado análisis a velocidad media (6.5Km/h) y a velocidad máxima recomendable (8 Km/h) y con relación al tipo de suelo, se han realizado análisis con suelo duro (limoso), con suelo medio (franco) y con suelo blando (arenoso). En las siguientes tablas (tabla 4 tabla 5 y tabla 6) aparecen reflejadas las fuerzas a las que está sometido cada brazo en función de los parámetros citados anteriormente. En el ANEXO D aparecen las ecuaciones para obtener las fuerzas en función de la velocidad expresadas en  $N/cm^2$ . Para la obtención de la superficie de labor por brazo, se ha dividido la anchura total de labor entre el número de brazos y después se ha multiplicado por la profundidad máxima.

| Anchura de labor total (mm) | Anchura de labor por brazo (mm) | Profundidad máxima (mm) | Superficie de labor por brazo (cm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|--|
| 1132                        | 226,4                           | 285                     | 645,24   |
| 1520                        | 304                             | 285                     | 866,4  |

Tabla 3: Superficies de labor por brazo.

| Tipo de suelo         | Fuerza por unidad de superficie (N/cm <sup>2</sup> ) |                           |
|-----------------------|--|---------------------------|
|                       | Velocidad media (6,5 Km/h)                           | Velocidad máxima (8 Km/h) |
| Limoso                | 9,07025  | 10,136                    |
| Franco-arcilloso      | 8,23925  | 9,392                     |
| Franco-arcillo-limoso | 5,814  | 6,336                     |
| Franco                | 3,845  | 4,28                      |
| Limo-arenoso          | 5,366  | 6,584                     |
| Franco-arenoso        | 3,34925  | 3,632                     |
| Arenoso               | 2,54925  | 2,832                     |

Tabla 4: Fuerzas por unidad de superficie en función de la velocidad.

| Fuerza total por brazo a velocidad media (N) |                         |
|--|-------------------------|
| Anchura mínima (1132mm)                      | Anchura máxima (1520mm) |
| 5852   | 7858                    |
| 5316   | 7138                    |
| 3751   | 5037                    |
| 2481   | 3331                    |
| 3462   | 4649                    |
| 2161   | 2902                    |
| 1645   | 2209                    |

Tabla 5: Continuación.

| Fuerza total por brazo a velocidad máxima (N) |                         |
|---|-------------------------|
| Anchura mínima (1132mm)                       | Anchura máxima (1520mm) |
| 6540  | 8782                    |
| 6060  | 8137                    |
| 4088  | 5490                    |
| 2762  | 3708                    |
| 4248  | 5704                    |
| 2344  | 3147                    |
| 1827  | 2454                    |

Tabla 6: Continuación.

Las siguientes figuras (figura 19 y figura 20) muestran las dos anchuras con las que ha sido analizado el apero agrícola. Esta variación de anchura se produce variando la longitud de la pieza que aparece señalada en la figura 18. Las capturas han sido realizadas desde un plano paralelo al plano del cabezal fijo.

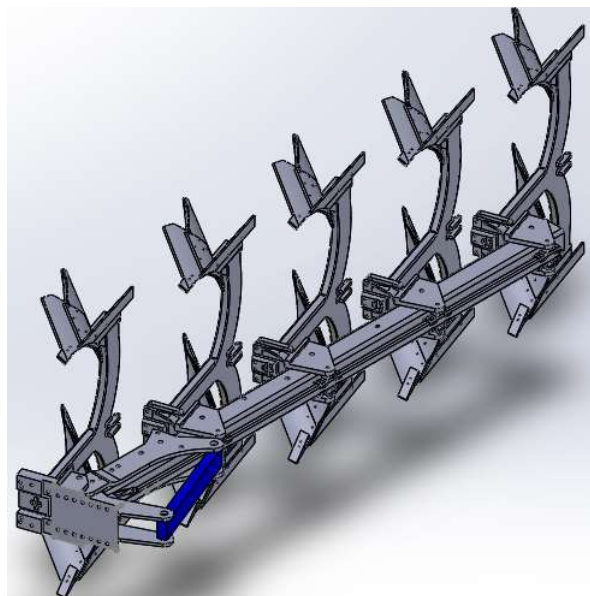


Figura 18: Pieza con la que se varía la anchura del apero.

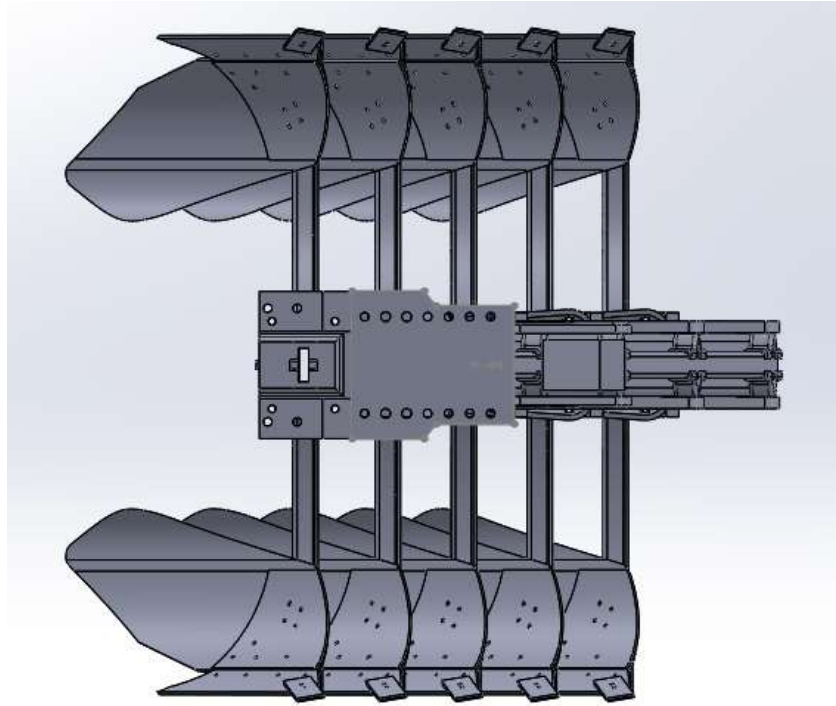


Figura 19: Anchura mínima 1135mm.

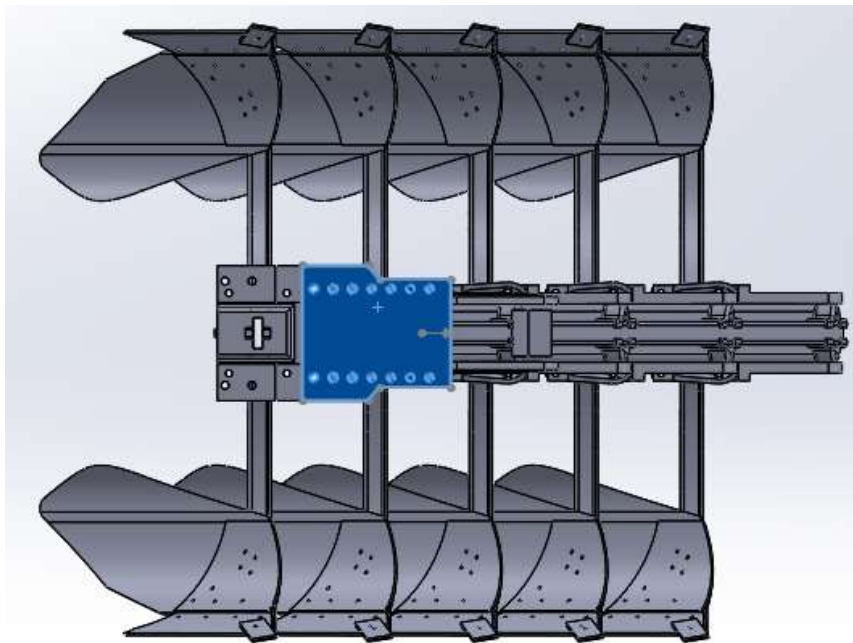


Figura 20: Anchura máxima 1520.

En el análisis del apero agrícola en voladizo, se ha analizado solo el chasis, con los cual se ha tenido en cuenta, tanto el peso de los conjuntos reja vertedera, como el peso de la rueda reguladora de profundidad (tabla 7).

|                         | Peso (Kg) | Fuerza (N) |
|-------------------------|-----------|------------|
| Conjunto reja-vertedera | 35,168    | 345        |
| Rueda profundidad       | 30,75     | 302        |

Tabla 7: Peso rueda y conjunto reja vertedera.

#### 4.5.4. Casos de carga analizados

##### 4.5.4.1. Voladizo

En este análisis se ha tenido en cuenta tanto, el voladizo con anchura máxima, como el voladizo con anchura mínima. Para ambos casos las cargas se han aplicado en los mismos lugares. En los brazos se ha aplicado tanto, en un extremo, como en el otro, el peso (expresado en Newtons) del conjunto reja-vertedera y el peso de la rueda reguladora de profundidad se ha aplicado en la tercera unión viga central-brazo. A parte de estas dos cargas también se ha aplicado la acción de la gravedad, ya que en este apero tiene gran influencia por ser de dimensiones bastante considerables (4800x2100x1600). En la figura 19 aparece reflejada la posición de dichas cargas.

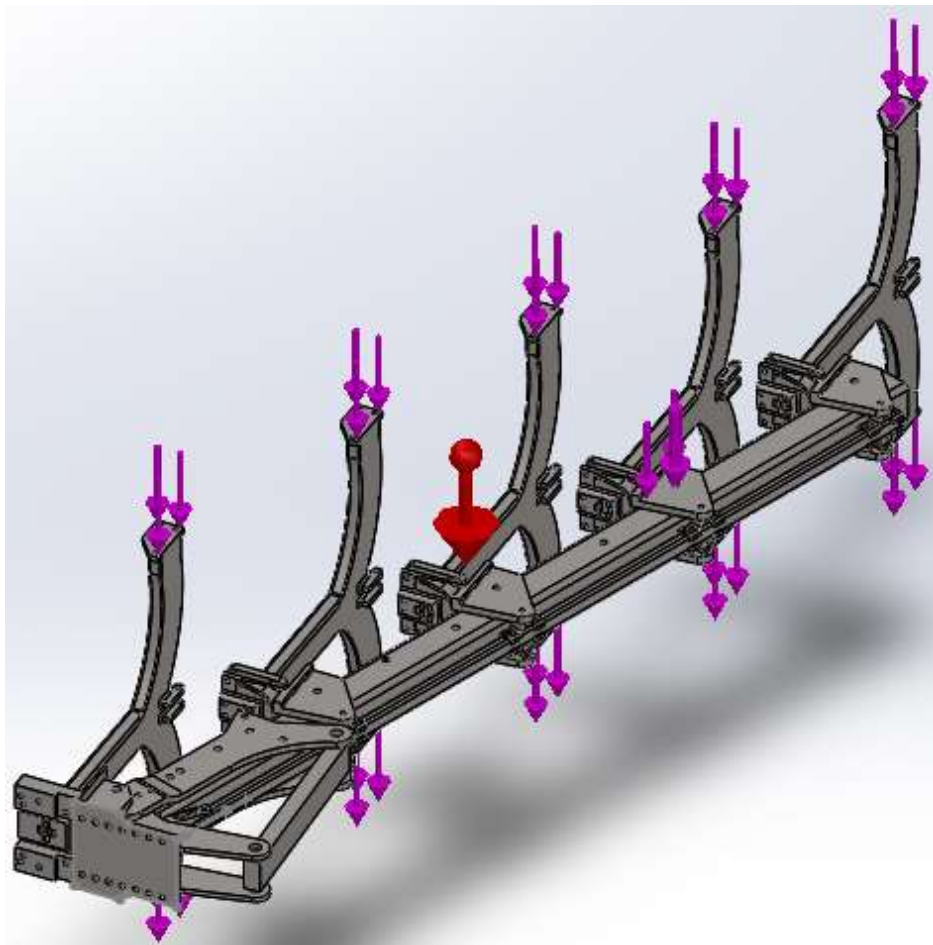


Figura 21: Cargas aplicadas para el análisis del arado de vertedera en voladizo.



#### 4.5.4.2. Profundidad máxima y anchura mínima

En este apartado se han analizado las tensiones, los desplazamientos y el factor de seguridad del arado de vertederas cuando está trabajando a profundidad máxima y anchura mínima, en función de la velocidad y del tipo de suelo. En total se han realizado seis análisis en función del tipo de suelo, tres para velocidad media y otros tres para velocidad máxima.

Tanto en este caso, como en el resto de análisis, las cargas se han aplicado en ambos extremos inferiores de cada uno de los brazos, perpendiculares al plano del cabezal fijo y hacia atrás, que es la dirección en la que el tractor agrícola ejerce la fuerza, en la figura 22 aparecen reflejadas dichas cargas. Además, se han tenido en cuenta los pesos de cada uno de los conjuntos reja-vertedera, aunque en la imagen no aparecen representados.

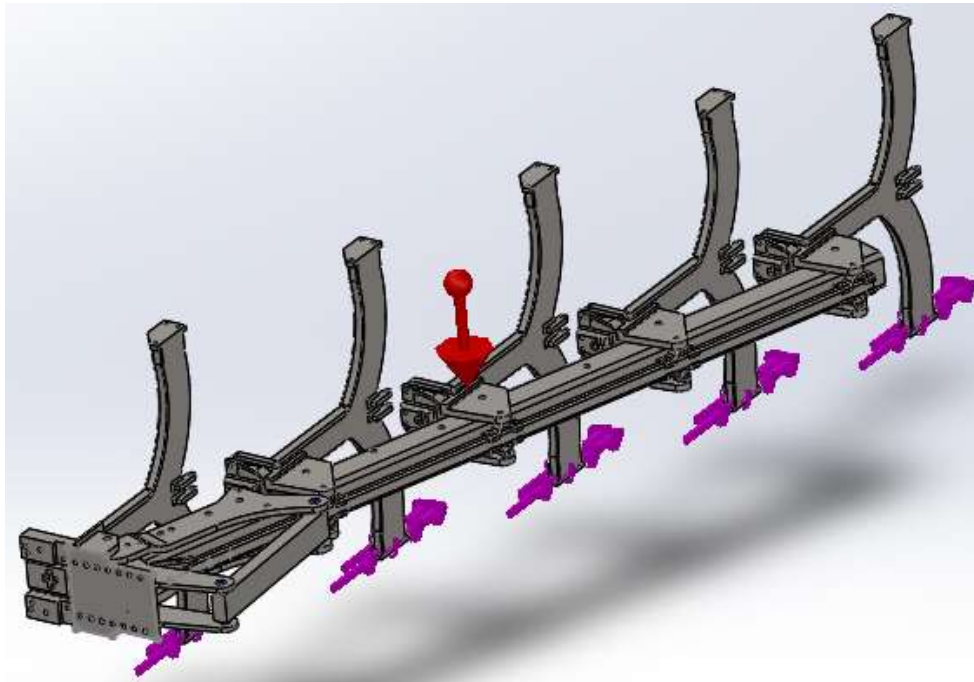


Figura 22: Cargas aplicadas para el análisis del arado de vertedera trabajando a profundidad máxima y anchura mínima.

#### 4.5.4.3. Profundidad y anchura máximas

Al igual que en el apartado anterior, en este apartado se han analizado las tensiones, los desplazamientos y el factor de seguridad del arado de vertederas cuando está trabajando a profundidad máxima y anchura máxima, en función de la velocidad y del tipo de suelo. En total se han realizado seis análisis en función del tipo de suelo, tres para velocidad media y otros tres para velocidad máxima.

Las cargas se han aplicado de la misma manera que en el apartado anterior, lo único que se ha variado es el modelo sobre el que se han aplicado, ya que, en este caso, el modelo necesario es el de anchura máxima.

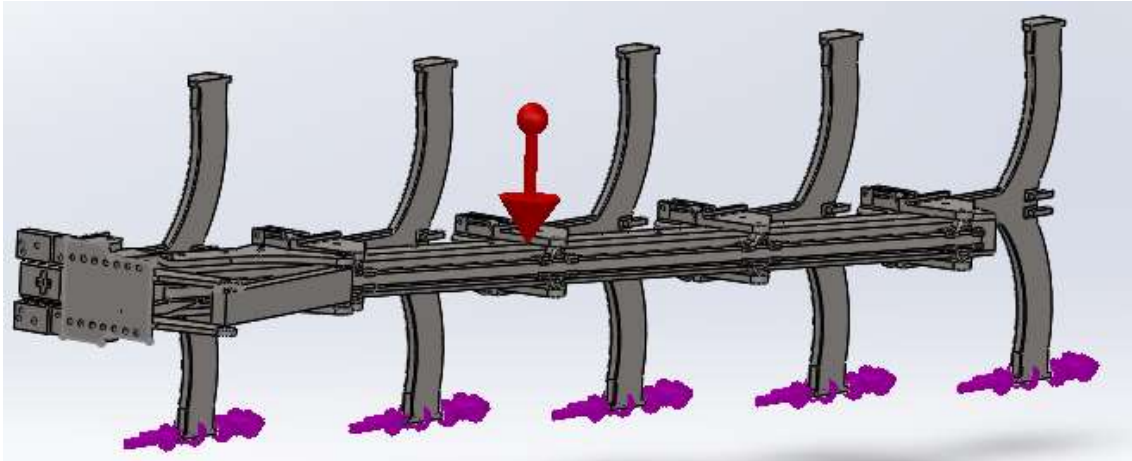


Figura 23: Cargas aplicadas para el análisis del arado de vertedera trabajando a profundidad máxima y anchura máxima.

## 5. RESULTADOS DEL MODELO INICIAL

Una vez determinadas las cargas y los puntos en los que estas se encuentran aplicadas se ha procedido al cálculo de cada uno de los diferentes estudios, nombrados anteriormente, mediante el programa de cálculo SOLIDWORKS 2015.

Para cada uno de los casos de carga analizados, se ha creado una tabla donde se expresan, para cada uno de los componentes, el material con el que está fabricado, el límite elástico, la tensión equivalente máxima de Von Mises y el coeficiente de seguridad. Tanto el límite elástico, como la tensión equivalente máxima de Von Mises se encuentran expresados en MPa ( $N/mm^2$ ).

En el ANEXO E se muestran con más detalle las tensiones a las que están sometidas cada uno de los componentes. Este anexo solo hace referencia a los casos de mayor carga (voladizo y anchura máxima a máxima velocidad en suelo limoso) ya que son los que se han tenido en cuenta para la optimización del chasis. En este anexo también se han incluido las figuras que hacen referencia a los resultados obtenidos en cada uno de los estudios realizados, exceptuando el primero, ya que estas figuras son similares.

### 5.1. Modelo en voladizo

En este apartado se han analizado las tensiones que experimenta el chasis del arado cuando el tractor agrícola lo transporta de parcela a parcela, ya que el único punto de apoyo que tiene en este momento, es el cabezal fijo, el resto del chasis se encuentra en el aire. Debido a que el apero tiene un tamaño considerable, es en este caso de carga donde se producen las mayores tensiones.

Se han tenido en cuenta dos estudios en este apartado, tanto el voladizo con el apero a máxima anchura, como el voladizo a anchura mínima.

#### 5.1.1. Anchura máxima

En las figuras 24, 25 y 26, aparecen reflejadas la tensión máxima de Von Mises, el desplazamiento máximo y el factor de seguridad respectivamente.

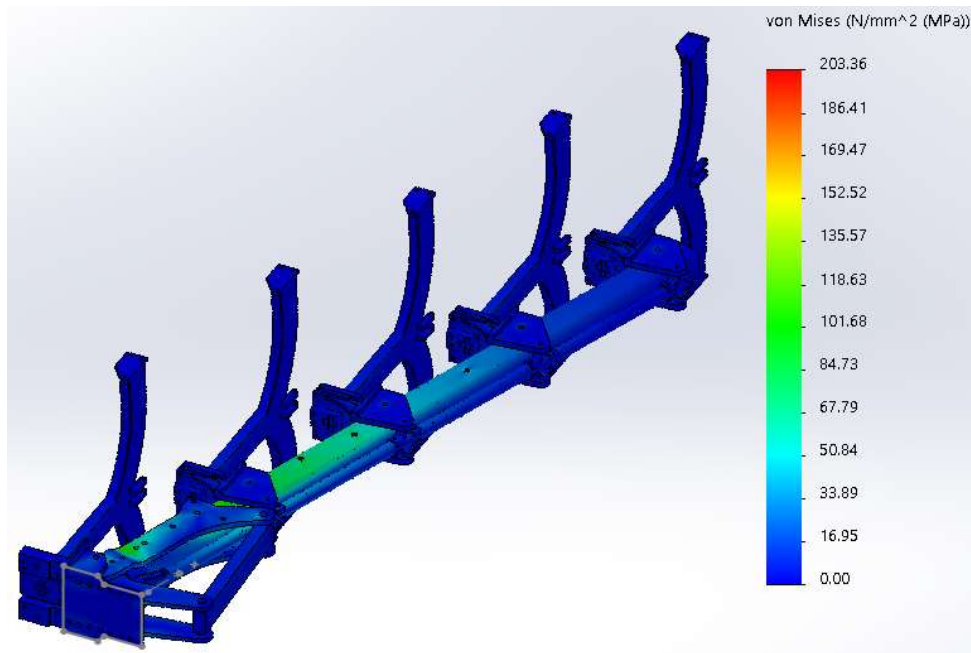


Figura 24: Tensión máxima de Von Mises, anchura máxima, voladizo.

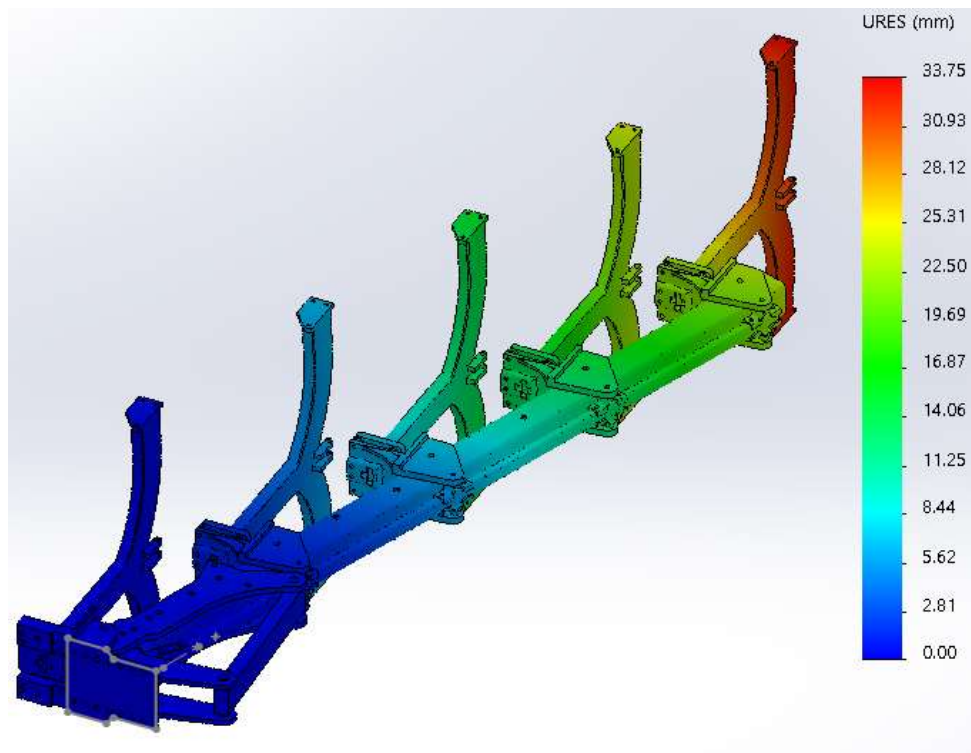


Figura 25: Desplazamientos, anchura máxima, voladizo.

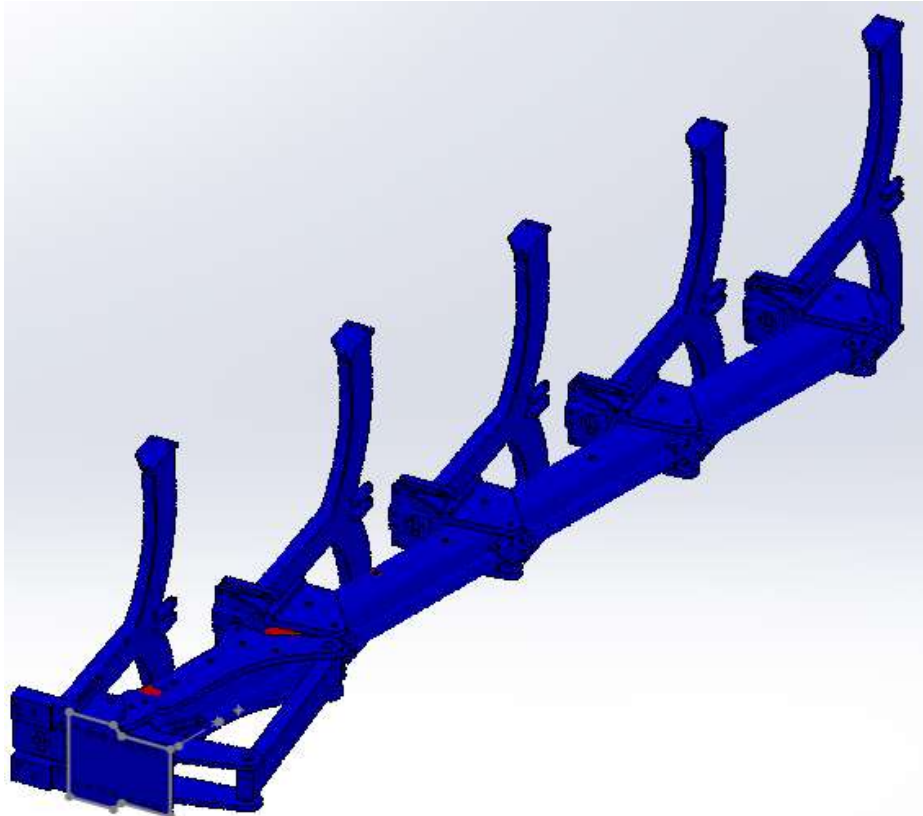


Figura 26: Factor de seguridad, anchura máxima, voladizo.

Como se puede observar en la figura 24, la máxima tensión a la que está sometido el chasis es 203.36 MPa, esta tensión aparece en la viga central. El máximo desplazamiento se encuentra representado en rojo en la figura 25, y es máximo, como era de esperar, al extremo opuesto al componente que está empotrado. En la figura 26 se ha representado el coeficiente de seguridad, las zonas en color rojo son las que poseen un factor de seguridad menor que 3.

En la siguiente tabla se han recogido las tensiones máximas de Von Mises de cada uno de los componentes, en este caso de carga en voladizo con anchura máxima.

| Anchura 1520 mm, Voladizo             |          |                       |                             |                           |
|---------------------------------------|----------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Componente                            | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coefficiente de seguridad |
| Viga central                          | S275JR   | 275                   | 203,36                      | 1,35                      |
| Viga lateral                          | S275JR   | 275                   | 64,07                       | 4,29                      |
| Unión viga central-viga lateral-brazo | S275JR   | 275                   | 17,99                       | 15,28                     |
| Brazo o cuerpo                        | S275JR   | 275                   | 17,39                       | 15,81                     |
| Unión cabezal fijo-viga central       | S275JR   | 275                   | 120,3                       | 2,28                      |
| Unión viga lateral-brazo              | S275JR   | 275                   | 28,19                       | 9,75                      |
| Cabezal fijo                          | S275JR   | 275                   | 49,7                        | 5,53                      |
| Unión viga lateral-cabezal fijo       | S275JR   | 275                   | 26,16                       | 10,51                     |
| Separadores                           | S355JR   | 355                   | 45,29                       | 7,83                      |

Tabla 8: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, voladizo.

5.1.2. Anchura mínima

En las figuras 27, 28 y 29, aparecen reflejadas la tensión máxima de Von Mises, el desplazamiento máximo y el factor de seguridad respectivamente.

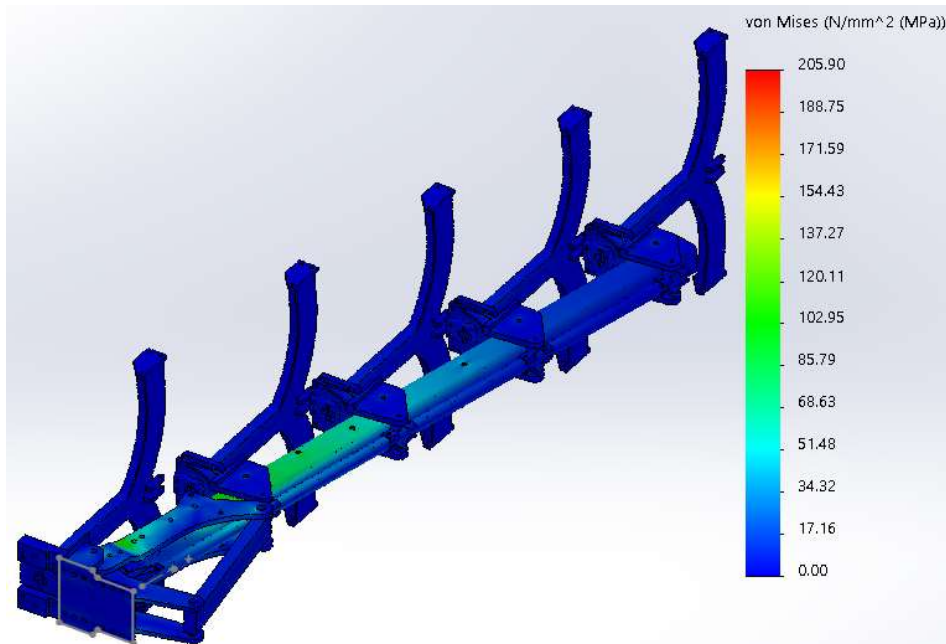


Figura 27: Tensión máxima de Von Mises, anchura mínima, voladizo.

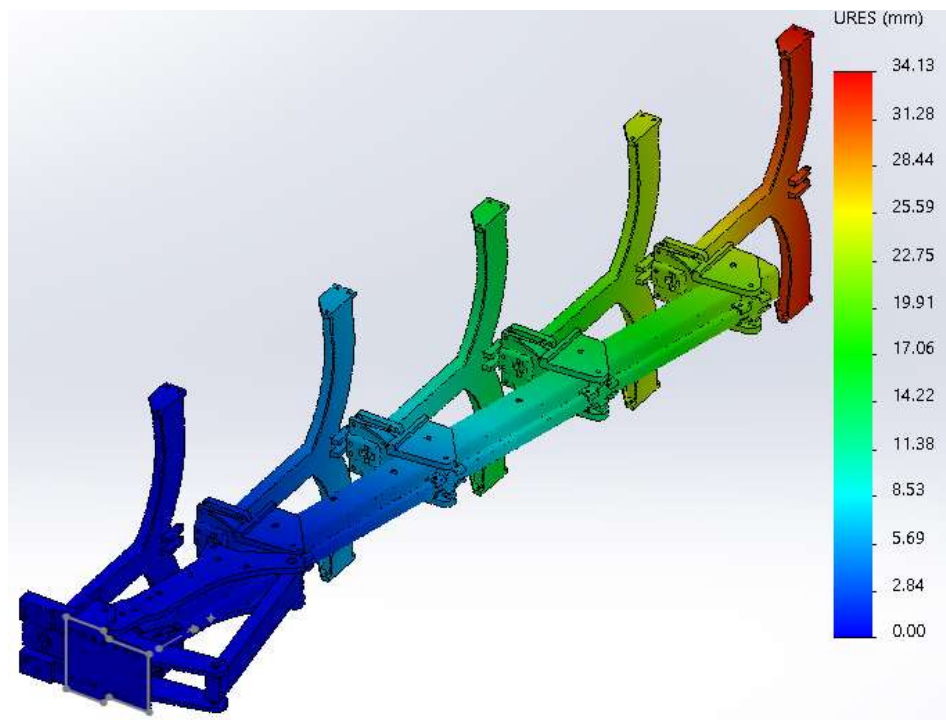


Figura 28: Desplazamientos, anchura mínima, voladizo.

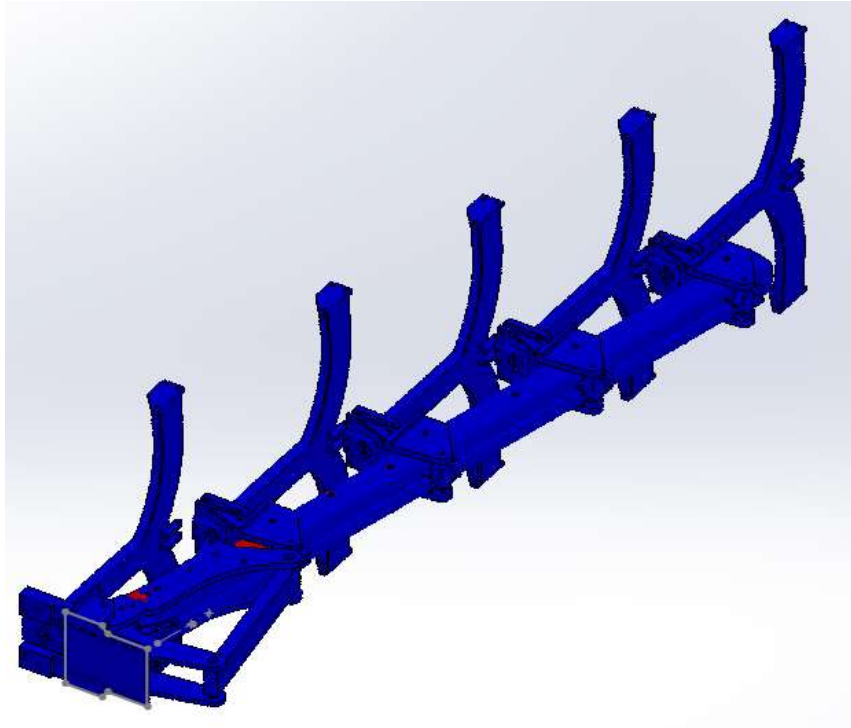


Figura 29: Factor de seguridad, anchura mínima, voladizo.

Al igual que en el caso anterior, la mayor tensión la experimenta la viga central, aunque en este caso es un poco mayor (205.9 MPa), esto es debido, a que al tener el apero menos anchura, la distancia entre el empotramiento (cabezal fijo) y el extremo posterior del apero es mayor, produciendo un momento flector más elevado en el mismo punto. Este efecto también hace que el desplazamiento sea mayor (figura 28).

En la tabla 9, aparecen reflejadas las máximas tensiones de cada uno de los componentes, así como el factor de seguridad.

| Anchura 1132 mm, Voladizo             |          |                       |                             |                         |
|---------------------------------------|----------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Componente                            | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coficiente de seguridad |
| Viga central                          | S275JR   | 275                   | 205,9                       | 1,33                    |
| Viga lateral                          | S275JR   | 275                   | 74,67                       | 3,68                    |
| Unión viga central-viga lateral-brazo | S275JR   | 275                   | 16,15                       | 17,02                   |
| Brazo o cuerpo                        | S275JR   | 275                   | 18,78                       | 14,64                   |
| Unión cabezal fijo-viga central       | S275JR   | 275                   | 119,28                      | 2,31                    |
| Unión viga lateral-brazo              | S275JR   | 275                   | 31,36                       | 8,77                    |
| Cabezal fijo                          | S275JR   | 275                   | 50,65                       | 5,43                    |
| Unión viga lateral-cabezal fijo       | S275JR   | 275                   | 26,17                       | 10,51                   |
| Separadores                           | S355JR   | 355                   | 45,55                       | 7,79                    |

Tabla 9: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, voladizo.

## 5.2. Modelo trabajando a máxima profundidad y anchura mínima

En este apartado se han analizado las tensiones a las que está sometido el chasis del apero agrícola cuando se encuentra trabajando a máxima profundidad y con anchura mínima.

Se ha tenido en cuenta dos velocidades de trabajo, una velocidad media de 6.5 Km/h y una velocidad máxima recomendable de 8Km/h, además se han realizados tres estudios deferentes, según el tipo de suelo, para cada una de las velocidades.

Las figuras correspondientes a este apartado se encuentran representadas en el ANEXO E.

### 5.2.1. Velocidad media

#### 5.2.1.1. Suelo limoso

Como indican las tablas 4, 5 y 6, la fuerza aplicada para este caso en los extremos inferiores de cada uno de los cuerpos, es de 5852 N.

En las figuras 79, 80 y 81, se han representado las tensiones máximas de Von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad, respectivamente.

En este caso las mayores tensiones las experimentan, tanto los separadores, como la viga lateral, aunque ninguna de ellas presenta un coeficiente de seguridad cercano a 1.

En la tabla 10, aparecen reflejadas las máximas tensiones de cada uno de los compontes, así como el factor de seguridad.

| Anchura 1132 mm, Velocidad 6,5Km/h, Características del suelo: Limoso |          |                       |                             |                          |
|---|----------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Componente  | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coeficiente de seguridad |
| Viga central  | S275JR   | 275                   | 82,99                       | 3,31                     |
| Viga lateral  | S275JR   | 275                   | 92,41                       | 2,98                     |
| Unión viga central-viga lateral-brazo                                 | S275JR   | 275                   | 42,83                       | 6,42                     |
| Brazo o cuerpo  | S275JR   | 275                   | 61,05                       | 4,50                     |
| Unión cabezal fijo-viga central                                       | S275JR   | 275                   | 39,81                       | 6,91                     |
| Unión viga lateral-brazo  | S275JR   | 275                   | 56,55                       | 4,86                     |
| Cabezal fijo  | S275JR   | 275                   | 89,16                       | 3,08                     |
| Unión viga lateral-cabezal fijo                                       | S275JR   | 275                   | 63,99                       | 4,30                     |
| Separadores   | S355JR   | 355                   | 135.73                      | 2,82                     |

Tabla 10: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad media, suelo limoso.

## 5.2.1.2. Suelo franco

Como indican las tablas 4, 5 y 6, la fuerza aplicada para este caso en los extremos inferiores de cada uno de los cuerpos, es de 2481 N.

En las figuras 82, 83 y 84, se han representado las tensiones máximas de Von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad, respectivamente.

En este caso, al igual que en el anterior, las máximas tensiones aparecen en la viga lateral y en los separadores, pero al ser un suelo de dureza media, los esfuerzos a los que están sometidos cada uno de los componentes son menores, presentando un coeficiente de seguridad mayor que 6 en todos.

En la tabla 11, aparecen reflejadas las máximas tensiones de cada uno de los componentes, así como el factor de seguridad.

| Anchura 1132 mm, Velocidad 6,5Km/h, Características del suelo: Franco |          |                       |                             |                           |
|---|----------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Componente  | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coefficiente de seguridad |
| Viga central  | S275JR   | 275                   | 34,07                       | 8,07                      |
| Viga lateral  | S275JR   | 275                   | 44,91                       | 6,12                      |
| Unión viga central-viga lateral-brazo                                 | S275JR   | 275                   | 14,43                       | 19,06                     |
| Brazo o cuerpo  | S275JR   | 275                   | 25,21                       | 10,91                     |
| Unión cabezal fijo-viga central                                       | S275JR   | 275                   | 30,83                       | 8,92                      |
| Unión viga lateral-brazo  | S275JR   | 275                   | 34,09                       | 8,07                      |
| Cabezal fijo  | S275JR   | 275                   | 35,11                       | 7,83                      |
| Unión viga lateral-cabezal fijo                                       | S275JR   | 275                   | 27,9                        | 9,86                      |
| Separadores   | S355JR   | 355                   | 65,02                       | 6,08                      |

Tabla 11: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad media, suelo franco.

## 5.2.1.3. Suelo arenoso

Como indican las tablas 4, 5 y 6, la fuerza aplicada para este caso en los extremos inferiores de cada uno de los cuerpos, es de 1645 N.

En las figuras 85, 86 y 87, se han representado las tensiones máximas de Von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad, respectivamente.

En este caso, el componente que experimenta mayor tensión es la viga central. Esta tensión es más elevada que en el caso anterior, esto es debido a que la fuerza que ejerce la acción de la gravedad es mayor que el momento flector que generan las cargas aplicadas en el extremo inferior de los brazos. El coeficiente de seguridad sigue estando por encima de 3.

En la tabla 12, aparecen reflejadas las máximas tensiones de cada uno de los componentes, así como el factor de seguridad.



| Anchura 1132 mm, Velocidad 6,5Km/h, Características del suelo: Arenoso |          |                       |                             |                         |
|--|----------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Componente   | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coficiente de seguridad |
| Viga central   | S275JR   | 275                   | 85,43                       | 3,22                    |
| Viga lateral   | S275JR   | 275                   | 41,62                       | 6,61                    |
| Unión viga central-viga lateral-brazo                                  | S275JR   | 275                   | 7,45                        | 36,91                   |
| Brazo o cuerpo   | S275JR   | 275                   | 16,33                       | 16,84                   |
| Unión cabezal fijo-viga central  | S275JR   | 275                   | 45,25                       | 6,08                    |
| Unión viga lateral-brazo   | S275JR   | 275                   | 33,23                       | 8,28                    |
| Cabezal fijo   | S275JR   | 275                   | 35,55                       | 7,74                    |
| Unión viga lateral-cabezal fijo  | S275JR   | 275                   | 20,58                       | 13,36                   |
| Separadores  | S355JR   | 355                   | 20,36                       | 17,44                   |

Tabla 12: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad media, suelo arenoso.

## 5.2.2. Velocidad máxima recomendable

### 5.2.2.1. Suelo limoso

Como indican las tablas 4, 5 y 6, la fuerza aplicada para este caso en los extremos inferiores de cada uno de los cuerpos, es de 6540 N.

En las figuras 88, 89 y 90, se han representado las tensiones máximas de Von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad, respectivamente.

Como era de esperar, al aumentar la velocidad aumenta la carga aplicada, aumentando las tensiones en cada uno de los componentes, como se aprecia en la figura 88, las máximas tensiones se producen, al igual que en el caso anterior, en los separadores y en la viga lateral. En este caso los factores de seguridad caen por debajo de tres.

En la tabla 13, aparecen reflejadas las máximas tensiones de cada uno de los componentes, así como el factor de seguridad.

| Anchura 1132 mm, Velocidad 8Km/h, Características del suelo: Limoso |          |                       |                             |                         |
|---|----------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Componente  | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coficiente de seguridad |
| Viga central  | S275JR   | 275                   | 97,56                       | 2,82                    |
| Viga lateral  | S275JR   | 275                   | 102,06                      | 2,69                    |
| Unión viga central-viga lateral-brazo                               | S275JR   | 275                   | 48,63                       | 5,65                    |
| Brazo o cuerpo  | S275JR   | 275                   | 67,45                       | 4,08                    |
| Unión cabezal fijo-viga central                                     | S275JR   | 275                   | 45,93                       | 5,99                    |
| Unión viga lateral-brazo  | S275JR   | 275                   | 63,04                       | 4,36                    |
| Cabezal fijo  | S275JR   | 275                   | 97,81                       | 2,81                    |
| Unión viga lateral-cabezal fijo                                     | S275JR   | 275                   | 72,26                       | 3,81                    |
| Separadores   | S355JR   | 355                   | 154,09                      | 2,30                    |

Tabla 13: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad máxima, suelo limoso.

## 5.2.2.2. Suelo franco

Como indican las tablas 4, 5 y 6, la fuerza aplicada para este caso en los extremos inferiores de cada uno de los cuerpos, es de 2762 N.

En las figuras 91, 92 y 93, se han representado las tensiones máximas de Von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad, respectivamente.

En este caso las mayores tensiones se producen en la viga central, pero como la carga es menor que en el caso anterior, los factores de seguridad están todos por encima de 4.

En la tabla 14, aparecen reflejadas las máximas tensiones de cada uno de los componentes, así como el factor de seguridad.

| Anchura 1132 mm, Velocidad 8Km/h, Características del suelo: Franco |          |                       |                             |                           |
|---|----------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Componente  | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coefficiente de seguridad |
| Viga central  | S275JR   | 275                   | 58,36                       | 4,71                      |
| Viga lateral  | S275JR   | 275                   | 48,91                       | 5,62                      |
| Unión viga central-viga lateral-brazo                               | S275JR   | 275                   | 15,36                       | 17,90                     |
| Brazo o cuerpo  | S275JR   | 275                   | 28,2                        | 9,75                      |
| Unión cabezal fijo-viga central                                     | S275JR   | 275                   | 25,94                       | 10,60                     |
| Unión viga lateral-brazo  | S275JR   | 275                   | 36,57                       | 7,52                      |
| Cabezal fijo  | S275JR   | 275                   | 38,06                       | 7,23                      |
| Unión viga lateral-cabezal fijo                                     | S275JR   | 275                   | 30,42                       | 9,04                      |
| Separadores   | S355JR   | 355                   | 47,88                       | 7,41                      |

Tabla 14: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad máxima, suelo franco.

## 5.2.2.3. Suelo arenoso

Como indican las tablas 4, 5 y 6, la fuerza aplicada para este caso en los extremos inferiores de cada uno de los cuerpos, es de 1827 N.

En las figuras 94, 95 y 96, se han representado las tensiones máximas de Von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad, respectivamente.

En este caso, aunque la carga aplicada es menor, la tensión que se genera en la viga central es mayor, debido a que la acción de la gravedad crea una carga hacia abajo superior al momento flector que genera la carga aplicada en los extremos inferiores de los brazos. De todas formas, el coeficiente de seguridad sigue estando por encima de 3.

En la tabla 15, aparecen reflejadas las máximas tensiones de cada uno de los componentes, así como el factor de seguridad.

| Anchura 1132 mm, Velocidad 8Km/h, Características del suelo: Arenoso |          |                       |                             |                           |
|--|----------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Componente   | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coefficiente de seguridad |
| Viga central   | S275JR   | 275                   | 80,78                       | 3,40                      |
| Viga lateral   | S275JR   | 275                   | 41,25                       | 6,67                      |
| Unión viga central-viga lateral-brazo                                | S275JR   | 275                   | 8,96                        | 30,69                     |
| Brazo o cuerpo   | S275JR   | 275                   | 18,26                       | 15,06                     |
| Unión cabezal fijo-viga central                                      | S275JR   | 275                   | 42,11                       | 6,53                      |
| Unión viga lateral-brazo   | S275JR   | 275                   | 25,23                       | 10,90                     |
| Cabezal fijo   | S275JR   | 275                   | 37,81                       | 7,27                      |
| Unión viga lateral-cabezal fijo                                      | S275JR   | 275                   | 22,16                       | 12,41                     |
| Separadores  | S355JR   | 355                   | 24,67                       | 14,39                     |

Tabla 15: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad máxima, suelo arenoso.

### 5.3. Modelo trabajando a máxima profundidad y anchura máxima

En este apartado se han analizado las tensiones a las que está sometido el chasis del apero agrícola cuando se encuentra trabajando a máxima profundidad y con anchura máxima. Por lo que, en cada uno de los apartados, la tensión será superior con respecto a los apartados anteriores.

Se ha tenido en cuenta dos velocidades de trabajo, una velocidad media de 6.5 Km/h y una velocidad máxima recomendable de 8Km/h, además se han realizados tres estudios deferentes, según el tipo de suelo, para cada una de las velocidades.

Las figuras correspondientes a este apartado se encuentran representadas en el ANEXO E.

#### 5.3.1. Velocidad media

##### 5.3.1.1. Suelo limoso

Como indican las tablas 4, 5 y 6, la fuerza aplicada para este caso en los extremos inferiores de cada uno de los cuerpos, es de 7858 N.

En las figuras 97, 98 y 99, se han representado las tensiones máximas de Von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad, respectivamente.

En este caso la tensión máxima se produce en el cabezal fijo, los separadores y la viga central. A diferencia con los estudios realizados con el apero a mínima anchura, en estos estudios se producen grandes tensiones en el cabezal debido a que, al poseer el apero mayor anchura, la viga central posee un mayor ángulo con respecto al cabezal fijo, haciendo que los esfuerzos transmitidos a dicho cabezal sean mayores. En la figura 99 se encuentran representadas en rojo las zonas cuyo coeficiente de seguridad es menor que 3.

En la tabla 16, aparecen reflejadas las máximas tensiones de cada uno de los compontes, así como el factor de seguridad.

| Anchura 1520 mm, Velocidad 6,5Km/h, Características del suelo: Limoso |          |                       |                             |                           |
|---|----------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Componente  | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coefficiente de seguridad |
| Viga central  | S275JR   | 275                   | 152,22                      | 1,81                      |
| Viga lateral  | S275JR   | 275                   | 129,06                      | 2,13                      |
| Unión viga central-viga lateral-brazo                                 | S275JR   | 275                   | 55,98                       | 4,91                      |
| Brazo o cuerpo  | S275JR   | 275                   | 80,21                       | 3,43                      |
| Unión cabezal fijo-viga central                                       | S275JR   | 275                   | 85,85                       | 3,20                      |
| Unión viga lateral-brazo  | S275JR   | 275                   | 75,18                       | 3,66                      |
| Cabezal fijo  | S275JR   | 275                   | 170,98                      | 1,61                      |
| Unión viga lateral-cabezal fijo                                       | S275JR   | 275                   | 92,27                       | 2,98                      |
| Separadores   | S355JR   | 355                   | 191,6                       | 1,85                      |

Tabla 16: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad media, suelo limoso.

### 5.3.1.2. Suelo franco

Como indican las tablas 4, 5 y 6, la fuerza aplicada para este caso en los extremos inferiores de cada uno de los cuerpos, es de 7858 N.

En las figuras 100, 101 y 102, se han representado las tensiones máximas de Von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad, respectivamente.

En este caso, y por las mismas razones que en el anterior, la tensión máxima se produce en el cabezal fijo, pero en este caso el factor de seguridad es mayor, debido a que la carga aplicada en los extremos de los brazos es menor, produciendo unas tensiones menores. Como se aprecia en la figura 102 el factor de seguridad no es menor de 3 en ninguno de sus componentes.

En la tabla 17, aparecen reflejadas las máximas tensiones de cada uno de los componentes, así como el factor de seguridad.

| Anchura 1520 mm, Velocidad 6,5Km/h, Características del suelo: Franco |          |                       |                             |                           |
|---|----------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Componente  | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coefficiente de seguridad |
| Viga central  | S275JR   | 275                   | 57,94                       | 4,75                      |
| Viga lateral  | S275JR   | 275                   | 61,49                       | 4,47                      |
| Unión viga central-viga lateral-brazo                                 | S275JR   | 275                   | 19,21                       | 14,32                     |
| Brazo o cuerpo  | S275JR   | 275                   | 33,35                       | 8,25                      |
| Unión cabezal fijo-viga central                                       | S275JR   | 275                   | 31,93                       | 8,61                      |
| Unión viga lateral-brazo  | S275JR   | 275                   | 35,92                       | 7,66                      |
| Cabezal fijo  | S275JR   | 275                   | 82,87                       | 3,32                      |
| Unión viga lateral-cabezal fijo                                       | S275JR   | 275                   | 38,87                       | 7,07                      |
| Separadores   | S355JR   | 355                   | 68,47                       | 5,18                      |

Tabla 17: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad media, suelo franco.

### 5.3.1.3. Suelo arenoso

Como indican las tablas 4, 5 y 6, la fuerza aplicada para este caso en los extremos inferiores de cada uno de los cuerpos, es de 2209 N.

En las figuras 103, 104 y 105, se han representado las tensiones máximas de Von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad, respectivamente.

En este caso, a diferencia de los dos anteriores, la carga aplicada en los extremos inferiores de los brazos es menor, esto hace que fuerza que ejerce la gravedad sea superior, y de ahí que las tensiones sean superiores en la viga central. De todas formas, el coeficiente es superior a 3, lo que quiere decir que las tensiones generadas no son altas.

En la tabla 18, aparecen reflejadas las máximas tensiones de cada uno de los componentes, así como el factor de seguridad.

| Anchura 1520 mm, Velocidad 6,5Km/h, Características del suelo: Arenoso |          |                       |                             |                          |
|--|----------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Componente   | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coeficiente de seguridad |
| Viga central   | S275JR   | 275                   | 70,28                       | 3,91                     |
| Viga lateral   | S275JR   | 275                   | 44,69                       | 6,15                     |
| Unión viga central-viga lateral-brazo                                  | S275JR   | 275                   | 12,27                       | 22,41                    |
| Brazo o cuerpo   | S275JR   | 275                   | 22,36                       | 12,30                    |
| Unión cabezal fijo-viga central  | S275JR   | 275                   | 36,27                       | 7,58                     |
| Unión viga lateral-brazo   | S275JR   | 275                   | 24,33                       | 11,30                    |
| Cabezal fijo   | S275JR   | 275                   | 64,33                       | 4,27                     |
| Unión viga lateral-cabezal fijo  | S275JR   | 275                   | 26,31                       | 10,45                    |
| Separadores  | S355JR   | 355                   | 31,94                       | 11,11                    |

Tabla 18: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad media, suelo arenoso.

### 5.3.2. Velocidad máxima recomendable

#### 5.3.2.1. Suelo limoso

Como indican las tablas 4, 5 y 6, la fuerza aplicada para este caso en los extremos inferiores de cada uno de los cuerpos, es de 8782 N. Este es el caso en el que mayores tensiones se producen, dentro de los estudios con el apero trabajando, ya que, es en el voladizo donde las tensiones son máximas.

En las figuras 106, 107 y 108, se han representado las tensiones máximas de Von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad, respectivamente.

Dentro de los estudios en los que el apero está trabajando, este es el de mayor carga, debido a que el apero está trabajando a velocidad máxima, anchura máxima y profundidad máxima, sobre un suelo duro. Al igual que en el apartado anterior de velocidad media, en este caso la máxima tensión se produce en el cabezal fijo, pero esta es mayor debido a que las cargas aplicadas son mayores, y es aquí donde se produce el coeficiente de seguridad más bajo. En la figura 108 aparecen representadas en color rojo las zonas cuyo coeficiente de seguridad se encuentra por debajo de 3.

En la tabla 19, aparecen reflejadas las máximas tensiones de cada uno de los componentes, así como el factor de seguridad.

| Anchura 1520 mm, Velocidad 8Km/h, Características del suelo: Limoso |          |                       |                             |                           |
|---|----------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Componente  | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coefficiente de seguridad |
| Viga central  | S275JR   | 275                   | 179,65                      | 1,53                      |
| Viga lateral  | S275JR   | 275                   | 148,14                      | 1,86                      |
| Unión viga central-viga lateral-brazo                               | S275JR   | 275                   | 68,6                        | 4,01                      |
| Brazo o cuerpo  | S275JR   | 275                   | 88,46                       | 3,11                      |
| Unión cabezal fijo-viga central                                     | S275JR   | 275                   | 97,54                       | 2,82                      |
| Unión viga lateral-brazo  | S275JR   | 275                   | 84,64                       | 3,25                      |
| Cabezal fijo  | S275JR   | 275                   | 199,65                      | 1,38                      |
| Unión viga lateral-cabezal fijo                                     | S275JR   | 275                   | 103                         | 2,67                      |
| Separadores   | S355JR   | 355                   | 194,65                      | 1,82                      |

Tabla 19: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso.

### 5.3.2.2. Suelo franco

Como indican las tablas 4, 5 y 6, la fuerza aplicada para este caso en los extremos inferiores de cada uno de los cuerpos, es de 3708 N.

En las figuras 109, 110 y 111, se han representado las tensiones máximas de Von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad, respectivamente.

Este caso es igual que el anterior, lo único que varía es la carga aplicada en cada uno de los extremos inferiores de los brazos. Esta carga es menor, con lo cual las tensiones producidas son menores, siendo máxima también en el cabezal fijo. El coeficiente de seguridad es mayor que tres en todos los componentes, excepto en el cabezal fijo.

En la tabla 20, aparecen reflejadas las máximas tensiones de cada uno de los componentes, así como el factor de seguridad.

| Anchura 1520 mm, Velocidad 8Km/h, Características del suelo: Franco |          |                       |                             |                           |
|---|----------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Componente  | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coefficiente de seguridad |
| Viga central  | S275JR   | 275                   | 58,18                       | 4,73                      |
| Viga lateral  | S275JR   | 275                   | 66,9                        | 4,11                      |
| Unión viga central-viga lateral-brazo                               | S275JR   | 275                   | 22,1                        | 12,44                     |
| Brazo o cuerpo  | S275JR   | 275                   | 36,67                       | 7,50                      |
| Unión cabezal fijo-viga central                                     | S275JR   | 275                   | 33,64                       | 8,17                      |
| Unión viga lateral-brazo  | S275JR   | 275                   | 37,71                       | 7,29                      |
| Cabezal fijo  | S275JR   | 275                   | 93,46                       | 2,94                      |
| Unión viga lateral-cabezal fijo                                     | S275JR   | 275                   | 43,22                       | 6,36                      |
| Separadores   | S355JR   | 355                   | 70,5                        | 5,04                      |

Tabla 20: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo franco.

## 5.3.2.3. Suelo arenoso

Como indican las tablas 4, 5 y 6, la fuerza aplicada para este caso en los extremos inferiores de cada uno de los cuerpos, es de 2454 N.

En las figuras 112, 113 y 114, se han representado las tensiones máximas de Von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad, respectivamente.

En este caso, los esfuerzos producidos por la acción de la gravedad son mayores que los producidos por las cargas aplicadas, por lo que las mayores tensiones se producen en la viga central, aunque el coeficiente de seguridad no es menor que tres en ninguno de los componentes.

En la tabla 21, aparecen reflejadas las máximas tensiones de cada uno de los componentes, así como el factor de seguridad.

| Anchura 1520 mm, Velocidad 8Km/h, Características del suelo: Arenoso |          |                       |                             |                         |
|--|----------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Componente   | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coficiente de seguridad |
| Viga central   | S275JR   | 275                   | 67,03                       | 4,10                    |
| Viga lateral   | S275JR   | 275                   | 48,36                       | 5,69                    |
| Unión viga central-viga lateral-brazo                                | S275JR   | 275                   | 12,13                       | 22,67                   |
| Brazo o cuerpo   | S275JR   | 275                   | 24,27                       | 11,33                   |
| Unión cabezal fijo-viga central                                      | S275JR   | 275                   | 32,06                       | 8,58                    |
| Unión viga lateral-brazo   | S275JR   | 275                   | 15,09                       | 18,22                   |
| Cabezal fijo   | S275JR   | 275                   | 65,67                       | 4,19                    |
| Unión viga lateral-cabezal fijo                                      | S275JR   | 275                   | 28,41                       | 9,68                    |
| Separadores  | S355JR   | 355                   | 44,56                       | 7,97                    |

Tabla 21: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo arenoso.

#### 5.4. Conclusiones sobre los diferentes casos analizados

Los casos en los que mayores tensiones se producen, son los casos en los que se ha estudiado el voladizo. Dentro de estos casos, es el de voladizo con anchura mínima el que presenta mayores tensiones. Este comportamiento es debido a que, cuando el apero se encuentra en anchura máxima, la viga central presenta un mayor ángulo, con lo cual la distancia entre la cara paralela empotrada del cabezal fijo al extremo de la viga central es menor, produciendo un menor momento flector. En las figuras 30 y 31, aparecen representadas las longitudes del apero cuando está con anchura máxima y cuando está con anchura mínima, respectivamente.

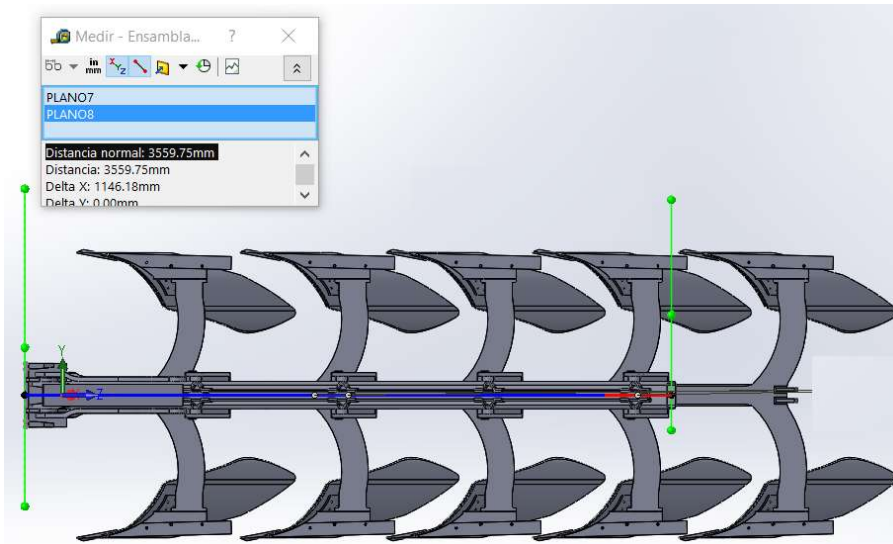


Figura 30: Distancia entre el cabezal fijo y el extremo final de la viga central, con el apero en anchura máxima.

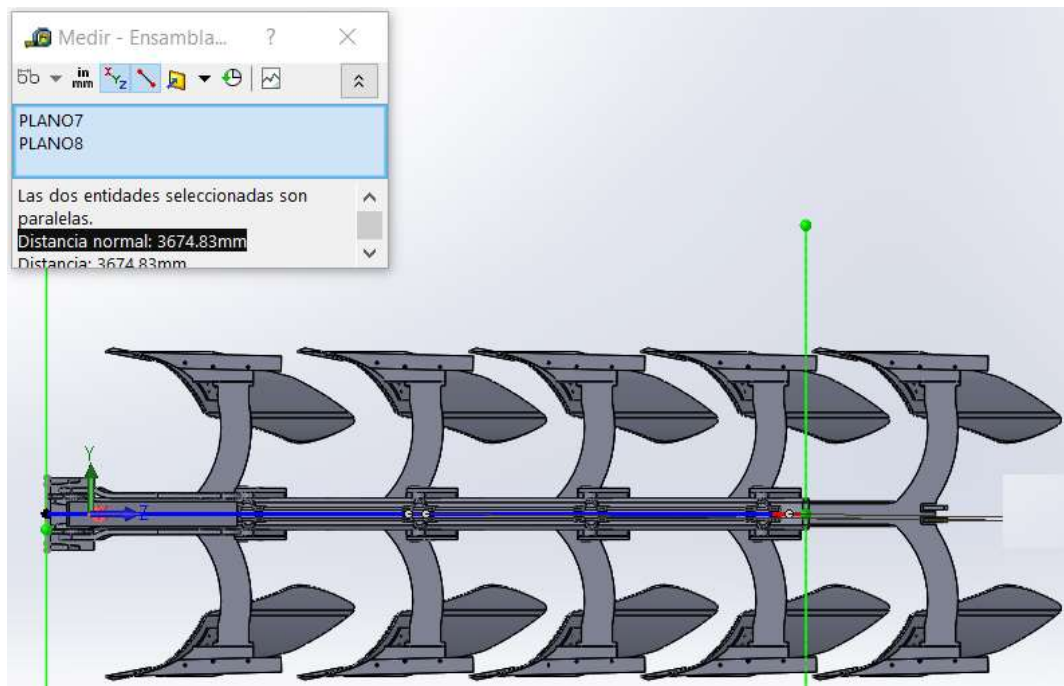


Figura 31: Distancia entre el cabezal fijo y el extremo final de la viga central, con el apero en anchura mínima.



La principal diferencia entre los resultados obtenidos en los estudios con anchura máxima y los resultados obtenidos con anchura mínima, se encuentra en la carga aplicada, ya que, la fuerza que ejerce el suelo sobre el apero, varía en función de la superficie de trabajo, siendo mayor cuanto más anchura posea el apero. También hay que tener en cuenta que, cuando el apero trabaja con anchura máxima, la máxima tensión aparece en el cabezal fijo, y cuando el apero trabaja con anchura mínima, la máxima tensión aparece en los separadores. Este resultado es debido a los momentos flectores que se producen en el cabezal fijo, siendo mayores cuanto más anchura tiene el apero, en las figuras 32 y 33, aparecen reflejadas las distancias entre un plano perpendicular al cabezal fijo que pasa por el centro de este, y un plano paralelo al anterior que pasa por el extremo opuesto de la viga central.

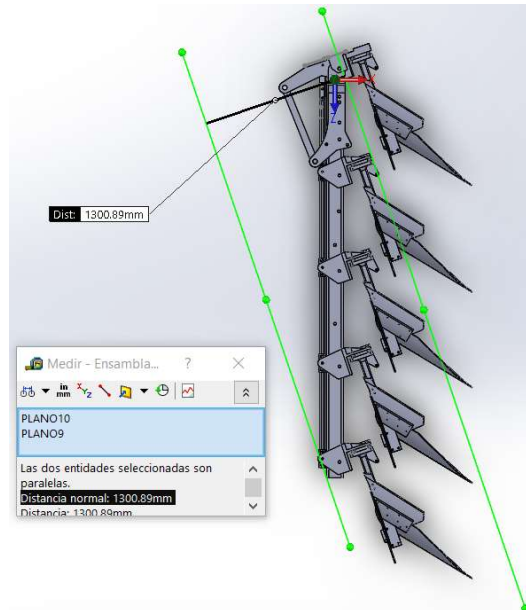


Figura 32: Anchura máxima.

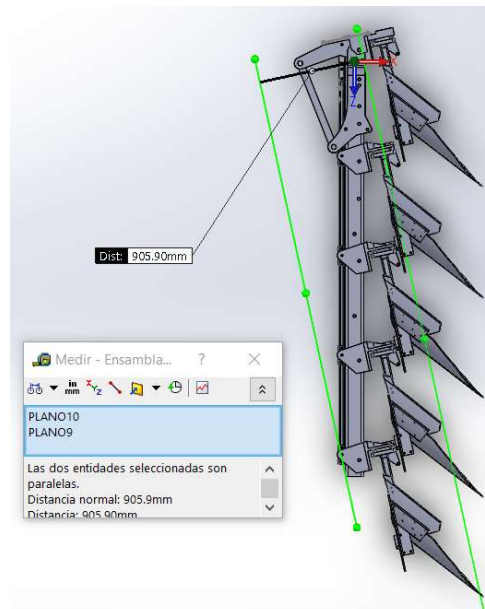


Figura 33: Anchura mínima.

Esa diferencia de distancias es la que hace que se produzca la variación del momento flector en el cabezal fijo, siendo mayor cuanto mayor sea esa distancia. Como se puede observar en la figura 68, cuando el apero se encuentra con anchura máxima, es cuando esta distancia es mayor.

Dentro de los estudios realizados para los diferentes tipos de suelo, existen diferencias entre el suelo franco y el suelo arenoso, siendo las tensiones mayores en el suelo arenoso. Aunque las cargas aplicadas en los extremos inferiores de los brazos sean mayores en el suelo franco, se producen mayores tensiones en el suelo arenoso, debido a que el momento flector producido por la acción de la gravedad prevalece sobre dichas cargas.

## 6. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

### 6.1. Estudios tenidos en cuenta para la optimización

Los estudios que se han tenido en cuenta para la optimización, han sido en los que se han producido mayores tensiones, estos estudios son los siguientes:

- Voladizo con anchura mínima (tabla 22).
- Anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso (tabla 23).

| Anchura 1132 mm, Voladizo             |          |                       |                             |                           |
|---------------------------------------|----------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Componente                            | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coefficiente de seguridad |
| Viga central                          | S275JR   | 275                   | 205,9                       | 1,33                      |
| Viga lateral                          | S275JR   | 275                   | 74,67                       | 3,68                      |
| Unión viga central-viga lateral-brazo | S275JR   | 275                   | 16,15                       | 17,02                     |
| Brazo o cuerpo                        | S275JR   | 275                   | 18,78                       | 14,64                     |
| Unión cabezal fijo-viga central       | S275JR   | 275                   | 119,28                      | 2,31                      |
| Unión viga lateral-brazo              | S275JR   | 275                   | 31,36                       | 8,77                      |
| Cabezal fijo                          | S275JR   | 275                   | 50,65                       | 5,43                      |
| Unión viga lateral-cabezal fijo       | S275JR   | 275                   | 26,17                       | 10,51                     |
| Separadores                           | S355JR   | 355                   | 45,55                       | 7,79                      |

Tabla 22: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, voladizo.

| Anchura 1520 mm, Velocidad 8Km/h, Características del suelo: Limoso |          |                       |                             |                           |
|---|----------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Componente  | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coefficiente de seguridad |
| Viga central  | S275JR   | 275                   | 179,65                      | 1,53                      |
| Viga lateral  | S275JR   | 275                   | 148,14                      | 1,86                      |
| Unión viga central-viga lateral-brazo                               | S275JR   | 275                   | 68,6                        | 4,01                      |
| Brazo o cuerpo  | S275JR   | 275                   | 88,46                       | 3,11                      |
| Unión cabezal fijo-viga central                                     | S275JR   | 275                   | 97,54                       | 2,82                      |
| Unión viga lateral-brazo  | S275JR   | 275                   | 84,64                       | 3,25                      |
| Cabezal fijo  | S275JR   | 275                   | 199,65                      | 1,38                      |
| Unión viga lateral-cabezal fijo                                     | S275JR   | 275                   | 103                         | 2,67                      |
| Separadores   | S355JR   | 355                   | 194,65                      | 1,82                      |

Tabla 23: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso.

Observando estas tablas, se aprecia que los componentes con menor coeficiente de seguridad son la viga central, la viga lateral, el cabezal fijo, la pieza que une el cabezal fijo con la viga central y los separadores.

## 6.2. Optimización variando únicamente el material

En este caso se ha realizado la optimización variando únicamente el material. Los materiales incluidos son el acero S355JR y el DOMEX 500.

En la viga central, viga lateral y cabezal fijo se ha intercambiado el acero S275JR por el DOMEX 500, en los separadores se ha intercambiado el acero S355JR por el DOMEX500 y en la unión cabezal fijo-viga central se ha intercambiado el acero S275JR por en acero S355JR. En las tablas 24 y 25 aparecen reflejados dichos cambios, así como los factores de seguridad antes y después de la optimización.

| Anchura 1520 mm, Velocidad 8Km/h, Características del suelo: Limoso |          |                     |                       |                                  |                             |                           |                                      |
|---|----------|---------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Componente  | Material | Material optimizado | Límite elástico (MPa) | Límite elástico optimizado (Mpa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coefficiente de seguridad | Coefficiente de seguridad optimizado |
| Viga central  | S275JR   | DOMEX500            | 275                   | 500                              | 179,65                      | 1,53                      | 2,78                                 |
| Viga lateral  | S275JR   | DOMEX500            | 275                   | 500                              | 148,14                      | 1,86                      | 3,38                                 |
| Unión viga central-viga lateral-brazo                               | S275JR   |                     | 275                   | 275                              | 68,6                        | 4,01                      | 4,01                                 |
| Brazo o cuerpo  | S275JR   |                     | 275                   | 275                              | 88,46                       | 3,11                      | 3,11                                 |
| Unión cabezal fijo-viga central                                     | S275JR   | S355JR              | 275                   | 355                              | 97,54                       | 2,82                      | 3,64                                 |
| Unión viga lateral-brazo  | S275JR   |                     | 275                   | 275                              | 84,64                       | 3,25                      | 3,25                                 |
| Cabezal fijo  | S275JR   | DOMEX500            | 275                   | 500                              | 199,65                      | 1,38                      | 2,50                                 |
| Unión viga lateral-cabezal fijo                                     | S275JR   |                     | 275                   | 275                              | 103                         | 2,67                      | 2,67                                 |
| Separadores   | S355JR   | DOMEX500            | 355                   | 500                              | 194,65                      | 1,82                      | 2,57                                 |

Tabla 24: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso, Tras la optimización.

| Anchura 1132 mm, Voladizo             |          |                     |                       |                                  |                             |                           |                                      |
|---------------------------------------|----------|---------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Componente                            | Material | Material optimizado | Límite elástico (MPa) | Límite elástico optimizado (Mpa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Coefficiente de seguridad | Coefficiente de seguridad optimizado |
| Viga central                          | S275JR   | DOMEX500            | 275                   | 500                              | 205,9                       | 1,34                      | 2,43                                 |
| Viga lateral                          | S275JR   | DOMEX500            | 275                   | 500                              | 74,67                       | 3,68                      | 6,70                                 |
| Unión viga central-viga lateral-brazo | S275JR   |                     | 275                   | 275                              | 16,15                       | 17,03                     | 17,03                                |
| Brazo o cuerpo                        | S275JR   |                     | 275                   | 275                              | 18,78                       | 14,64                     | 14,64                                |
| Unión cabezal fijo-viga central       | S275JR   | S355JR              | 275                   | 355                              | 119,28                      | 2,31                      | 2,98                                 |
| Unión viga lateral-brazo              | S275JR   |                     | 275                   | 275                              | 31,36                       | 8,77                      | 8,77                                 |
| Cabezal fijo                          | S275JR   | DOMEX500            | 275                   | 500                              | 50,65                       | 5,43                      | 9,87                                 |
| Unión viga lateral-cabezal fijo       | S275JR   |                     | 275                   | 275                              | 26,17                       | 10,51                     | 10,51                                |
| Separadores                           | S355JR   | DOMEX500            | 355                   | 500                              | 45,55                       | 7,79                      | 10,98                                |

Tabla 25: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, voladizo, Tras la optimización.

Con esta variación del material aumentan de manera considerable los factores de seguridad, pero aun así es necesaria una variación en la forma de los componentes para eliminar concentradores de tensiones y poder reducir los picos de tensión que aparecen.

### 6.3. Optimización variando componentes

#### 6.3.1. Viga central

Para la optimización de la viga central, se ha tenido en cuenta tanto el estudio del voladizo, como el estudio del apero trabajando, ya que, es un componente cuyo factor de seguridad está próximo a 1 en ambos casos.

Este componente se ha optimizado de manera que se reduzcan las tensiones que se producen próximas a su unión con el cabezal fijo, ya que es en estos puntos donde mayores tensiones se producen, debido a la gran longitud que dicha viga posee.

En primer lugar, se ha realizado un redimensionamiento del espesor, variándolo de 6.5mm a 10mm (figura 34). Esta acción hace que la viga central sea más rígida, pero no es suficiente, ya que, al aumentar su espesor, también aumenta su peso. Este aumento de peso, bajo la acción de la gravedad, genera momentos flectores mayores. Aunque estos momentos flectores sean mayores, las tensiones producidas en la viga son menores debido a su mayor rigidez.

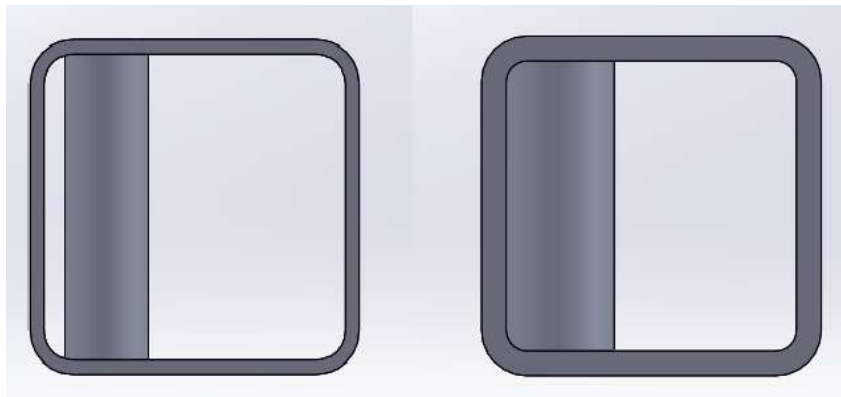


Figura 34: Espesor viga central, 6.5mm (izquierda) 10 mm (derecha).

Para solucionar este problema, se ha creado una nueva pieza (figura 35) y se ha colocado en el interior de la viga central, tanto en la parte superior, como en la parte inferior (figura 36), del extremo más próximo al cabezal fijo. La función de esta pieza es aportar rigidez a la viga central solo en el extremo más próximo al cabezal fijo, ya que es la parte que mayores tensiones experimenta.

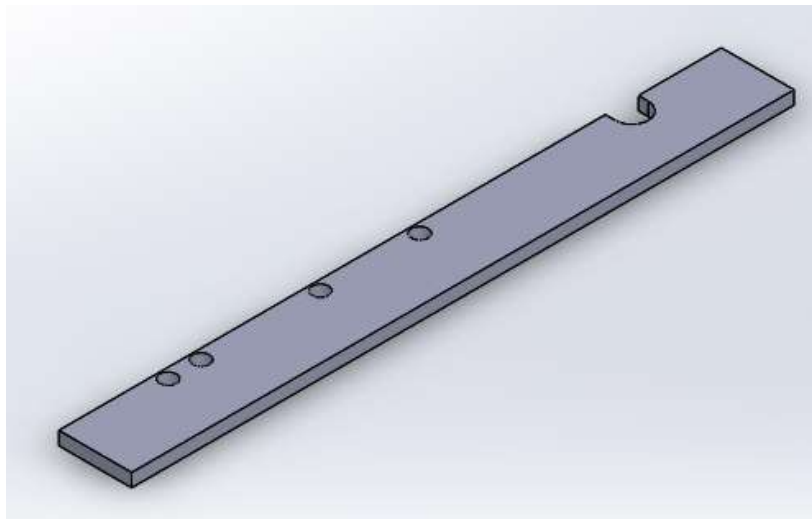


Figura 35: Refuerzo viga central (1000x110x20mm)

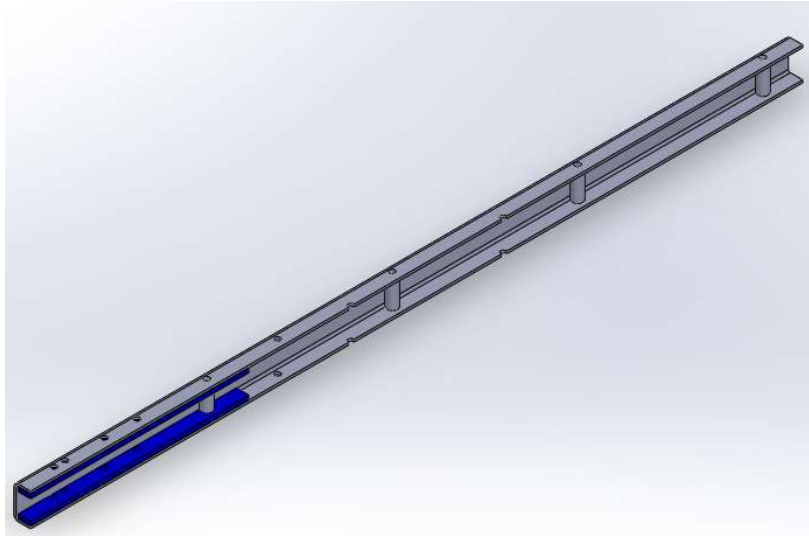


Figura 36: Posicionamiento refuerzo viga central.

### 6.3.2. Viga lateral

Para la optimización de la viga lateral, la mejor opción sería instalar una viga con sección variable, siendo mayor en las proximidades del cabezal fijo, ya que los esfuerzos de compresión de cada uno de los brazos se van transmitiendo gradualmente a la viga lateral conforme nos acercamos al cabezal fijo. Esta opción tendría un alto coste, por lo que se ha optado por redimensionar el espesor de la viga, variándolo desde 5mm a 8mm (figura 37) y manteniendo la sección uniforme, para aportar una mayor rigidez y así, disminuir las tensiones en dicha viga.

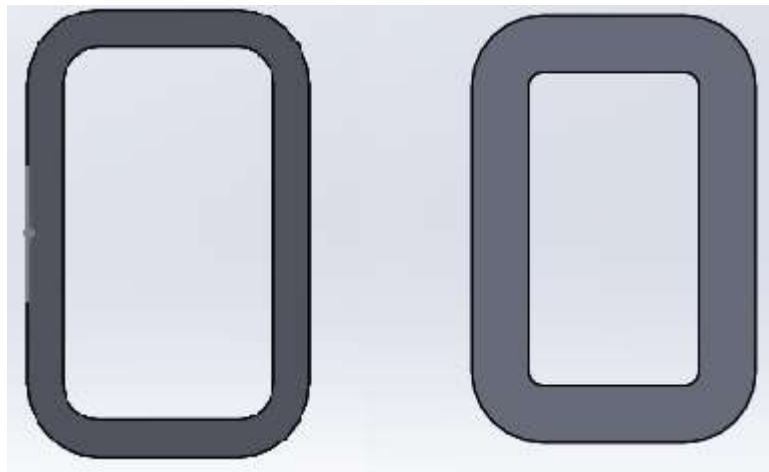


Figura 37: Espesor viga lateral, 5mm (izquierda) 8 mm (derecha).

### 6.3.3. Cabezal fijo

En este caso, las mayores tensiones aparecen en las uniones de las orejetas con el cuerpo del cabezal fijo, como se muestra en la figura 38 señaladas con un círculo rojo.

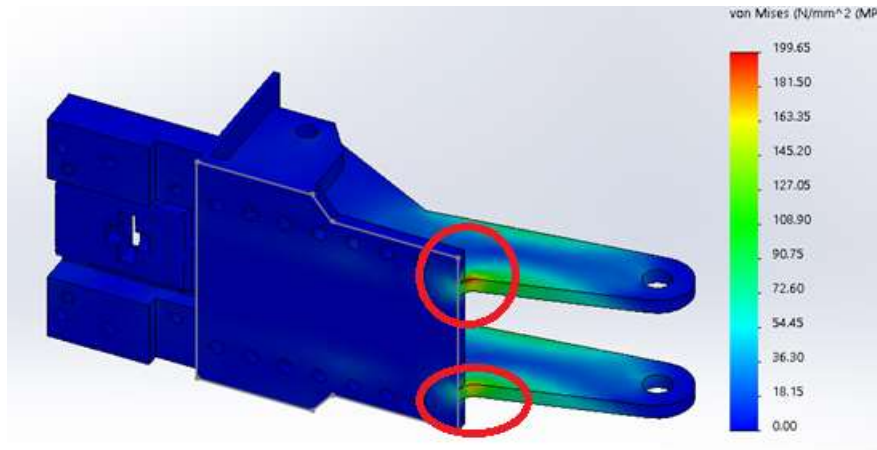


Figura 38: Puntos críticos del cabezal fijo.

Estas zonas actúan como concentradores de tensiones, ya que, se reduce el espesor de manera considerable. En primer lugar, se ha aumentado el espesor de cada una de las orejetas 3mm, aprovechando en máximo espacio posible (figura 39) y después se ha suavizado la unión para evitar que se produzcan concentraciones de tensiones (figura 40).

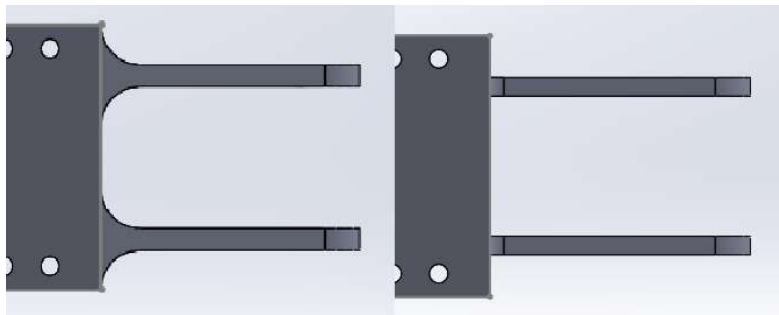


Figura 39: Espesor orejetas cabezal fijo, 23mm (izquierda) 20 mm (derecha).

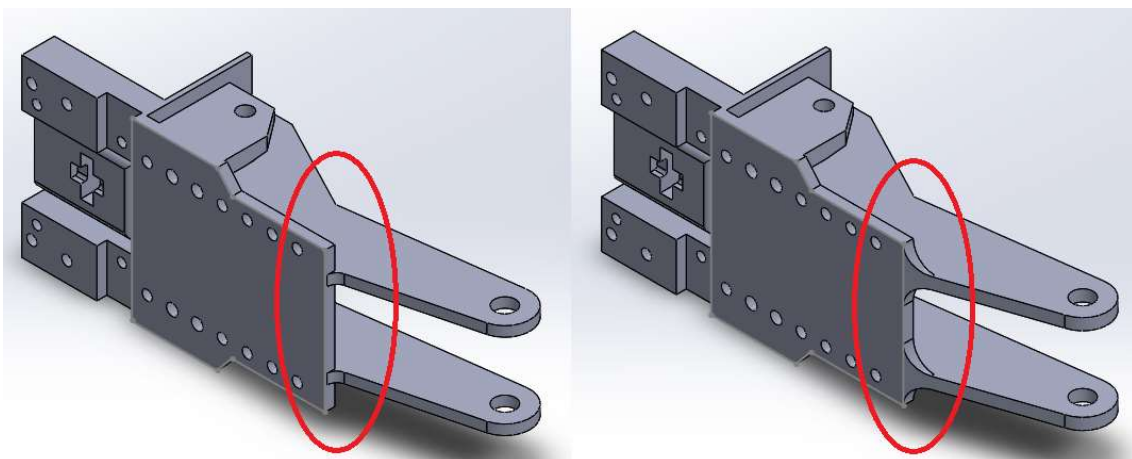


Figura 40: Suavizado de la unión de las orejetas.

#### 6.3.4. Unión cabezal fijo-viga central

Al igual que la viga central, este componente experimenta las máximas tensiones cuando el tractor agrícola transporta el apero de parcela a parcela, es decir, cuando el apero se encuentra en voladizo. Para optimizar este componente se optó por aumentar el espesor, de 25 mm a 30 mm, (figura 41) para aumentar su rigidez, además se le han realizado dos taladros adicionales (figura 42) para que las tensiones se distribuyan más uniformemente sobre la parte con mayores tensiones y se ha sustituido el material por acero estructural S355JR.



Figura 41: Espesor unión cabezal fijo-viga central, 25mm (arriba) 30mm (abajo).

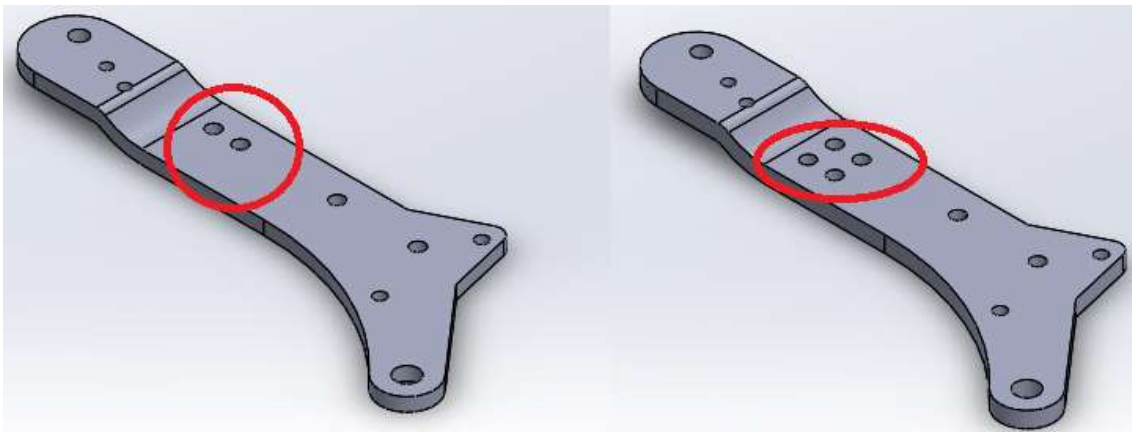


Figura 42: Unión cabezal fijo-viga central, Taladros para distribución de tensiones.

#### 6.3.5. Separadores

En este caso, no se han realizado modificaciones sobre el componente, ya que, requieren esa forma para hacer de “amortiguadores” en caso de que el apero colisionara con algún obstáculo más duro, y así, impedir que el brazo se rompiera.

La optimización que se ha llevado a cabo, ha sido colocar entre ambas piezas, tres separadores más (figura 43) para permitir que las tensiones se distribuyan entre todos, y así, reducir las, haciendo que el factor de seguridad sea un poco más alto.



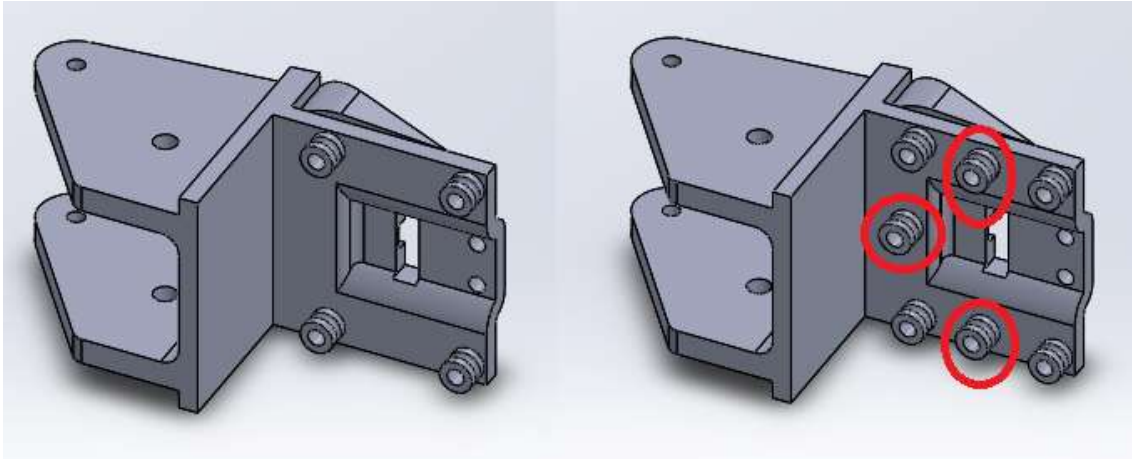


Figura 43: Separadores añadidos para distribución de tensiones.

#### 6.4. Resultados de la optimización con variación en los componentes

Tras la optimización, se han vuelto a realizar los estudios de los casos más desfavorables citados anteriormente, obteniendo las tensiones, los desplazamientos y el factor de seguridad. Dichos resultados se han recopilado en tablas donde se expresa, tanto los resultados antes de la optimización, como los resultados después de la optimización.

Tras la optimización el peso del apero ha aumentado hasta los 1387 Kg. El incremento de peso que supone esta optimización es de 87 Kg.

##### 6.4.1. Voladizo

En las figuras 44, 45 y 46 aparecen reflejadas las tensiones, los desplazamientos y el factor de seguridad, respectivamente, después del proceso de optimización.

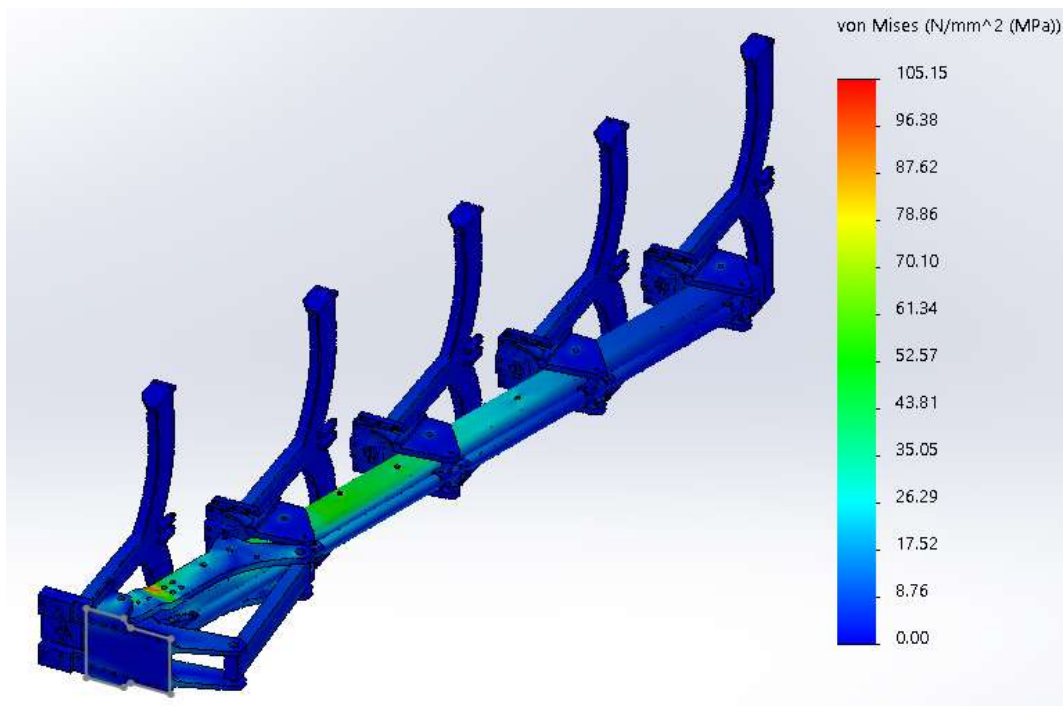


Figura 44: Tensión máxima de Von Mises, anchura mínima, voladizo, Tras la optimización.

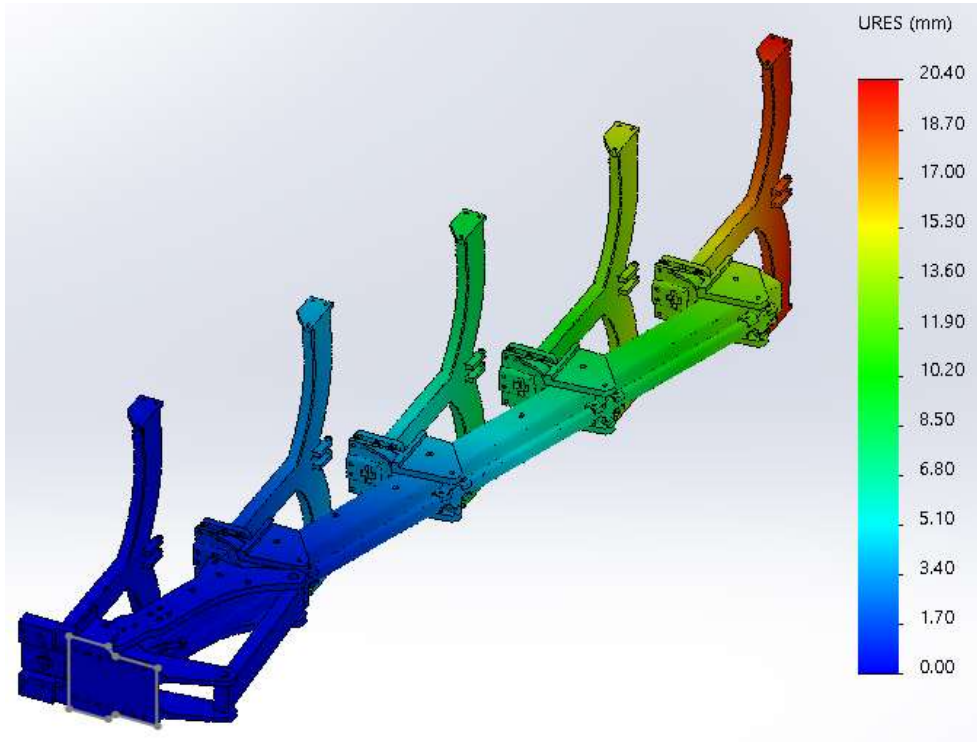


Figura 45: Desplazamientos, anchura mínima, voladizo, Tras la optimización.

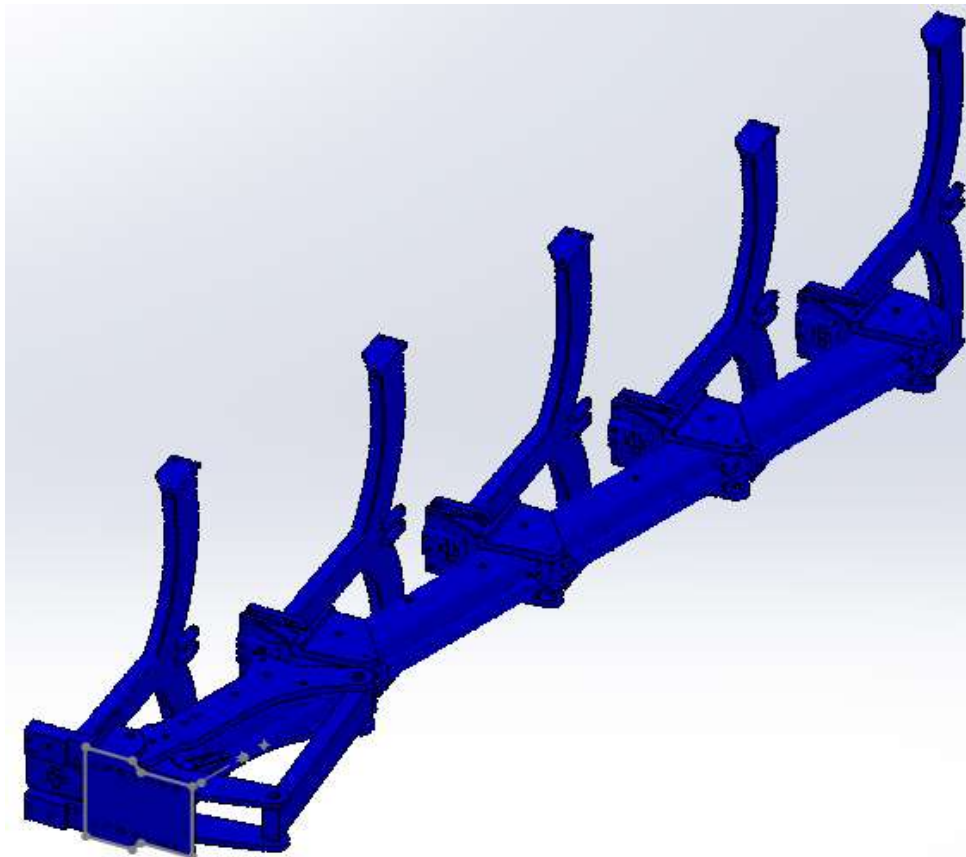


Figura 46: Factor de seguridad, anchura mínima, voladizo, Tras la optimización.

En este caso, mediante la optimización de los componentes citados anteriormente, se ha conseguido reducir las tensiones casi a la mitad, incrementando en factor de seguridad por encima de tres en todos los componentes.

En la tabla 26, se han recogido los valores de tensión antes y después de la optimización, así como, los valores del factor de seguridad.

| Anchura 1132 mm, Voladizo             |          |                       |                             |  |                           |                                      |
|---------------------------------------|----------|-----------------------|-----------------------------|--|---------------------------|--------------------------------------|
| Componente                            | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Tensión máxima de V.M Optimizado (MPa) | Coefficiente de seguridad | Coefficiente de seguridad Optimizado |
| Viga central                          | S275JR   | 275                   | 205,9                       | 91,35                                  | 1,34                      | 3,01                                 |
| Viga lateral                          | S275JR   | 275                   | 74,67                       | 27,37                                  | 3,68                      | 10,05                                |
| Unión viga central-viga lateral-brazo | S275JR   | 275                   | 16,15                       | 13,41                                  | 17,03                     | 20,51                                |
| Brazo o cuerpo                        | S275JR   | 275                   | 18,78                       | 15,31                                  | 14,64                     | 17,96                                |
| Unión cabezal fijo-viga central       | S355JR   | 355                   | 119,28                      | 105,15                                 | 2,31                      | 3,38                                 |
| Unión viga lateral-brazo              | S275JR   | 275                   | 31,36                       | 23,34                                  | 8,77                      | 11,78                                |
| Cabezal fijo                          | S275JR   | 275                   | 50,65                       | 45,34                                  | 5,43                      | 6,07                                 |
| Unión viga lateral-cabezal fijo       | S275JR   | 275                   | 26,17                       | 21,67                                  | 10,51                     | 12,69                                |
| Separadores                           | S355JR   | 355                   | 45,55                       | 30,07                                  | 7,79                      | 11,81                                |

Tabla 26: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, voladizo, Tras la optimización.

#### 6.4.2. Anchura máxima, velocidad máxima y suelo limoso

En las figuras 47, 48 y 49 aparecen reflejadas las tensiones, los desplazamientos y el factor de seguridad, respectivamente, después del proceso de optimización.

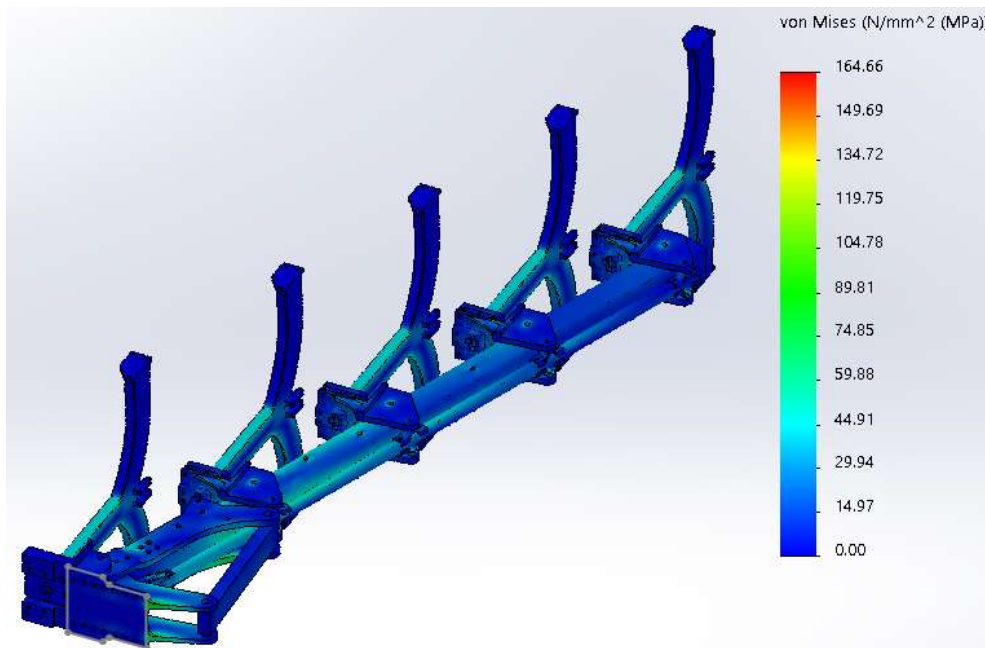


Figura 47: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso, Tras la optimización.

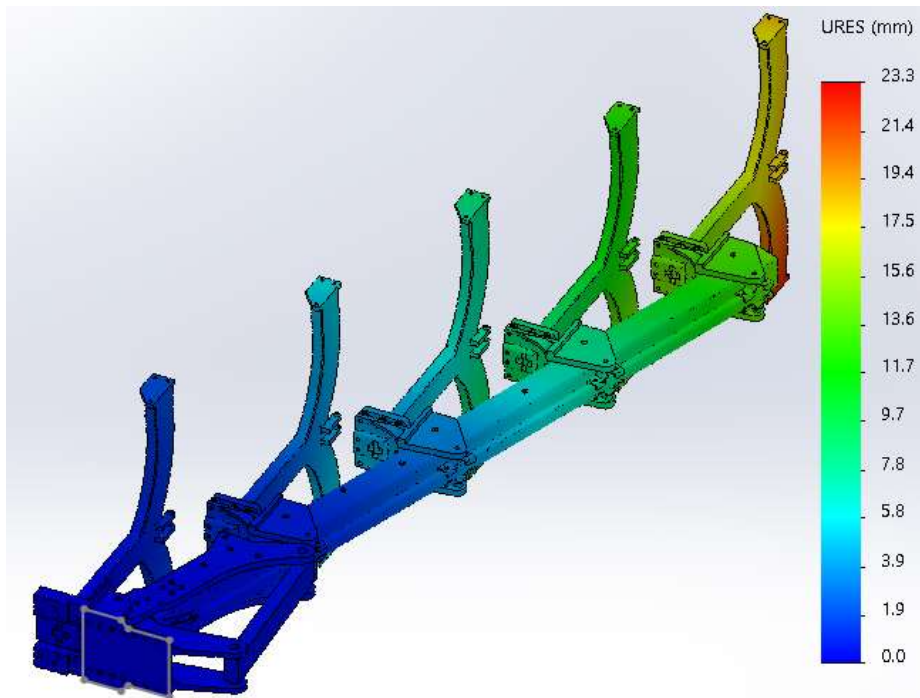


Figura 48: Desplazamientos, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso, Tras la optimización.

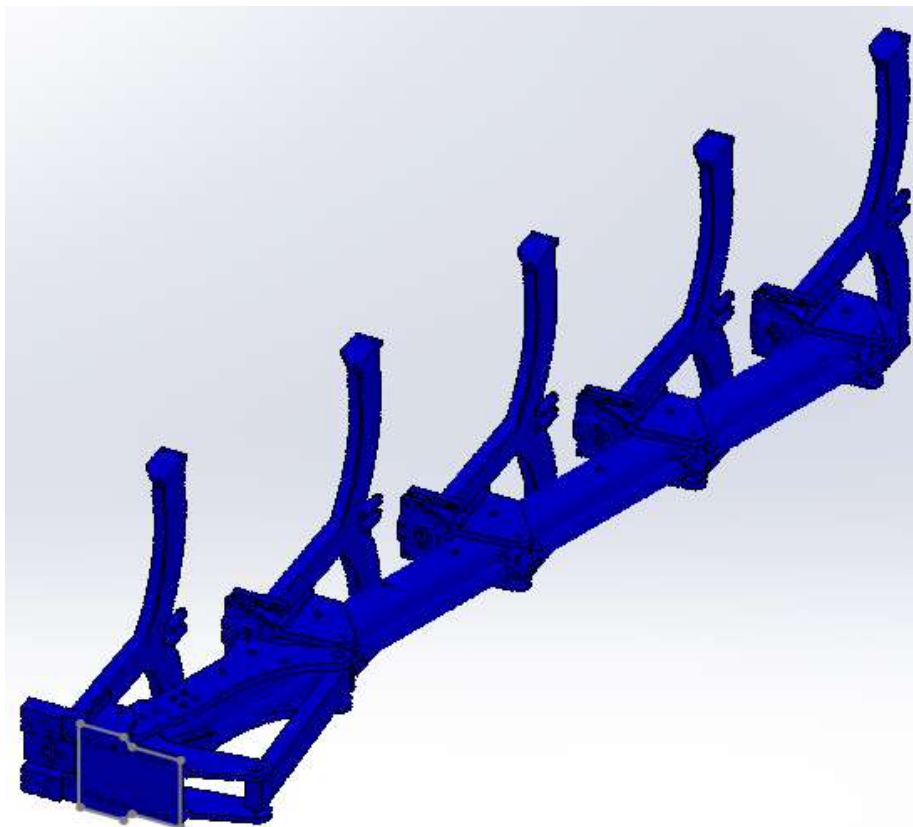


Figura 49: Factor de seguridad, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso, Tras la optimización.

Con la optimización realizada en los componentes citados anteriormente, se ha conseguido reducir notablemente la tensión, pero, aun así, el coeficiente de seguridad, aunque algo mayor, no se ha conseguido aumentar por encima de tres.

En la tabla 27, se han recogido los valores de tensión antes y después de la optimización, así como, los valores del factor de seguridad.

| Anchura 1520 mm, Velocidad 8Km/h, Características del suelo: Limoso |          |                       |                             |  |                           |                                      |
|---|----------|-----------------------|-----------------------------|--|---------------------------|--------------------------------------|
| Componente  | Material | Límite elástico (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) | Tensión máxima de V.M (MPa) Optimizado | Coefficiente de seguridad | Coefficiente de seguridad Optimizado |
| Viga central  | S275JR   | 275                   | 179,65                      | 92,02                                  | 1,53                      | 2,99                                 |
| Viga lateral  | S275JR   | 275                   | 148,14                      | 87,46                                  | 1,86                      | 3,14                                 |
| Unión viga central-viga lateral-brazo                               | S275JR   | 275                   | 68,6                        | 65,55                                  | 4,01                      | 4,20                                 |
| Brazo o cuerpo  | S275JR   | 275                   | 88,46                       | 88,95                                  | 3,11                      | 3,09                                 |
| Unión cabezal fijo-viga central                                     | S355JR   | 355                   | 97,54                       | 74,48                                  | 3,64                      | 4,77                                 |
| Unión viga lateral-brazo  | S275JR   | 275                   | 84,64                       | 85,44                                  | 3,25                      | 3,22                                 |
| Cabezal fijo  | S275JR   | 275                   | 199,65                      | 113,71                                 | 1,38                      | 2,42                                 |
| Unión viga lateral-cabezal fijo                                     | S275JR   | 275                   | 103                         | 90,11                                  | 2,67                      | 3,05                                 |
| Separadores   | S355JR   | 355                   | 194,65                      | 164,66                                 | 1,82                      | 2,16                                 |

Tabla 27: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso, Tras la optimización.

## 7. CONCLUSIONES

En el estudio realizado se ha analizado y optimizado el diseño del chasis de un arado de vertedera de cinco cuerpos, reversible y con capacidad de variar su anchura para obtener una mayor labor por pasada, y así, economizar tiempo.

El modelo inicial ha sido diseñado en función de las dimensiones de un arado de vertedera real, marca Kverneland, modelo ES, tipo KKES-85-200, año 2014.

En el proceso de análisis y optimización se han empleado técnicas numéricas basadas en el MEF (Método de Elementos Finitos). Mediante estas técnicas, se han obtenido resultados de tensión equivalente de Von Mises, desplazamientos y factor de seguridad, las cuales han permitido optimizar el chasis según criterios de resistencia y rigidez.

En este proyecto se han analizado 14 casos de carga, voladizo con anchura máxima, voladizo con anchura mínima, apero agrícola trabajando a máxima profundidad con máxima anchura y con velocidad media y máxima recomendable, según tres tipos de suelo (limoso, franco y arenoso) y apero agrícola trabajando a máxima profundidad con mínima anchura y con velocidad media y máxima recomendable, según tres tipos de suelo (limoso, franco y arenoso).

Una vez obtenidos y analizados los resultados, se ha observado, que las mayores tensiones han aparecido en los casos de voladizo con anchura mínima y apero trabajando con anchura máxima a velocidad máxima recomendable en suelo limoso. Las máximas tensiones han aparecido en la viga central, viga lateral, cabezal fijo, unión entre cabezal fijo-viga central y en los separadores. Estos componentes son los que se han optimizado para reducir las tensiones y aumentar su coeficiente de seguridad.

La optimización por excelencia que se ha realizado ha sido el aumento del espesor, para conseguir aumentar la rigidez del componente. Esta optimización se ha aplicado a componentes como la viga central, viga lateral y la unión entre el cabezal fijo-viga central. Una buena opción tanto para la viga central como para la viga lateral, sería fabricarlas con sección variable, ya que los esfuerzos que en ellas se producen se van sumando gradualmente conforme se unen los brazos a dichas vigas, pero la fabricación de este tipo de vigas sería más compleja y costosa. Este fenómeno se puede observar en la figura 88, donde se aprecia perfectamente que las tensiones aumentan conforme nos acercamos al cabezal fijo. La optimización que se ha llevado a cabo para el cabezal fijo ha sido el suavizado del concentrador de tensiones que existe entre las orejetas y el cuerpo del cabezal fijo, ya que, al tener una esquina sin redondear aparecía un pico de tensión en ese punto. Para el caso de los separadores se ha tenido en cuenta la imposibilidad de variar su forma, con lo cual se he optado por incluir un mayor número de separadores para distribuir de manera más uniforme las tensiones sobre estos.

En cuanto a los casos de voladizo con anchura máxima y voladizo con anchura mínima, cabe destacar, que se producen mayores tensiones en el voladizo con anchura mínima. Este efecto es debido a que cuando el apero se encuentra con anchura mínima, la distancia entre el cabezal fijo y la parte posterior de la viga es mayor, produciendo un momento flector mayor en dicha viga, lo que genera unas tensiones ligeramente más elevadas. Tras la optimización, se observa que los valores de máximos de tensión que se generan en el chasis del arado se reducen prácticamente a la mitad, este resultado se produce gracias a la alta rigidez que aportan a la viga central las dos piezas introducidas en el interior de ella (figura 36)

Con respecto a los casos de carga cuando el apero está trabajando, hay que hacer referencia a que, cuando el apero trabaja con anchura máxima las mayores tensiones se producen en el cabezal fijo, mientras que cuando el apero trabaja con anchura mínima las máximas tensiones se producen en los separadores. Este efecto es producido por la variación que se produce en la aplicación de las

cargas, generando mayor momento flector en el cabezal fijo, cuando el apero trabaja con anchura máxima (figura 32 y 33).

Otro de los resultados que hay que tener en cuenta, es la diferencia de tensiones en los casos de carga con suelo franco y suelo arenoso, siendo las tensiones mayores en los casos de carga con suelo arenoso. Esto es debido a que, en el caso de carga con suelo arenoso, es más relevante el momento flector ocasionado por la acción de la gravedad, que los esfuerzos generados por la carga aplicada en los extremos inferiores de cada uno de los brazos.

Tras la optimización, se han conseguido disminuir las tensiones en los componentes con mayor carga, elevando el factor de seguridad por encima de tres, excepto en los separadores, aunque este se ha aumentado considerablemente.

En definitiva, se han conseguido disminuir las tensiones que se producen en el arado, sin aumentar de manera considerable su peso, que ha pasado de pesar 1300 Kg a 1387Kg. Este pequeño aumento de peso no supone ninguna limitación para el vehículo agrícola a la hora de levantarlo.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Boto Fidalgo, Juan Antonio. (2000) *La mecanización agraria*. Ediciones Universidad de León.
- Ortiz Cañavate, Jaime. (1993) *Las máquinas agrícolas y su aplicación*. Mundi-Prensa.
- Kverneland. (2007) *Manual de instrucciones, Modelo ES/LS*. Kverneland group.
- Kverneland. (2007) *ES/LS/LD – ploughs Assembly manual: Hydraulic layout headstock 200*. Kverneland group. Kverneland group.
- Kverneland. (2007) *ES - Spare parts list Mounted plough*. Kverneland group.
- Gil, Emilio. *Tractor, preparación del suelo y siembra*. Escola Superior D'Agricultura de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya.  
<http://ocw.upc.edu/download.php?file=15013050/28064-3822.pdf>
- Porras Piedra, Andrés; Soriano Martín, María Luisa. *Manejo del suelo*. Escuela de Ingenieros Agrónomos de Ciudad Real (U. C. L. M.).  
<http://www.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/tfcaps1/pdf/TEMA3.pdf>
- Sáez Descalzo, Juan. *Aperos, aparejos y otras herramientas de antaño propias de la agricultura de cenizate*.  
[http://www.dipualba.es/municipios/cenizate/cultura/zenizate\\_3\\_3.pdf](http://www.dipualba.es/municipios/cenizate/cultura/zenizate_3_3.pdf)
- Márquez, Luis. (2000) *Arados de vertedera: evolución y componentes esenciales*. Agrotec.  
[http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf\\_Agrotec/Agrotec\\_2000\\_7\\_48\\_55.pdf](http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_Agrotec/Agrotec_2000_7_48_55.pdf)
- Márquez, Luis. (2000) *Arados de vertedera: regulación y utilización racional*. Agrotec.  
[http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf\\_Agrotec%2FAgrotec\\_2000\\_8\\_36\\_43.pdf](http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_Agrotec%2FAgrotec_2000_8_36_43.pdf)
- García Ramos, F; Boné Garasa, A. (2008) *Principales regulaciones de los arados de vertedera*. MAQ VR.  
[http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf\\_Vrural%2FVrural\\_2008\\_262E\\_58\\_62.pdf](http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_Vrural%2FVrural_2008_262E_58_62.pdf)
- Catalogo Kverneland.  
<http://es.kverneland.com/Laboreo/Arados/Arados-Reversibles-Suspendidos/Kverneland-LD>
- Implementos agrícolas: arados de disco y de vertedera. UCSM.  
<http://www.vidarural.es/articulos-maquinaria-y-equipos-para-laboreo-minimo-y-convencional/1/374.html>



- Carrasco, Jorge; Riquelme, Jorge. *Aradura convencional: Arados de vertedera y disco*. <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR29544.pdf>

## ANEXO A: ARADOS DE VERTEDERA ANTIGUOS

### A.1. Arado de timón

Arado arrastrado por dos caballerías, cuyo objetivo era exactamente el mismo que el de los arados de vertedera modernos. Tiene, junto a la base de la reja y a ambos lados de la misma, dos orejeros para ensanchar el surco. El timón del arado está formado por la rastra y el renco, unidos por medio de dos abrazaderas. La rastra es la parte extrema terminal que tiene unos agujeros donde se introduce una clavija llamada lavija. El renco es la parte del timón a la que va unida la cama del arado. Finalmente, la varijá es una barra de hierro con un ensanche en uno de sus extremos y un puño para aislarla en el otro, sirve para llevar firme el arado y poder limpiarlo en caso de que la tierra se quede adherida a él. En la figura 50 se puede observar cada una de las partes del arado de timón.

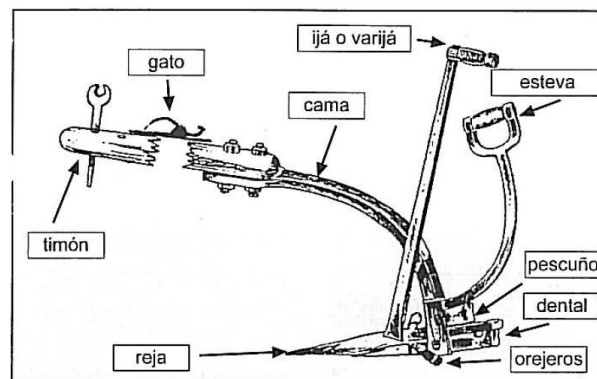


Figura 50: Arado de timón.

### A.2. Arado de vertedera antiguo

Arado arrastrado también por dos caballerías, pero en vez de tener orejeras para ensanchar el surco, tiene junto a la reja una cuchilla y una hoja que cumplen con la misma función, además de dos manezuelas convexas llamadas estevas, acabadas en sendos mangos a los que se agarra con las manos el labrador. Por el extremo contrario, ambas estevas convergen en el cuerpo del arado, que es una pieza rectangular de hierro que da consistencia a la esteva, a la cama y a la reja. La cuchilla se encuentra cerca del extremo agudo de la reja y sobre la misma. La cuchilla y la reja sirven para abrir el surco, unida a la cuchilla se encuentra la hoja, cuya misión es ensanchar el surco. Este arado servía para labrar los rastrojos (situación en que se encuentra el suelo una vez que se ha cosechado). En la figura 51 se puede observar el arado de vertedera antiguo.

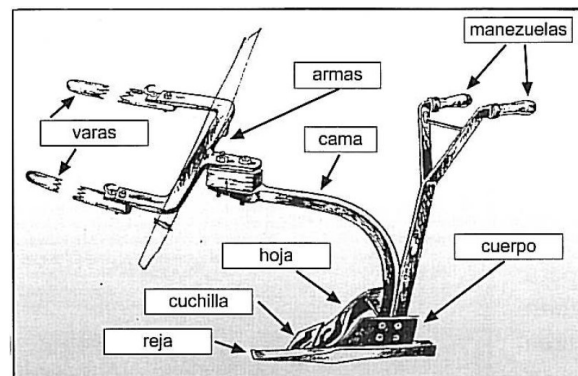


Figura 51: Arado de vertedera antiguo.

### A.3. Arado de garabato

Este arado es igual que el anterior, la única diferencia es que este es arrastrado por un solo animal, por lo que, en vez del timón ordinario, tiene dos timoncillos que arrancan del horcajao. La forma del horcajao es muy parecida a un arco rebajado, por cuyo centro se unía a la cama y por sus dos extremos a los mencionados timoncillos, en medio de los cuales se encuentra la caballería. El resto de disposición es igual al arado de vertedera antiguo y, por tanto, tiene dos estevas.

### A.4. Bernete

Arado muy parecido al de vertedera, pero de menor tamaño, con una ballestilla en lugar de timón, a la que se le engancha el animal. A veces, lleva en su parte inferior y perpendicular a los ejes del timón y de la esteva, unas cuchillas de cierta envergadura que servían para eliminar la hierbecilla de la viña y dejar la tierra medianamente lisa. También solía llevar una rueda para transportarlo al campo cuando no se disponía de carro. Su uso era exclusivo en viñedos.



Figura 52: Bernete.

### A.5. Arado rusá

Arado similar al de vertedera, que poseía una rueda para ejercer mayor peso y que el arado trabajara más uniformemente.



Figura 53: Arado rusá.

## ANEXO B: COMPONENTES DEL MODELO

### B.1. Componentes del chasis

#### B.1.1 Viga Central

La viga central es la parte del arado a la que van unidos cada uno de los brazos, sirve de unión entre los brazos y el cabezal fijo. En la figura 54 se encuentra representada en color azul.

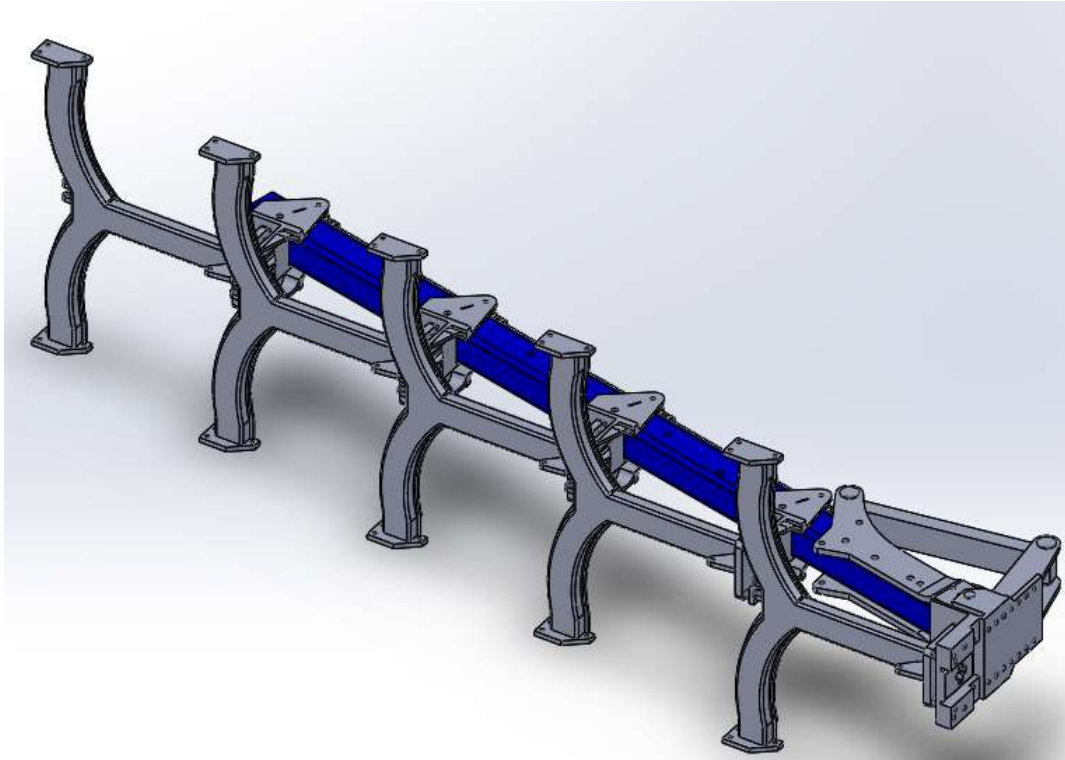


Figura 54: Viga central.

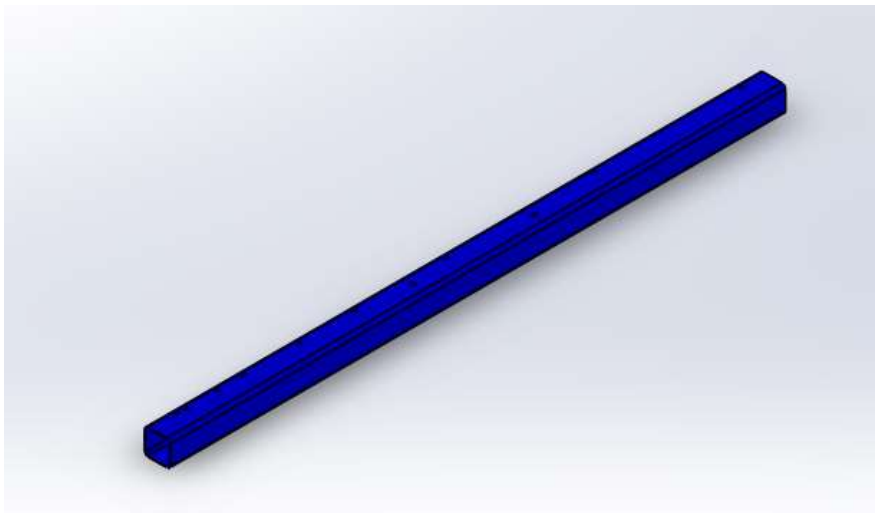


Figura 55: Viga central aislada.

## B.1.2. Viga lateral

A esta viga también van unidos cada uno de los brazos, y junto con el cabezal permite que el arado de vertederas varíe su anchura. En la figura 56 se encuentra representada en color azul.

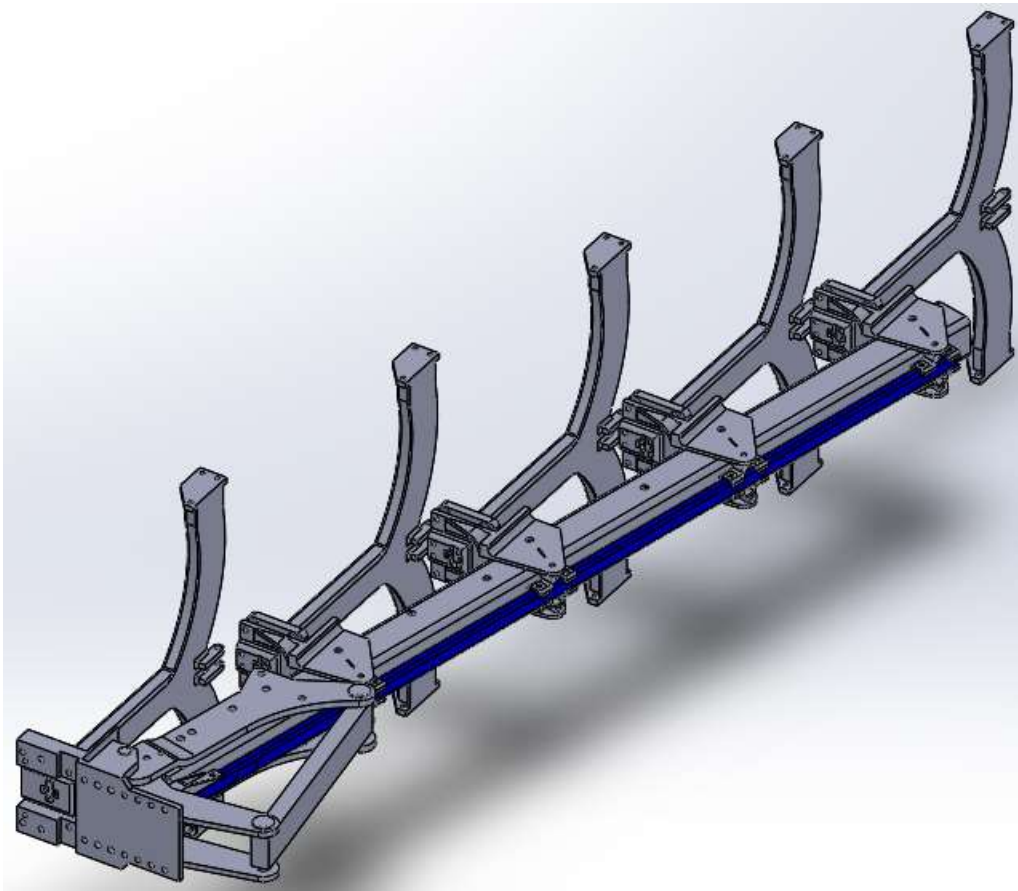


Figura 56: Viga lateral.

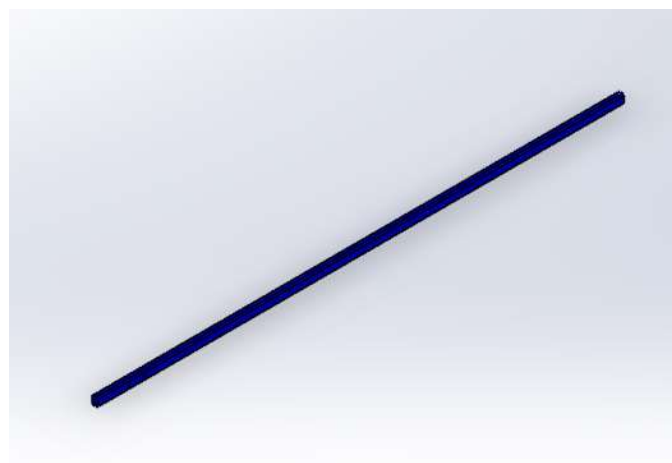


Figura 57: Viga lateral aislada.

### B.1.3. Unión viga central-viga lateral-brazo

Parte del chasis, cuya función es, tanto fijar los brazos al chasis, como permitir que el arado varíe su anchura. En la figura 58 se encuentran representadas en azul, y en la figura 59 aparece una vista más detallada de este componente.

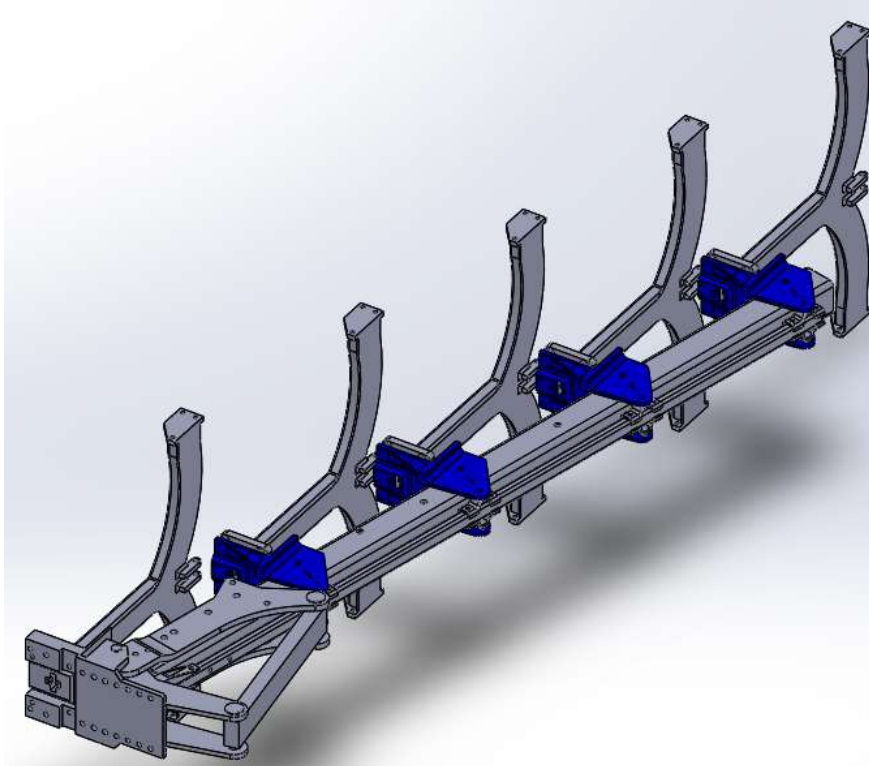


Figura 58: Unión viga central-viga lateral-brazo.

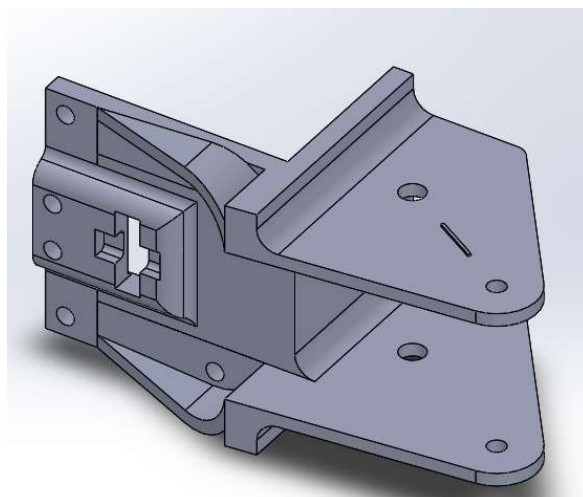


Figura 59: Unión viga central-viga lateral-brazo vista detallada

#### B.1.4. Brazo o cuerpo

Parte del chasis, en la cual van alojados los conjuntos reja-vertedera, dos por brazo, uno en la parte inferior y otro en la parte superior. En la figura 60 se encuentran representadas en azul, y en la figura 61 se encuentra representado el conjunto reja-vertedera unido al brazo.

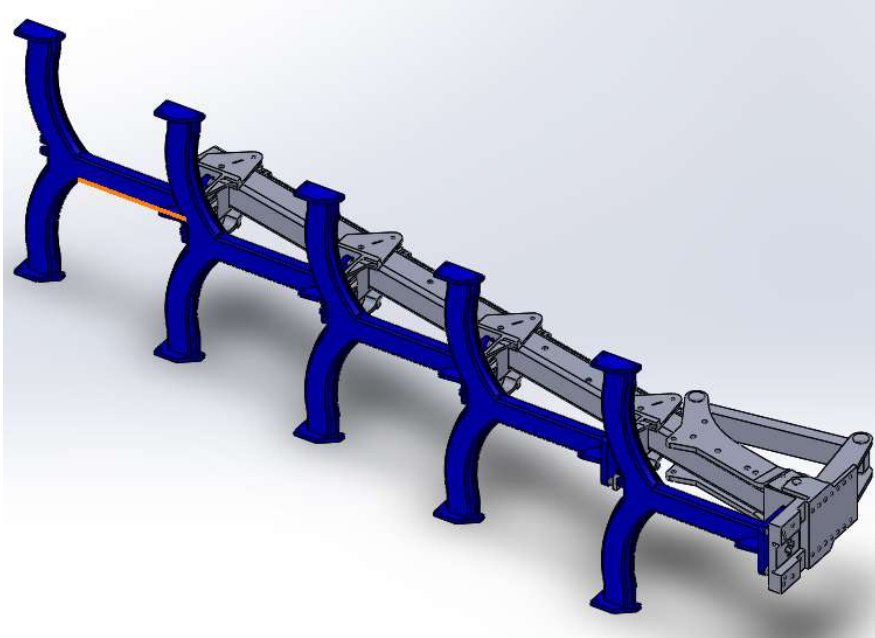


Figura 60: Cuerpos del arado.

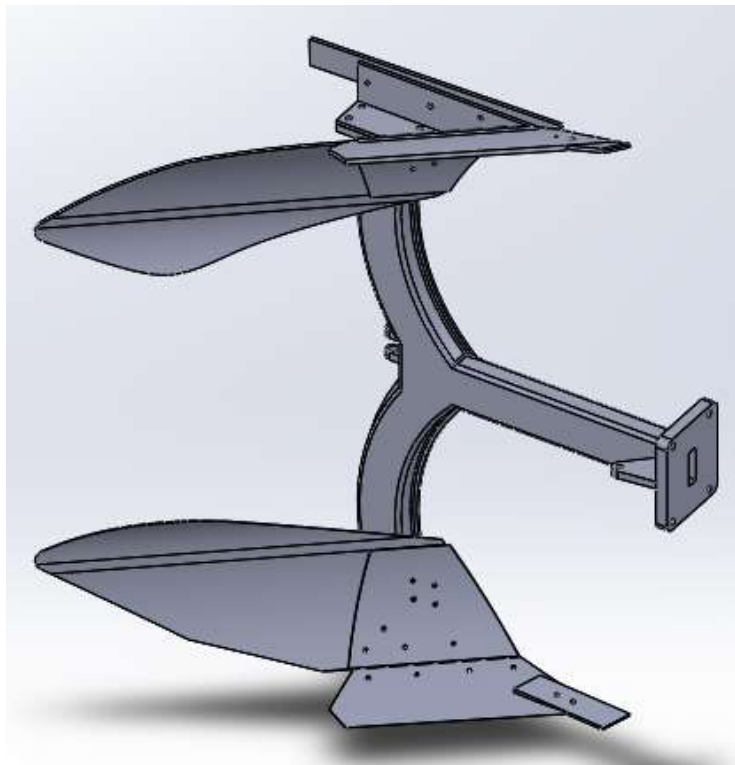


Figura 61: Conjunto reja-vertedera unido al brazo.

### B.1.5. Cabezal fijo

Elemento estructural, cuya misión es unir el chasis del arado, al cabezal giratorio que se encuentra unido al vehículo agrícola. También hace posible que el apero varíe su anchura ya que, tanto la viga lateral, como la viga central, se encuentran ancladas a este cabezal mediante bulones. En la figura 62 se encuentra representado en azul.

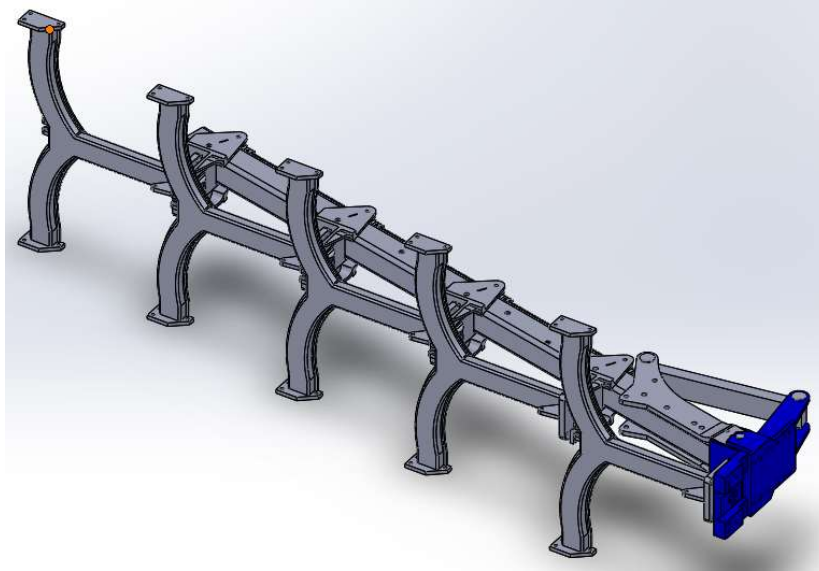


Figura 62: Cabezal fijo.

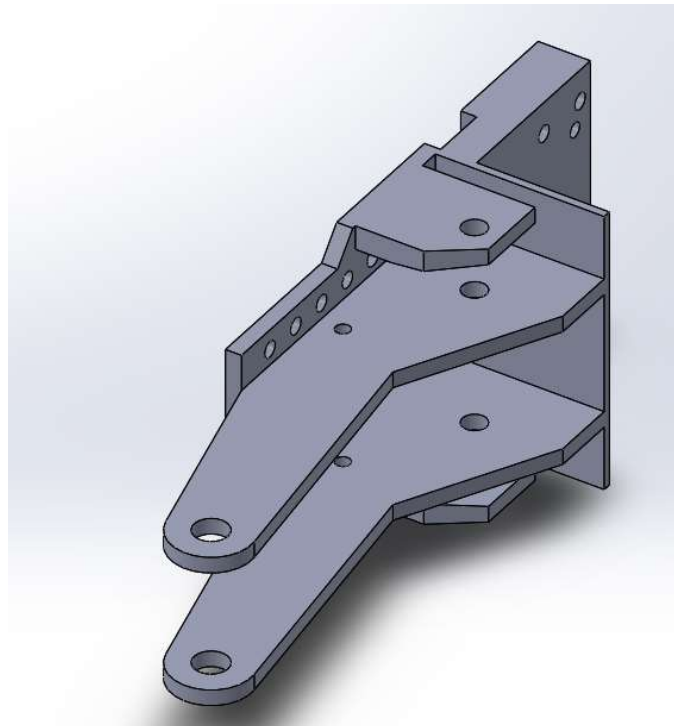


Figura 63: Cabezal fijo vista detallada.



### B.1.6. Unión cabezal fijo-viga central

Elemento estructural, cuya función es unir la viga central con el cabezal fijo, así como permitir el giro de la viga central para que el apero pueda variar su anchura. En la figura 64 se encuentra representado en azul.

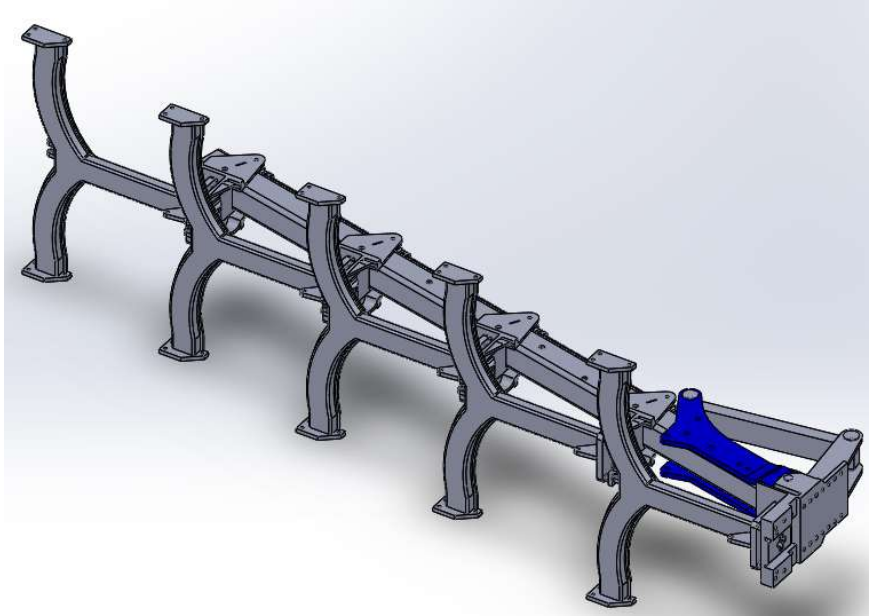


Figura 64: Unión cabezal fijo-viga central.

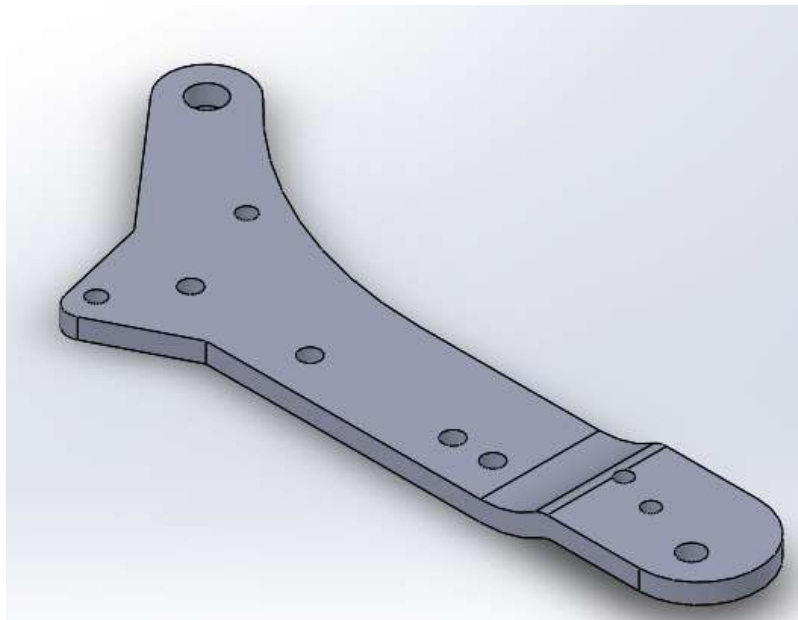


Figura 65: Unión cabezal fijo-viga central vista detallada.

## B.1.7. Unión viga lateral-brazo

Elemento estructural mediante el cual se une la viga lateral a la viga central y a cada uno de los cuerpos, permitiendo el giro para que el apero pueda variar la anchura. En la figura 66 se encuentra representado en azul y en la figura 67 aparece una representación más detallada.

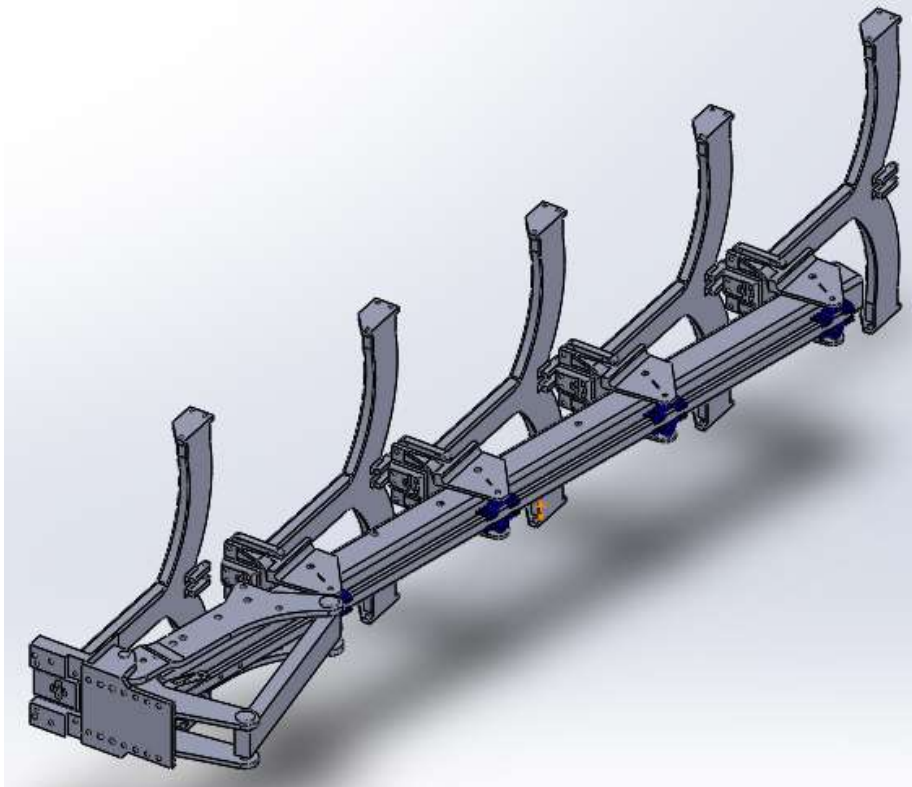


Figura 66: Unión viga lateral-cuerpo.

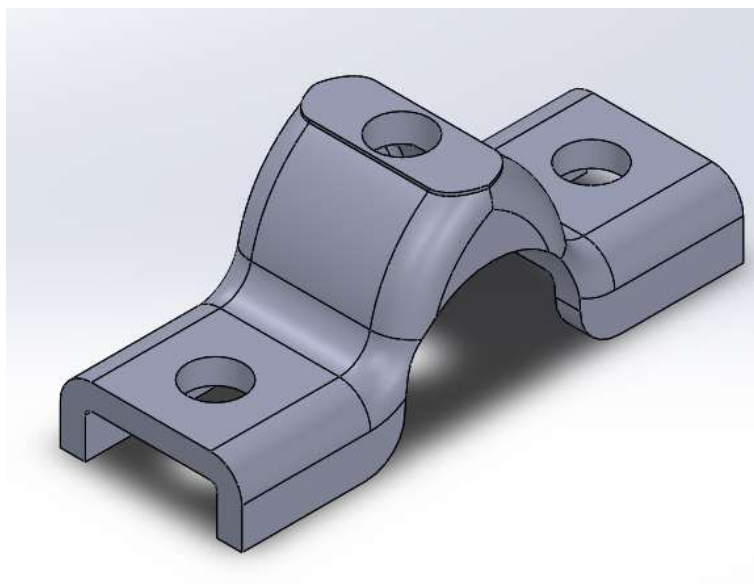


Figura 67: Unión viga lateral-cuerpo vista detallada.

### B.1.8. Unión viga lateral-cabezal fijo

Elemento del chasis que sirve de unión entre la viga lateral y el cabezal fijo, permitiendo el giro relativo, para que el apero pueda variar la anchura. En la figura 68 se encuentra representado en azul y en la figura 69 aparece una vista más detallada.

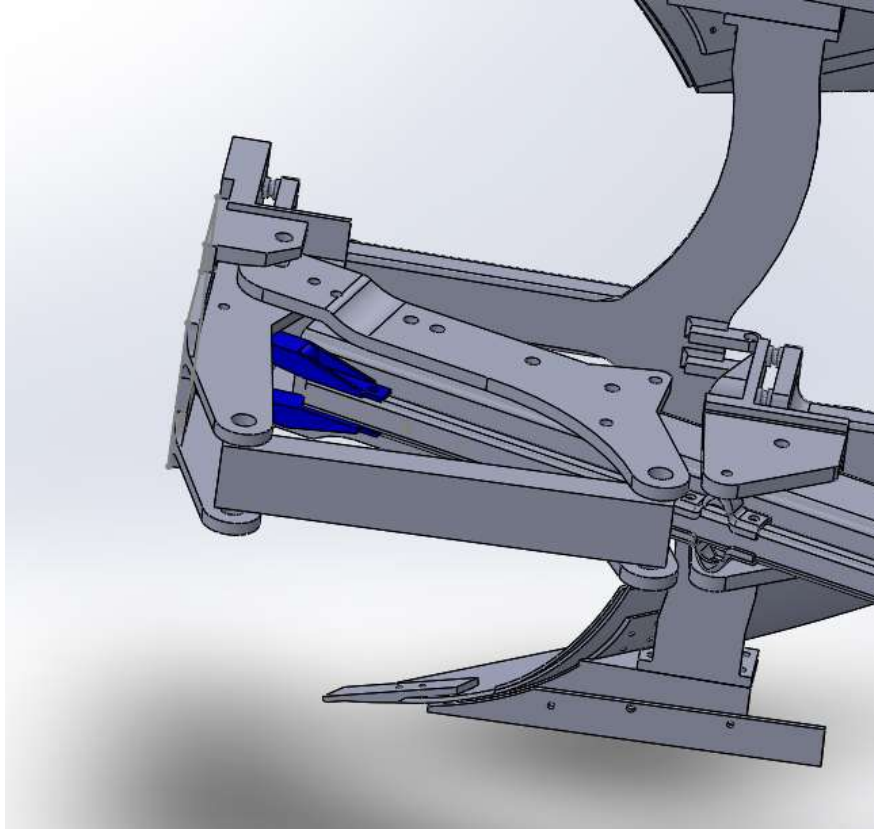


Figura 68: Unión viga lateral-cabezal fijo.

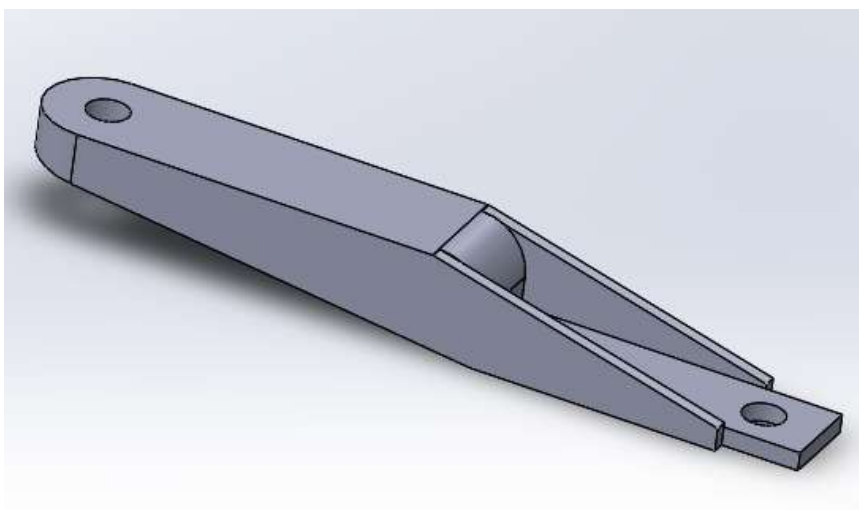


Figura 69: Unión viga lateral-cabezal fijo vista detallada.

### B.1.9. Separadores

Elemento estructural, cuya función es servir de “amortiguador” a los diferentes cuerpos, en caso de que uno de estos colisionara con un obstáculo, y así, evitar la rotura del brazo. En la figura 70 se encuentran representados en color azul y en la figura 71 aparece una vista más detallada.

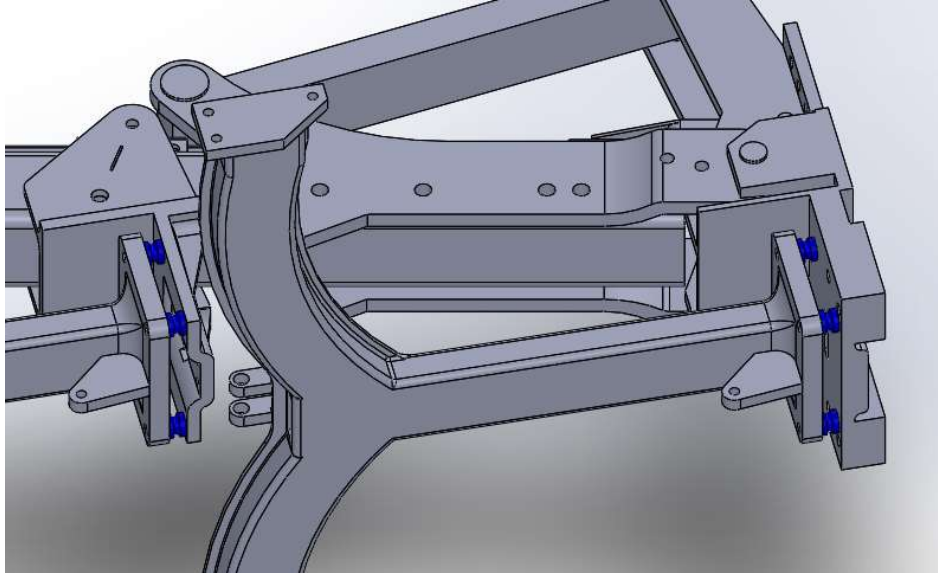


Figura 70: Separadores cuerpo.

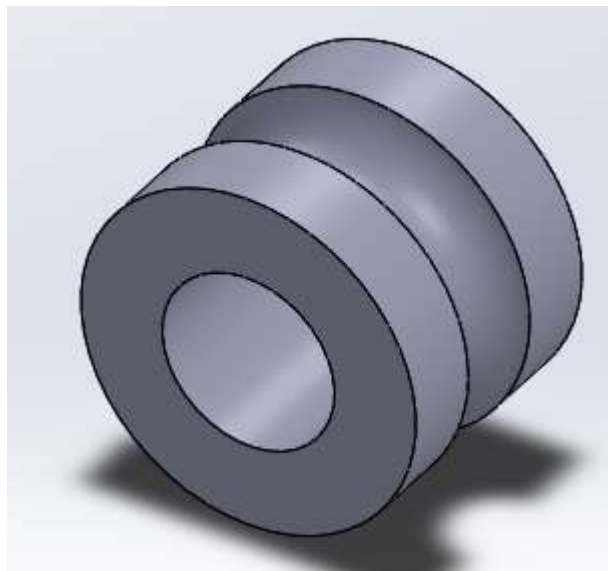


Figura 71: Separadores cuerpo vista detallada.

## B.2. Componentes del conjunto reja-vertedera

El conjunto reja-vertedera es el encargado de actuar directamente sobre el suelo, levantado la tierra y enterrando abonos, malas hiervas etc...

La acción que más debilita estas partes es rozamiento directo con el suelo, produciendo un gran desgaste. Debido a este desgaste es necesaria una frecuente sustitución de la puntera, reja, cuchilla vertical y protector de vertedera. En la figura 72 aparece representado el conjunto reja-vertedera.

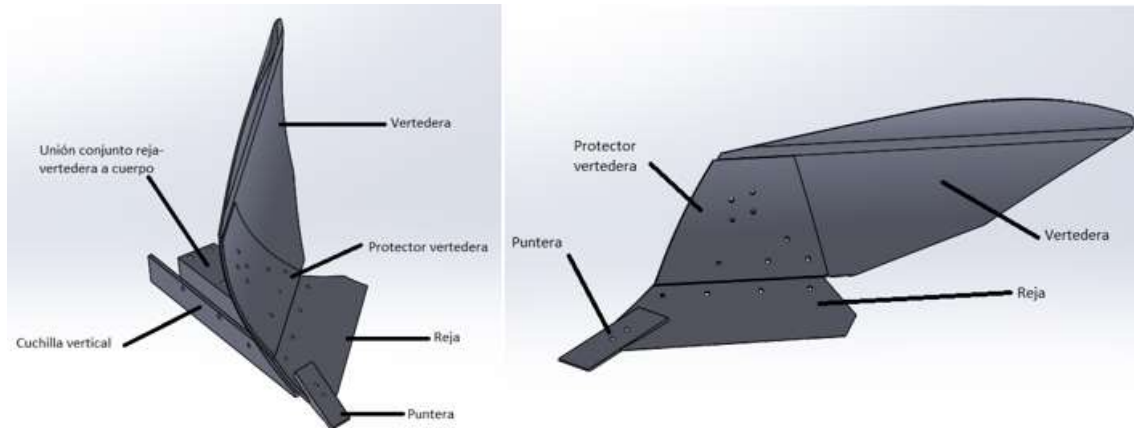


Figura 72: Conjunto reja-vertedera.

### B.2.1. Reja y puntera

La puntera tiene como función mejorar la entrada del conjunto en el suelo, para una mejor retirada de tierra. La función de la reja es realizar el corte horizontal en el suelo, para que luego la vertedera pueda voltear ese “trozo” de suelo. En la figura 73 aparece representada la puntera en color azul y la reja de color verde.

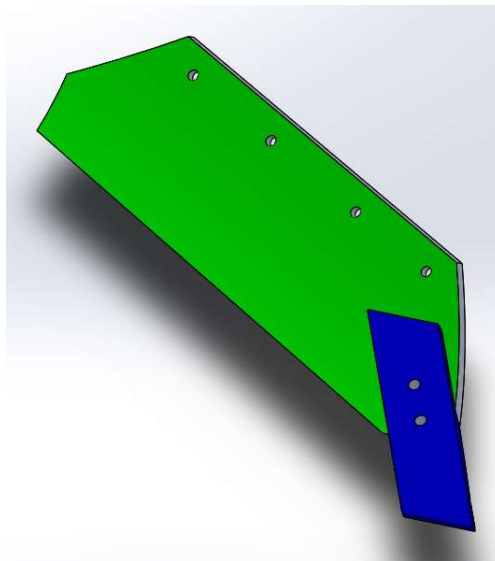


Figura 73: Puntera (azul) y reja (verde).

### B.2.3. Cuchilla vertical

La cuchilla vertical, como su propio nombre indica, es la encargada de realizar un corte vertical sobre el suelo, para facilitar el volteo de la tierra por parte de la vertedera. Aparece representada en la figura 74.

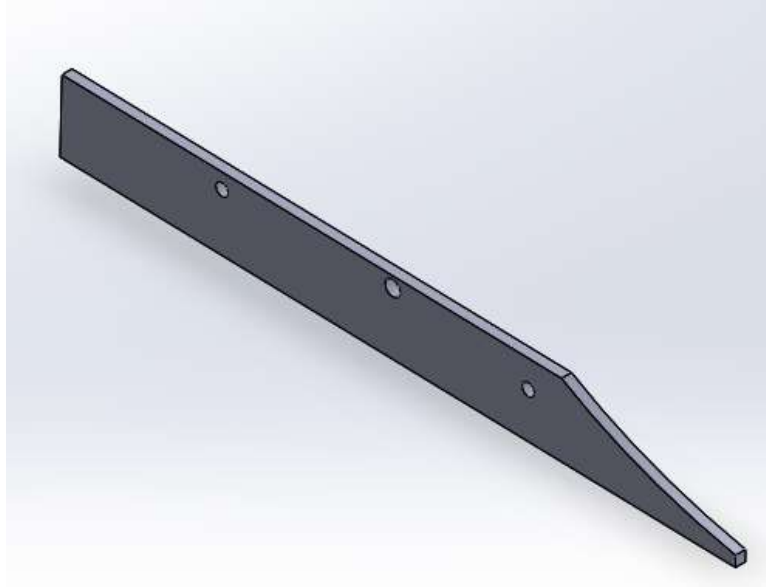


Figura 74: Cuchilla vertical.

### B.2.4. Vertedera

La vertedera es la encargada de voltear la tierra que ha sido cortada previamente por la cuchilla vertical y por la reja, envolviendo abonos, malas hierbas, etc... y permitiendo airear la tierra levantada. Aparece representada en la figura 75.

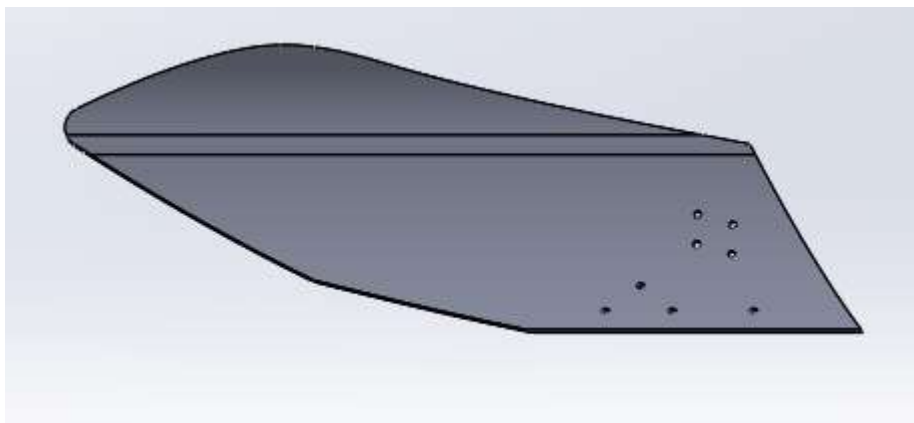


Figura 75: Vertedera.

### B.2.5. Protector vertedera

El protector de la vertedera es el encargado, como su propio nombre indica, de reducir el desgaste de la vertedera, siendo más económico cambiar este componente que la vertedera completa, ya que la vertedera tiene un tamaño mayor. Aparece representado en la figura 76.

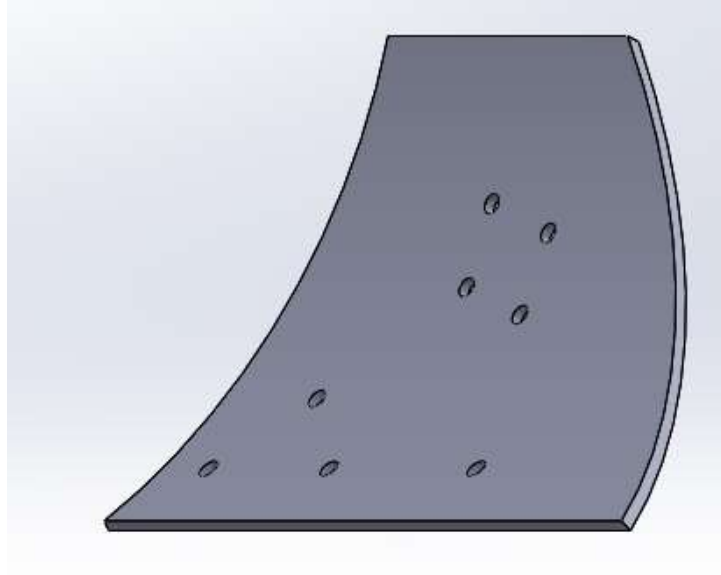


Figura 76: Protector vertedera.

### B.2.6. Unión conjunto reja-vertedera a cuerpo

Este componente une y a la vez da rigidez a todo el conjunto reja vertedera, además es el encargado de unir este conjunto con el chasis del arado. Aparece representado en la figura 77.

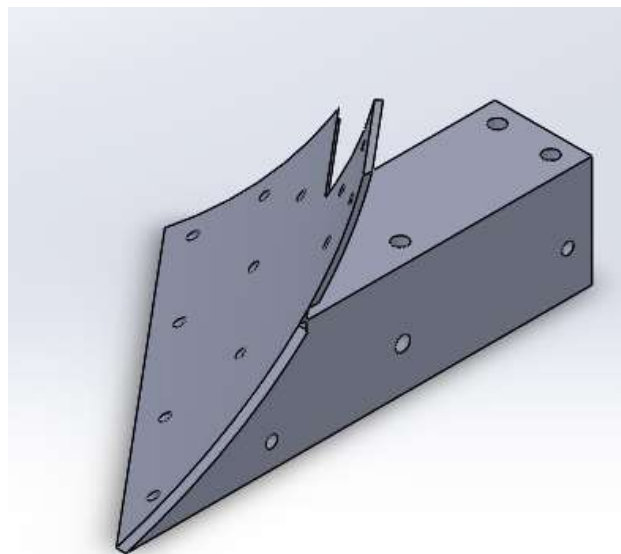


Figura 77: Unión conjunto reja-vertedera con cuerpo.

## ANEXO C: SOLIDWORKS 2015

Este proyecto se ha realizado completamente usando el software SOLIDWORKS 2015, tanto para la fase de diseño como para la fase de simulación.

SOLIDWORKS es una herramienta de diseño tridimensional completa que integra un gran número de funciones avanzadas para facilitar el modelado piezas, crear grandes ensamblajes, generar planos y otras funcionalidades que le permiten validar, gestionar y comunicar proyectos de forma rápida, precisa y fiable. Se caracteriza por su entorno intuitivo y por disponer de herramientas de diseño fáciles de utilizar. Todo integrado en un único programa de diseño con más de 45 aplicaciones complementarias para facilitar el desarrollo de sus proyectos.

La característica que hace que SOLIDWORKS sea una herramienta competitiva, ágil y versátil, es su capacidad de ser paramétrico, variacional y asociativo, además de usar las Funciones Geométricas Inteligentes y emplear un Gestor de Diseño (FeatureManager) que permite visualizar, editar, eliminar y actualizar cualquier operación realizada en una pieza de forma bidireccional entre todos los documentos asociados.

El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos como otro tipo de información necesaria para la producción. Estas son las tres operaciones básicas que posee el programa. En primer lugar, está la opción de crear piezas individuales; la segunda opción es crear un ensamblaje, que consiste en la unión de las piezas individuales creadas. Estos son los dos comandos que se han utilizado para elaborar la estructura del proyecto; La tercera opción que ofrece el programa es la de crear un dibujo. Esto se refiere a crear un dibujo en 2D, obteniendo las vistas (alzado, planta y perfil) de una pieza o un ensamblaje. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD.

Mediante este software se obtendrán en la fase de análisis las tensiones máximas de von Mises, así como los desplazamientos y las partes de los componentes que presenten un factor de seguridad menos que 3.

Para calcular las tensiones, este programa se basa en la teoría de la energía de distorsión máxima (von Mises). Esta teoría utiliza las tensiones principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , y expresa la tensión total mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]/2\}^{1/2}$$

La teoría expone que un material dúctil comienza a ceder en una ubicación cuando la tensión de von Mises es igual al límite de tensión. En la mayoría de los casos, el límite elástico se utiliza como el límite de tensión. Sin embargo, el software le permite utilizar el límite de tensión de tracción/ruptura o establecer su propio límite de tensión.

$$\sigma_{\text{vonMises}} \geq \sigma_{\text{limit}}$$

Este programa, una vez que ha calculado las tensiones, utiliza el valor del límite elástico (especificado para cada material) para calcular el factor de seguridad, empleándola siguiente expresión.

$$\text{Factor de seguridad (FDS)} = \sigma_{\text{limit}} / \sigma_{\text{vonMises}}$$



## ANEXO D: TIPOS DE SUELO

### D.1. Principales propiedades y comportamientos del suelo

Las principales propiedades físicas del suelo son la tenacidad, la consistencia, la porosidad, la permeabilidad, la capilaridad, la capacidad de retención, la aireación, el recalentamiento y el enfriamiento.

- **Tenacidad o cohesión:** Resistencia a la acción mecánica de los aperos. Depende fundamentalmente del grado de humedad del terreno.
- **Consistencia:** Para su determinación es preciso definir los diferentes niveles de consistencia: dura, friable, semi-plástica y plástica.

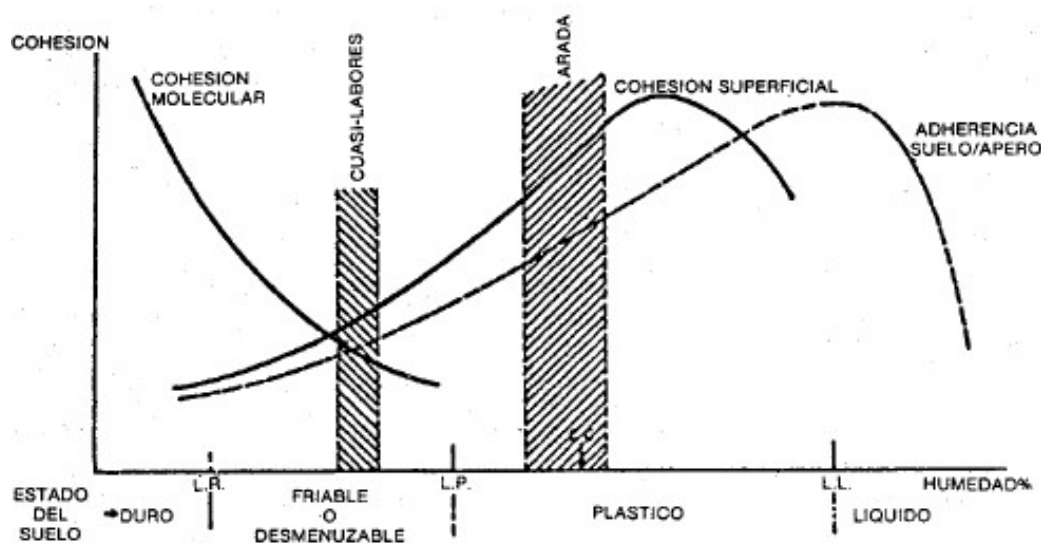


Figura 78: Variación de las fuerzas resistentes del suelo en función de la humedad. LL = Límite líquido. LP = Límite plástico. LR = Límite de refracción.

- **Porosidad:** Permite apreciar la dimensión media de los poros y volúmenes vacíos.
- **Permeabilidad:** Caracteriza la facilidad con la que el agua puede infiltrarse en el suelo.
- **Capilaridad:** Facultad con la que los líquidos ascienden. Está directamente relacionada con la posibilidad que tiene el agua de las capas profundas de subir a la superficie.
- **Capacidad de retención:** Define la cantidad de agua que puede retener un suelo.
- **Recalentamiento y enfriamiento:** Las tierras ligeras, muy permeables, se calientan rápidamente y permiten un desarrollo rápido de la vegetación, pero se secan rápido. Las tierras arcillosas tardan más en calentarse, ya que son más húmedas, por lo tanto, son poco recomendables para los cultivos precoces, aunque permanecen más frescas en verano.

## D.2. Ecuaciones empleadas para la obtención de fuerzas según el tipo del suelo

Tanto las ecuaciones como la dirección en que está aplicada la fuerza han sido obtenidas del libro “La mecanización agraria” de Juan Antonio Boto Fidalgo

- **Limoso:**

$$F\left(\frac{N}{cm^2}\right) = 7.0 + 0.049 x V^2$$

- **Franco-arcilloso:**

$$F\left(\frac{N}{cm^2}\right) = 6.0 + 0.053 x V^2$$

- **Franco-arcillo-limoso:**

$$F\left(\frac{N}{cm^2}\right) = 4.8 + 0.024 x V^2$$

- **Franco:**

$$F\left(\frac{N}{cm^2}\right) = 3.0 + 0.02 x V^2$$

- **Limo-arenoso:**

$$F\left(\frac{N}{cm^2}\right) = 3.0 + 0.056 x V^2$$

- **Franco arenoso:**

$$F\left(\frac{N}{cm^2}\right) = 2.8 + 0.013 x V^2$$

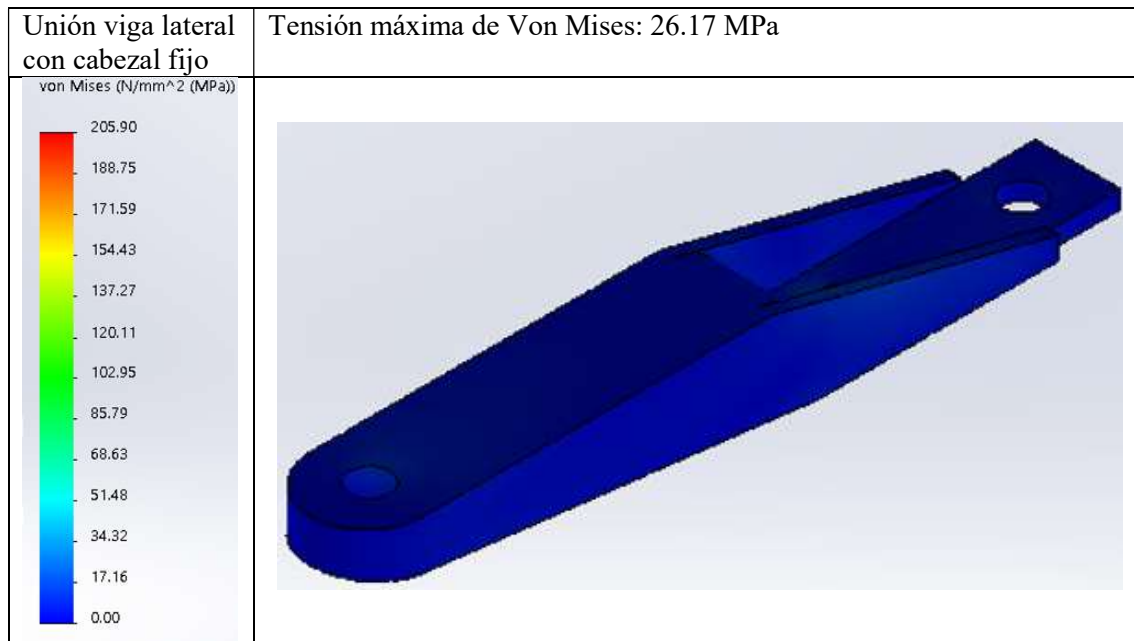
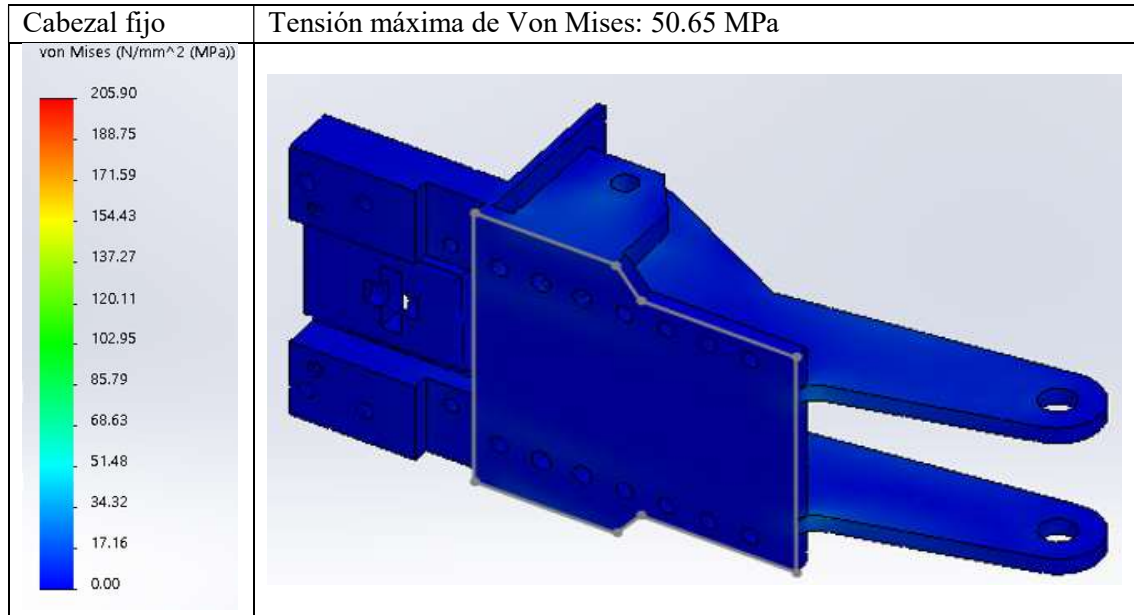
- **Arenoso:**

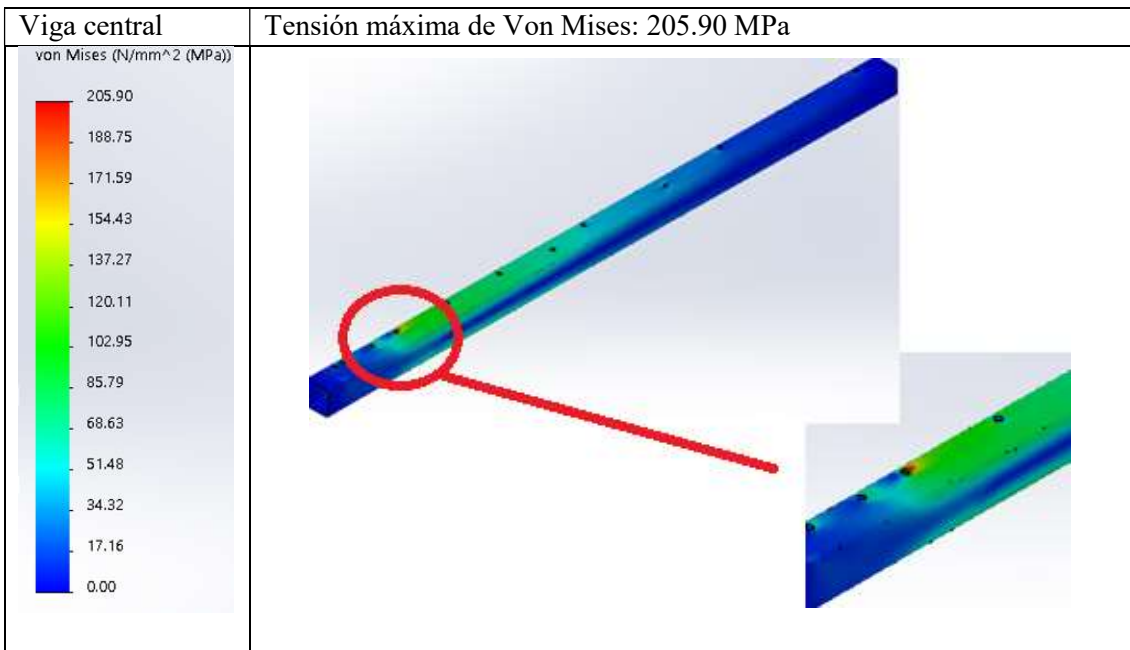
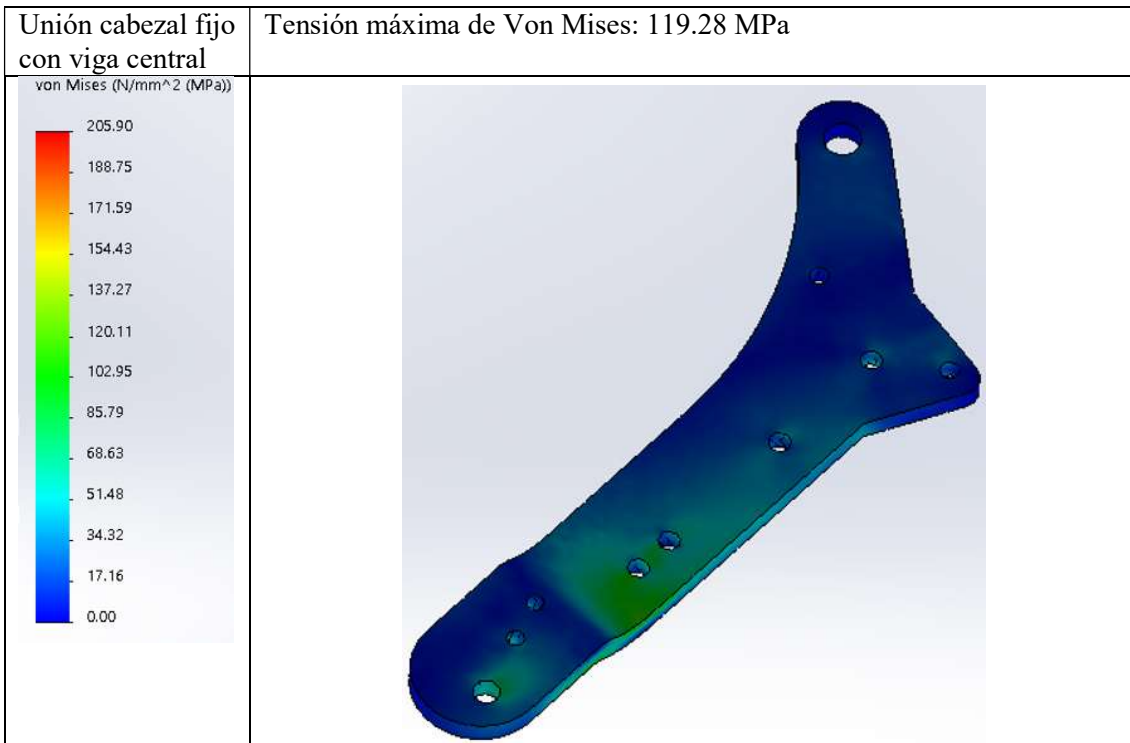
$$F\left(\frac{N}{cm^2}\right) = 2.0 + 0.013 x V^2$$

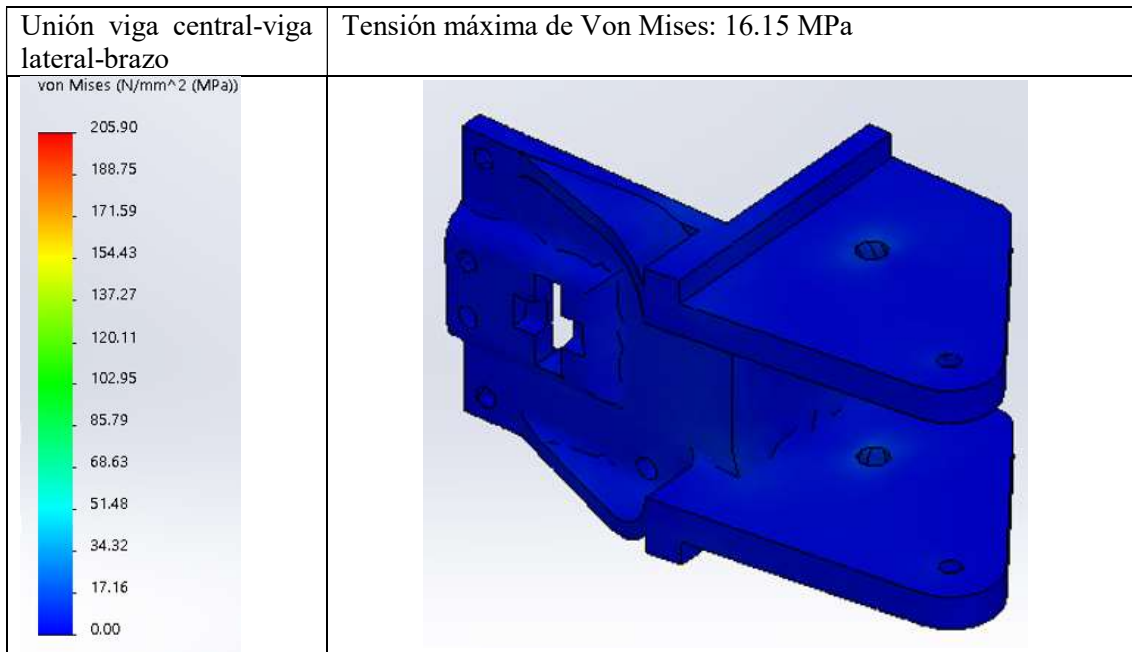
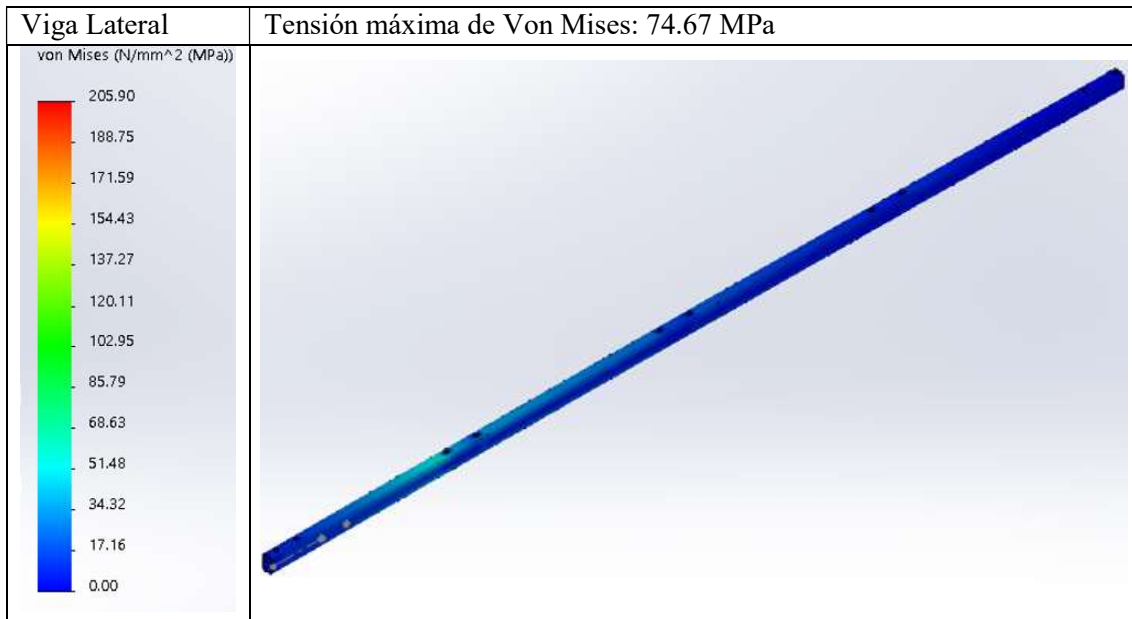
## ANEXO E: CASOS DE CARGA

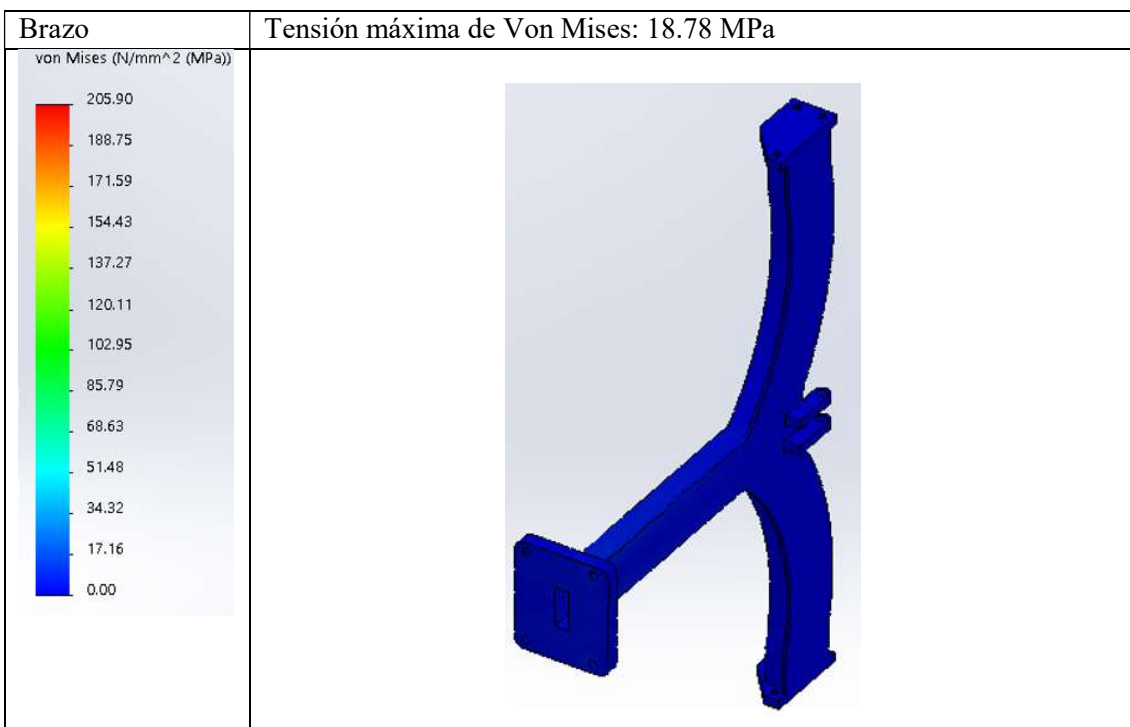
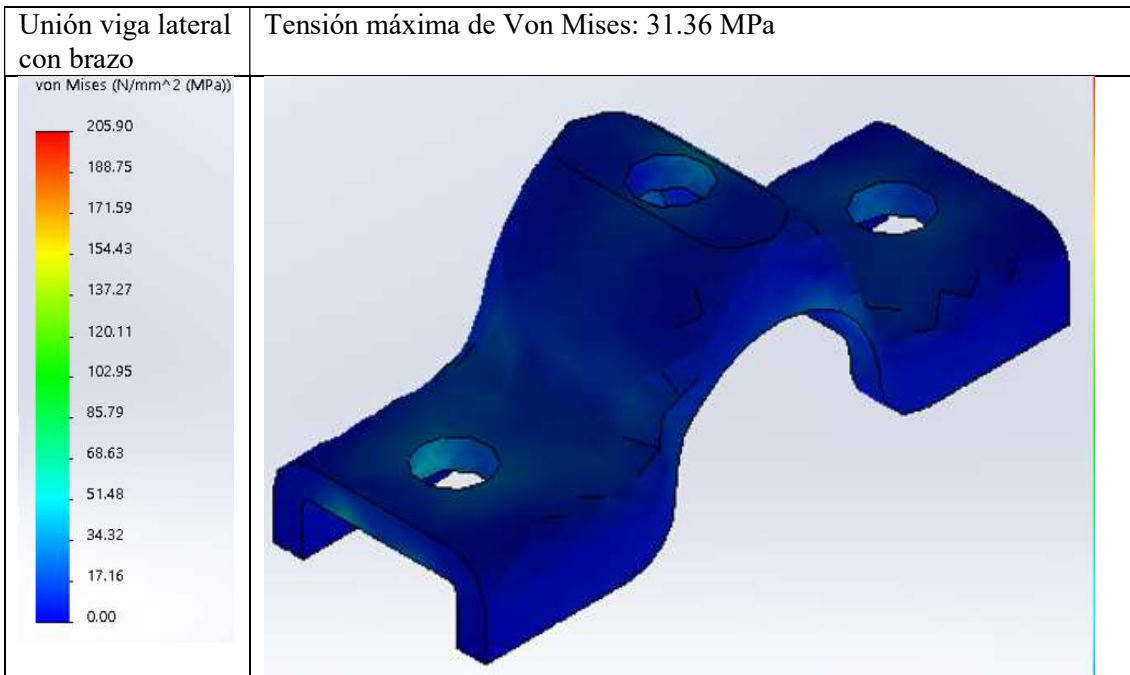
En este anexo se han recogido las imágenes de cada uno de los componentes de los casos de carga que presentan mayor tensión (voladizo y anchura máxima a máxima velocidad en suelo limoso), resaltando los puntos más críticos. Estos casos de carga son los que se han utilizado para realizar la optimización. También se han recogido las figuras que hacen referencia a los casos de carga analizados, exceptuando el voladizo.

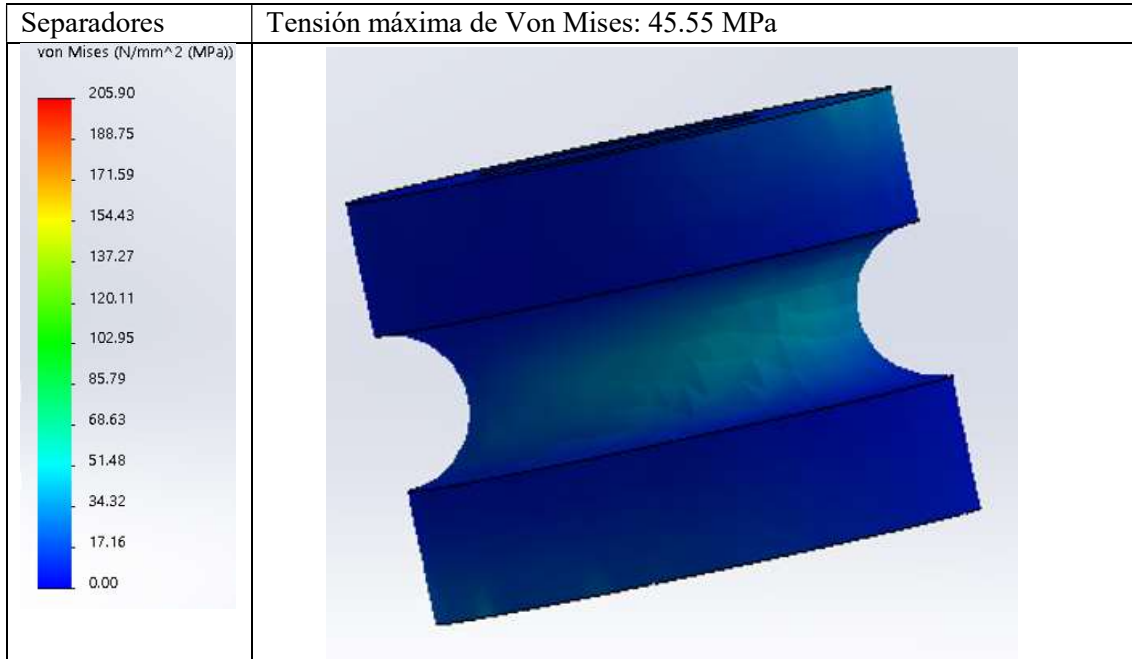
### E.1. Voladizo



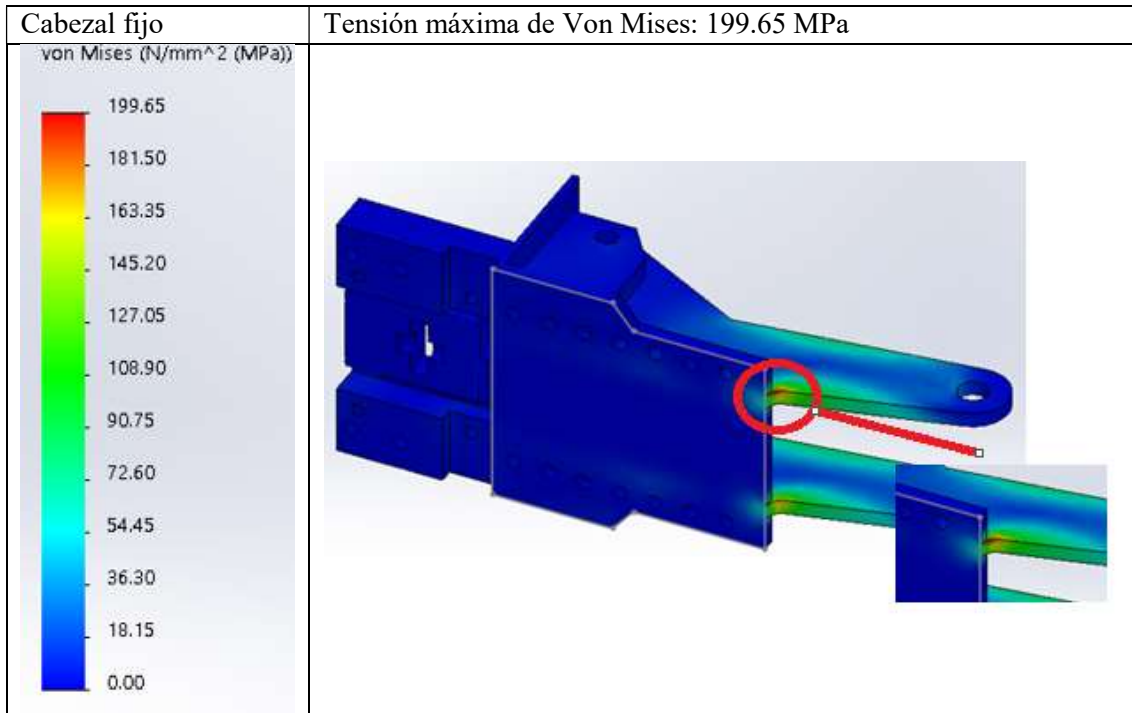


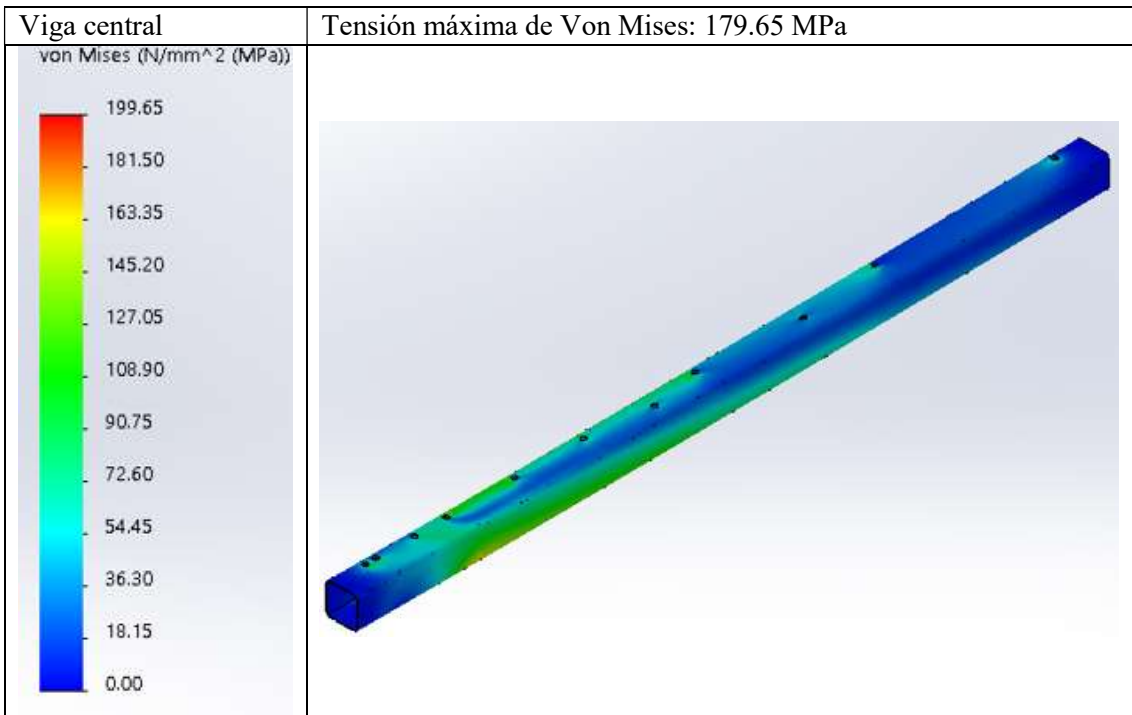
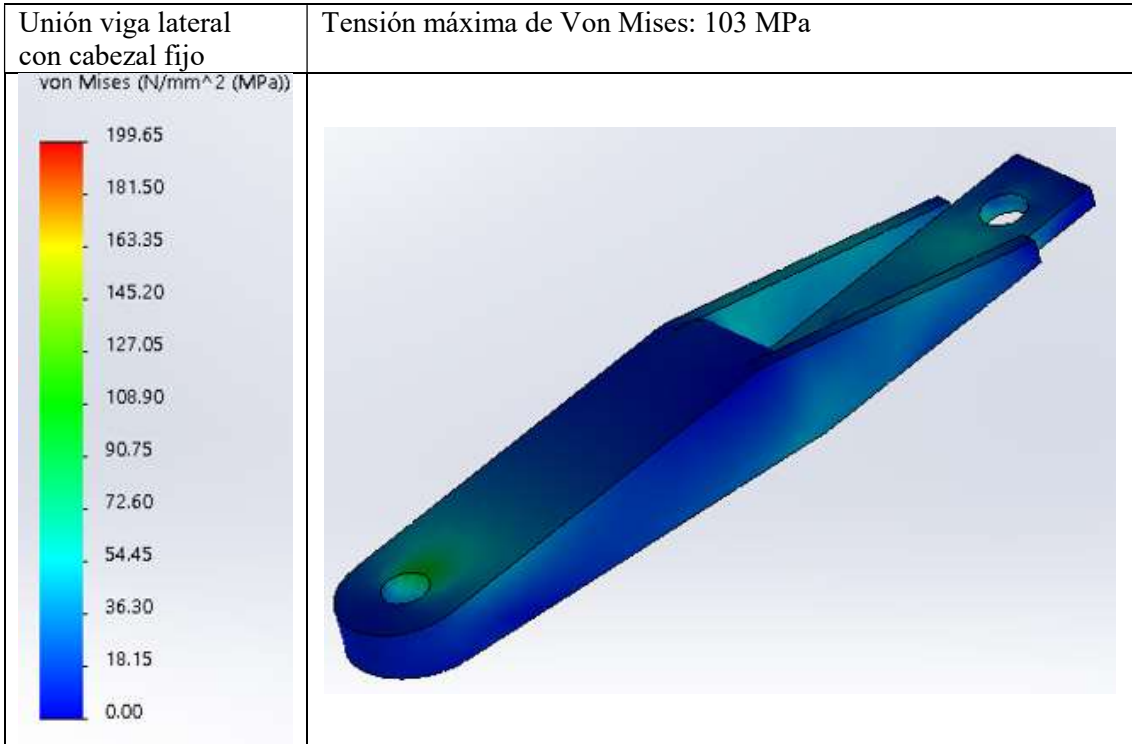




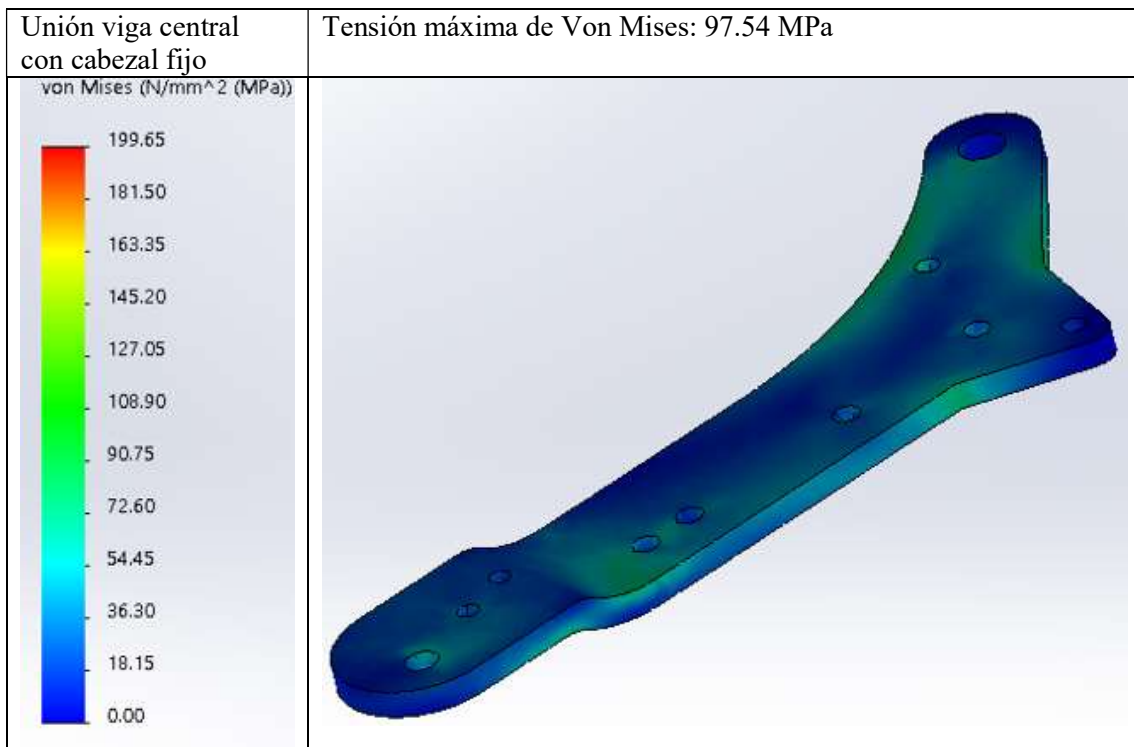
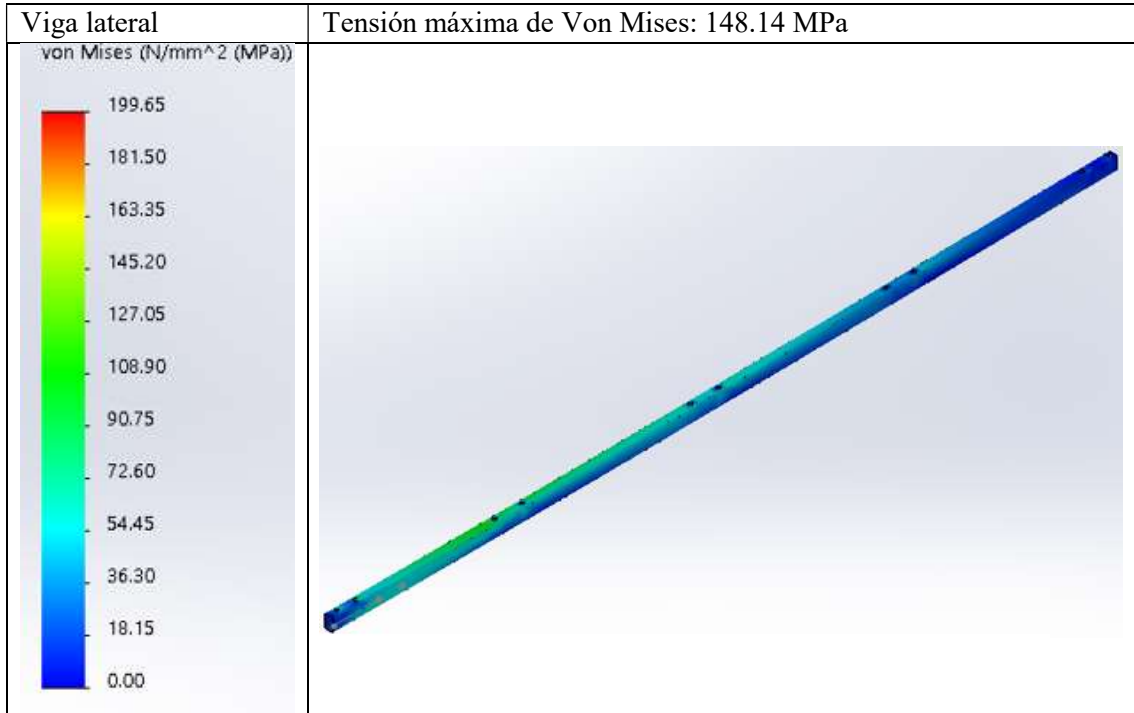


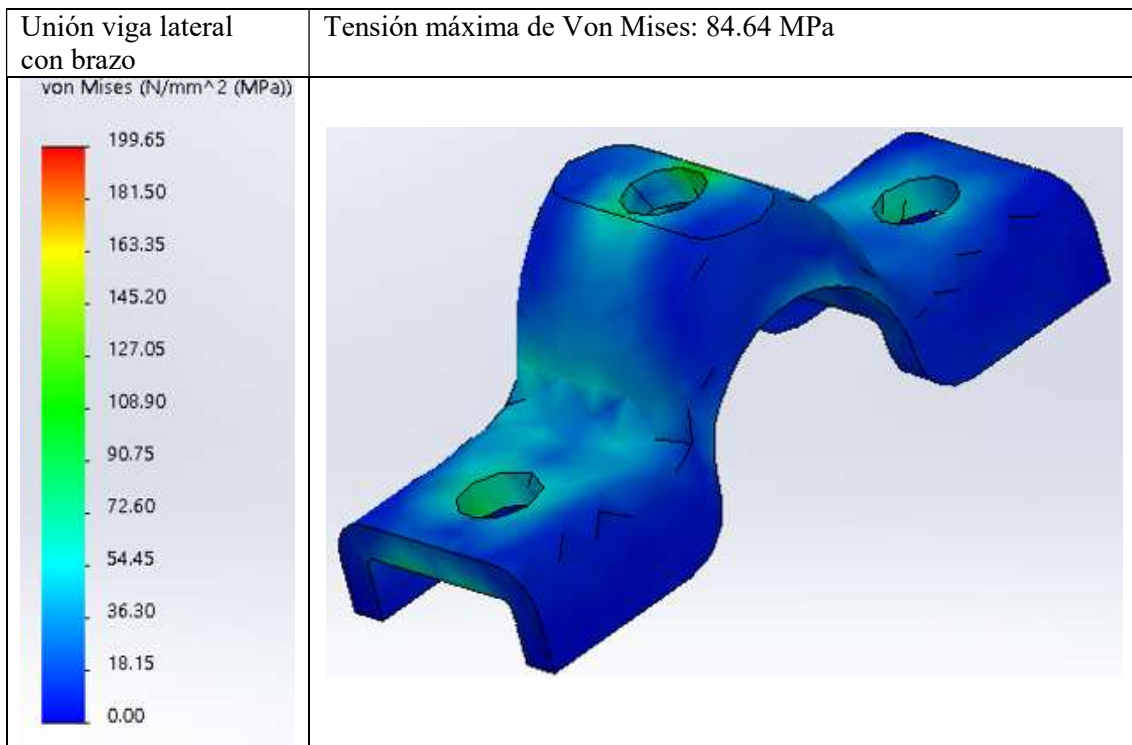
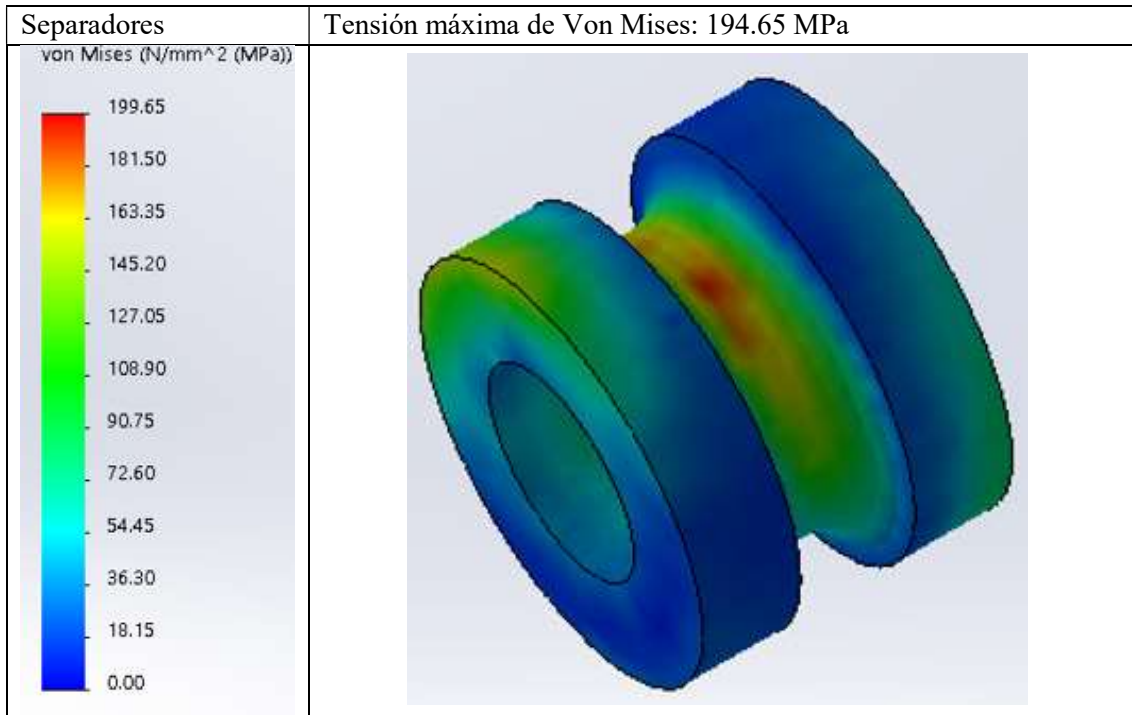
E.2. Apero agrícola trabajando con anchura máxima, velocidad máxima y suelo limoso

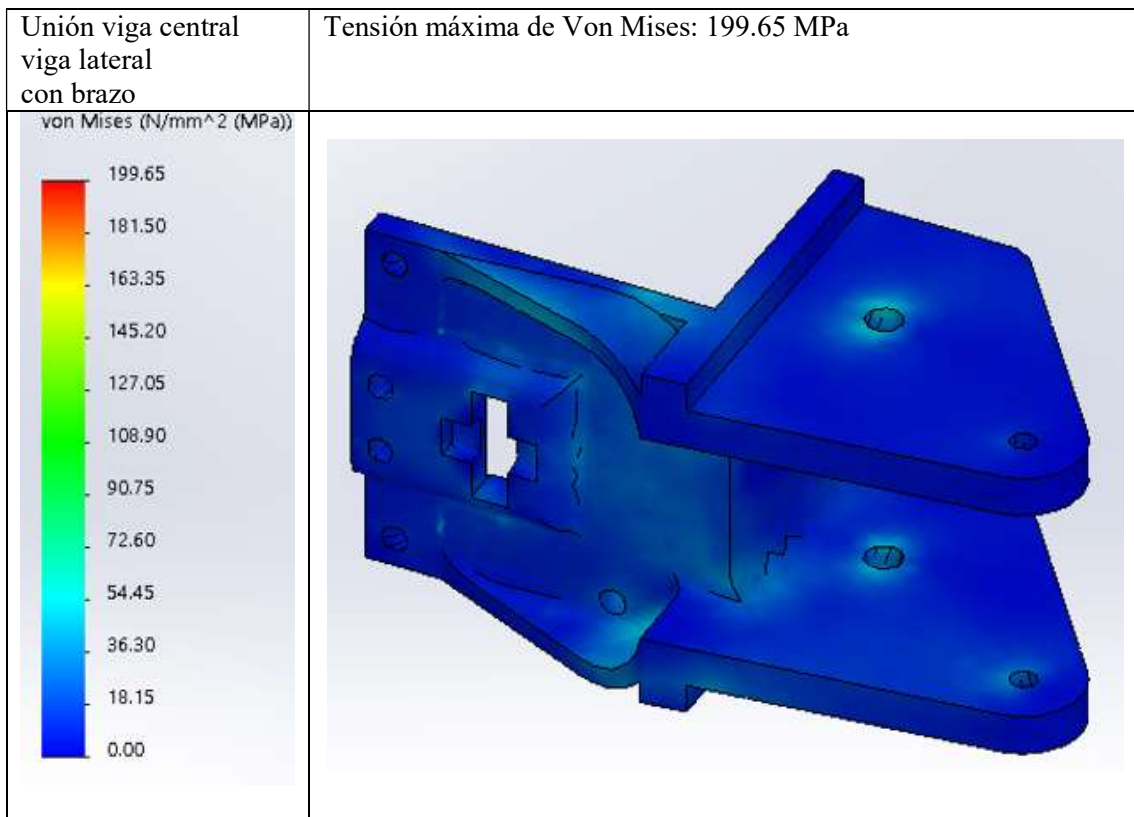
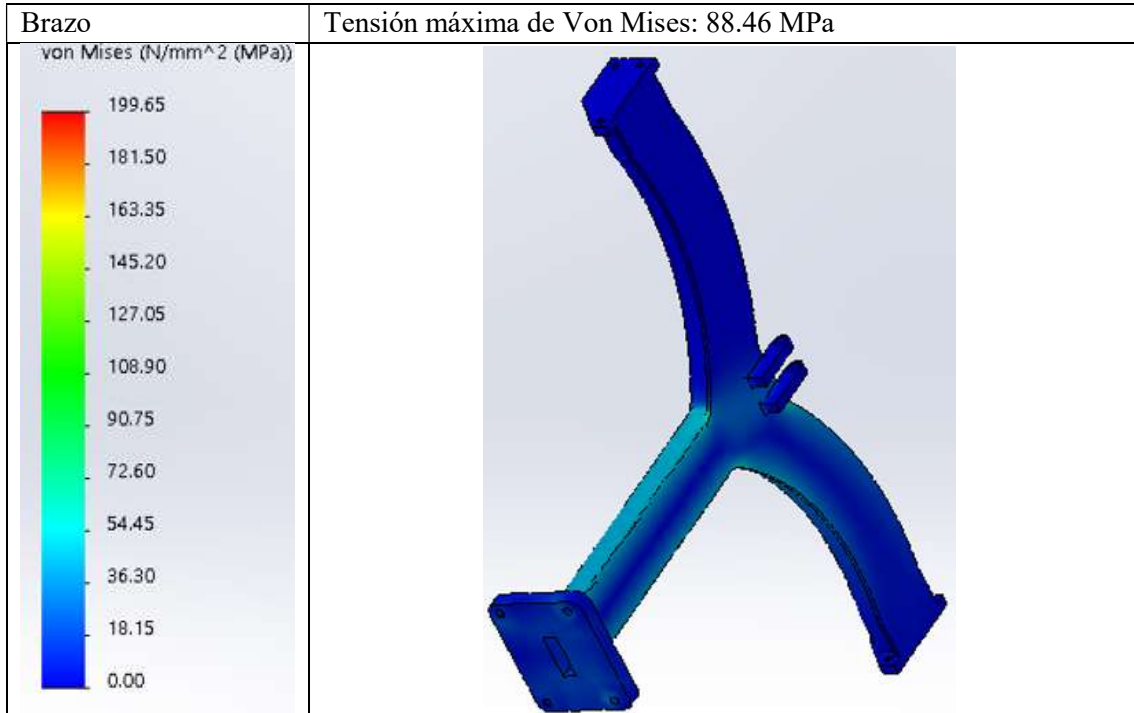












E.3. Resultados de los casos de carga

E.3.1. Modelo trabajando a máxima profundidad y anchura mínima

E.3.1.1. Velocidad media

E.3.1.1.1 Suelo limoso

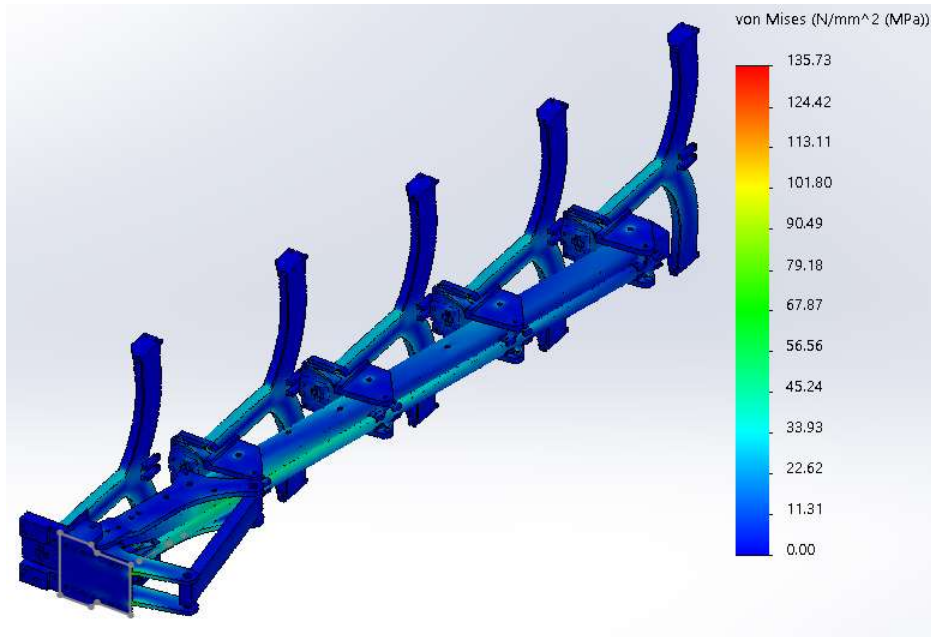


Figura 79: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad media, suelo limoso.

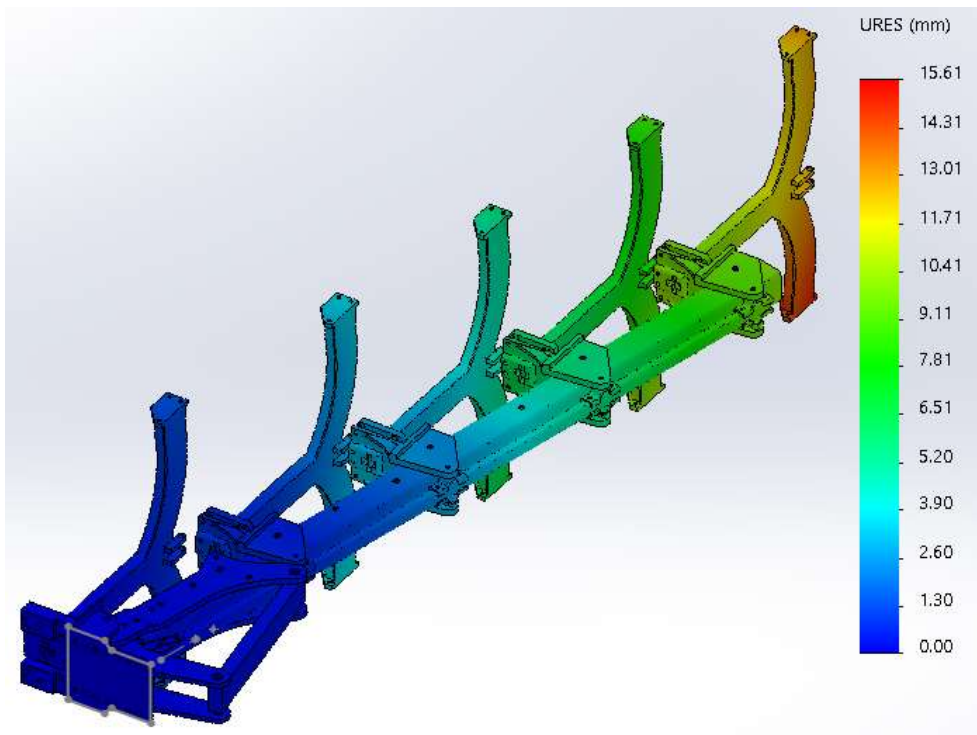


Figura 80: Desplazamientos, anchura mínima, velocidad media, suelo limoso.

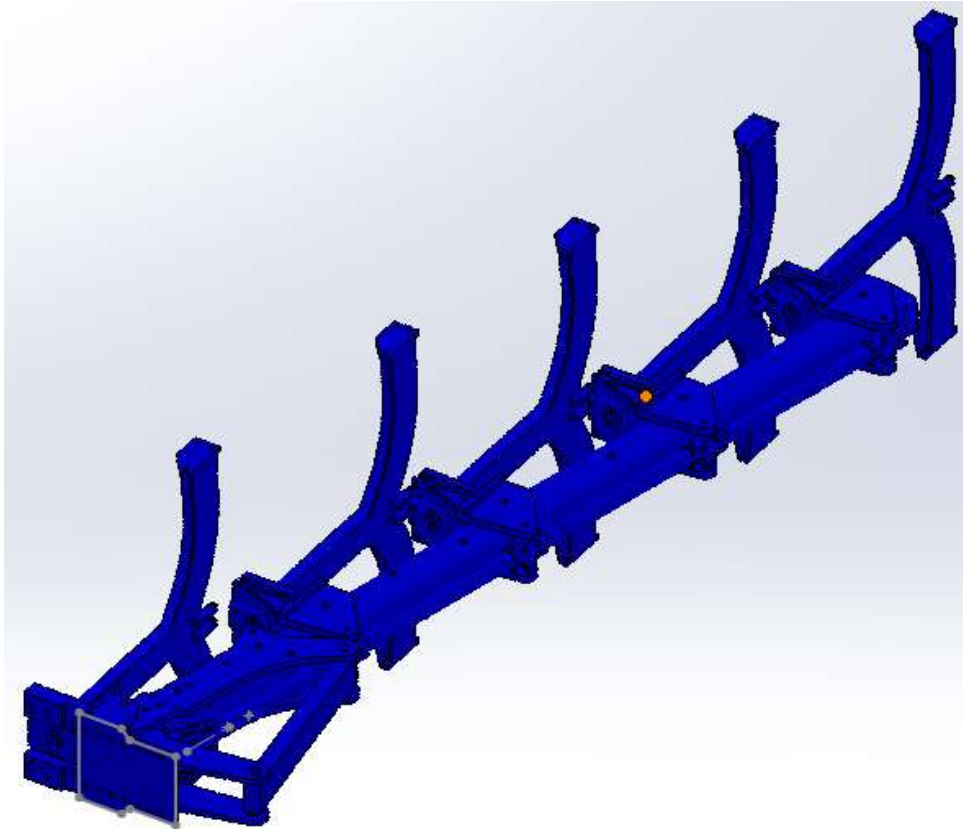


Figura 81: Factor de seguridad, anchura mínima, velocidad media, suelo limoso.

### E.3.1.1.2 Suelo franco

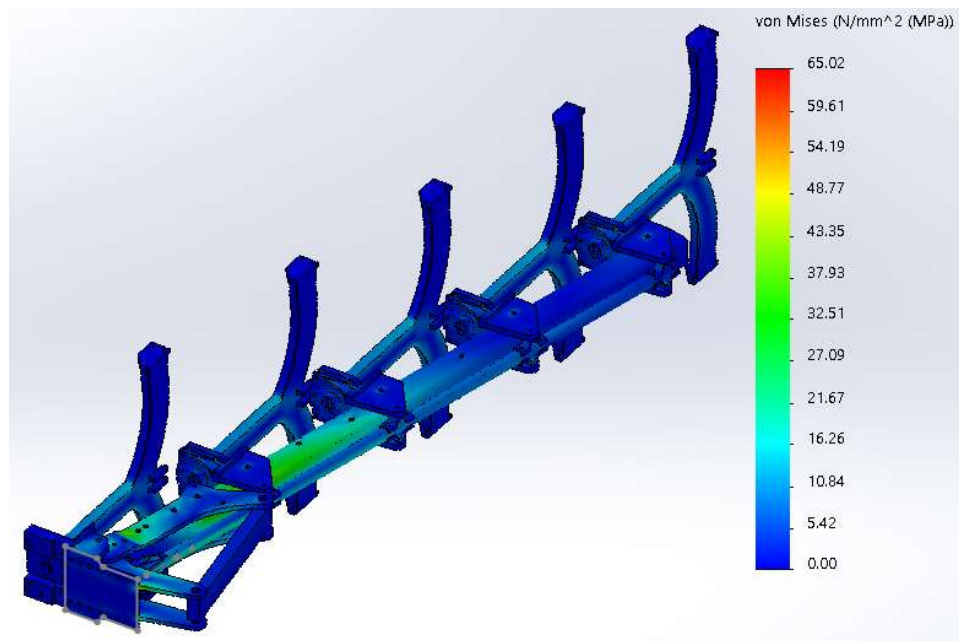


Figura 82: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad media, suelo franco.

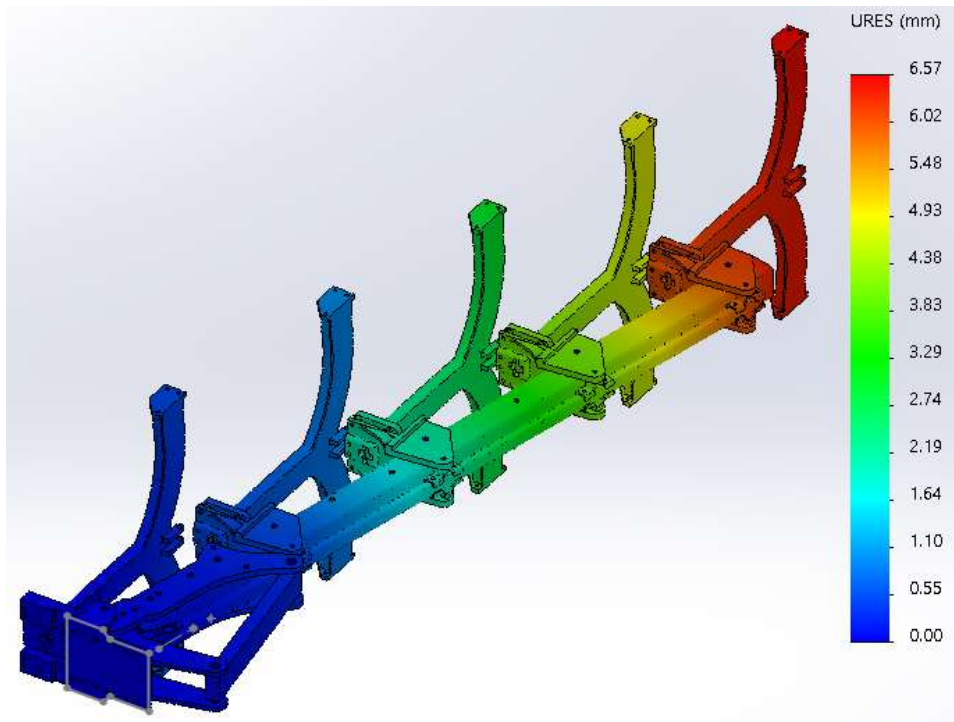


Figura 83: Desplazamientos, anchura mínima, velocidad media, suelo franco.

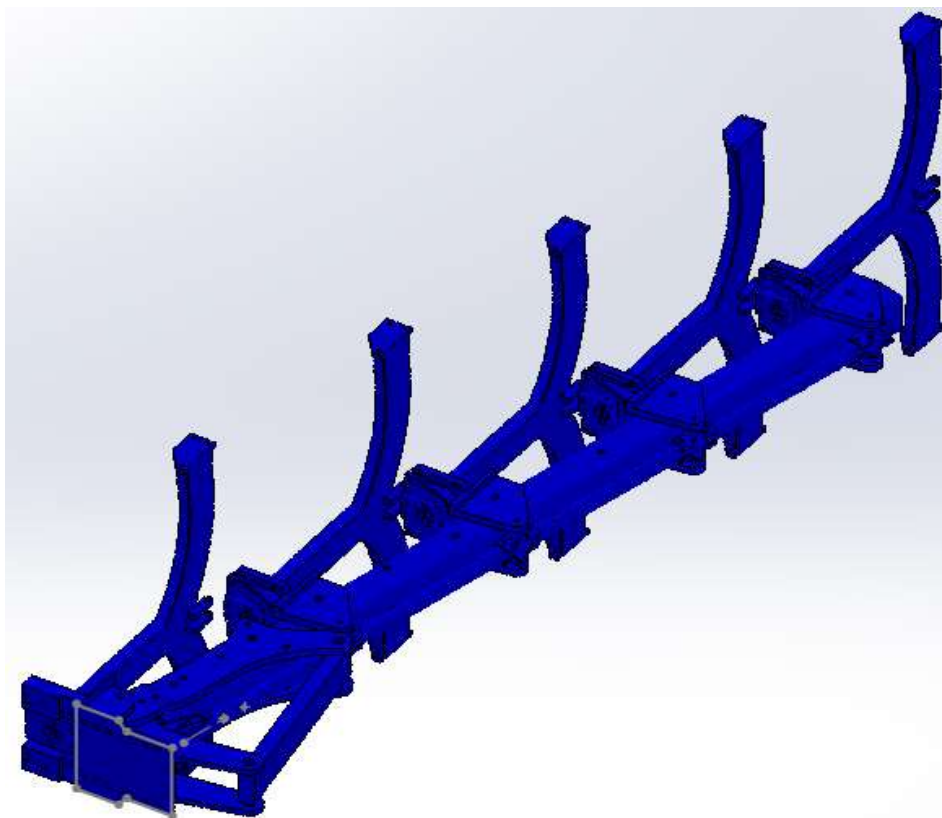


Figura 84: Factor de seguridad, anchura mínima, velocidad media, suelo franco.

E.3.1.1.3 Suelo arenoso

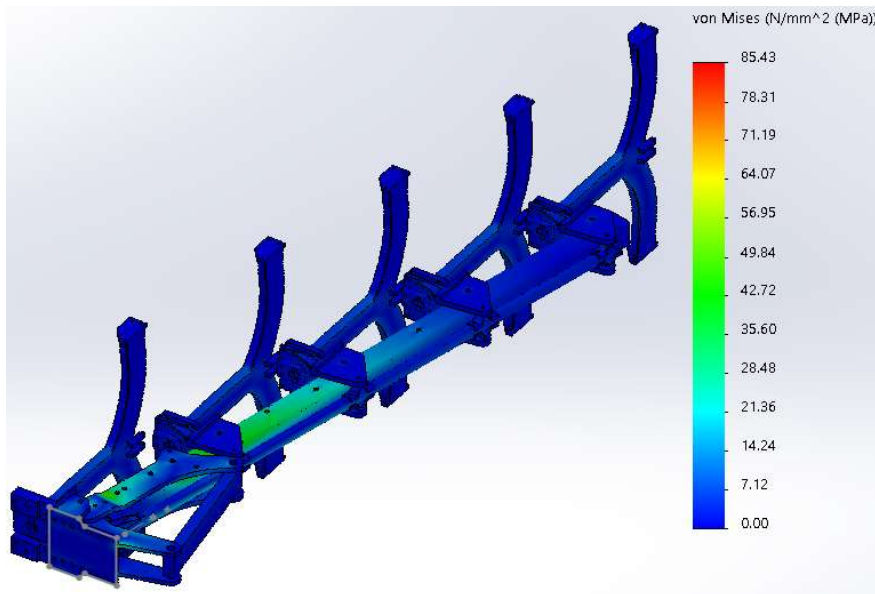


Figura 85: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad media, suelo arenoso.

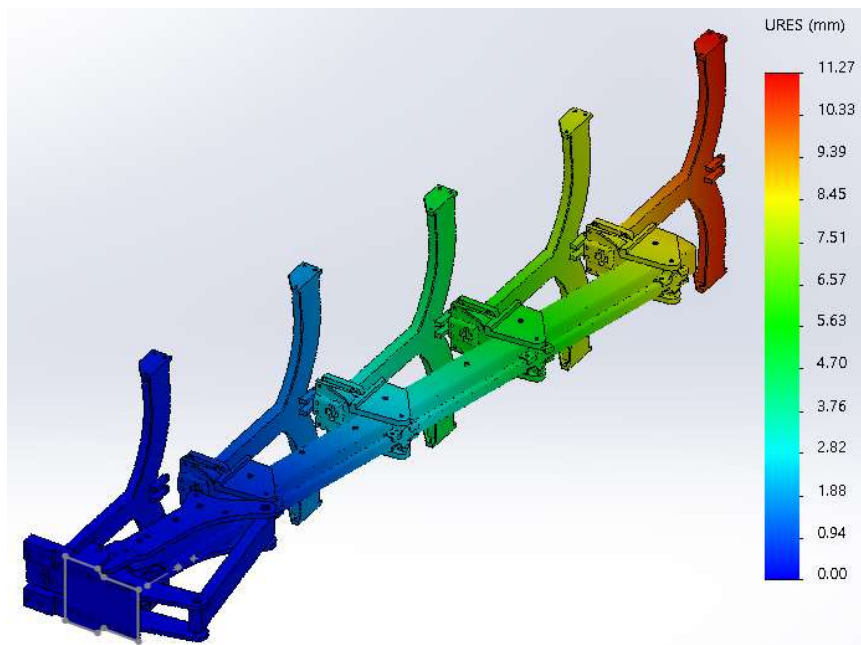


Figura 86: Desplazamientos, anchura mínima, velocidad media, suelo arenoso.

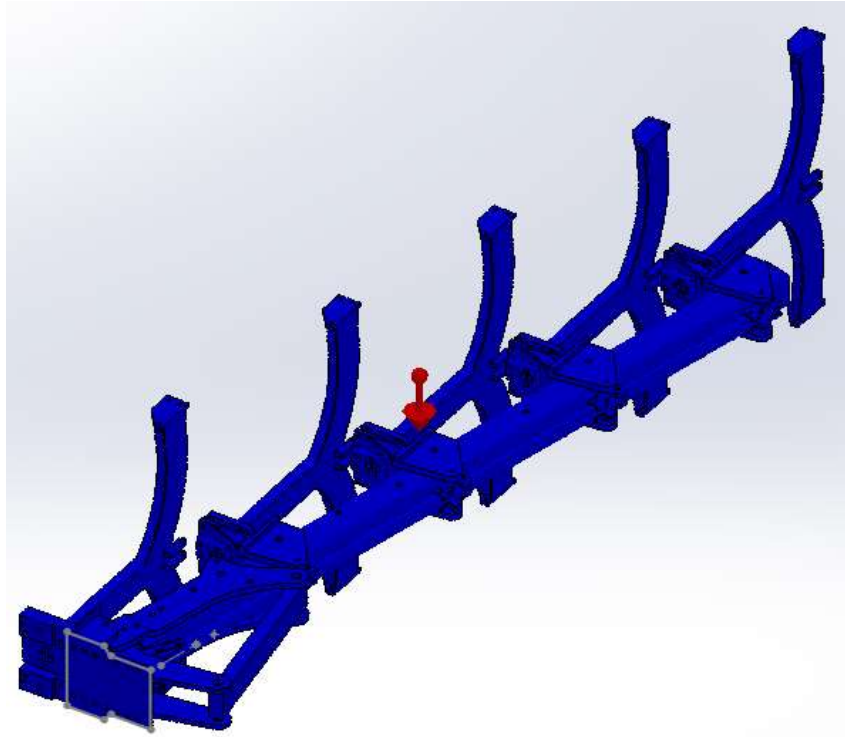


Figura 87: Factor de seguridad, anchura mínima, velocidad media, suelo arenoso.

### E.3.1.2. Velocidad máxima

#### E.3.1.2.1. Suelo limoso

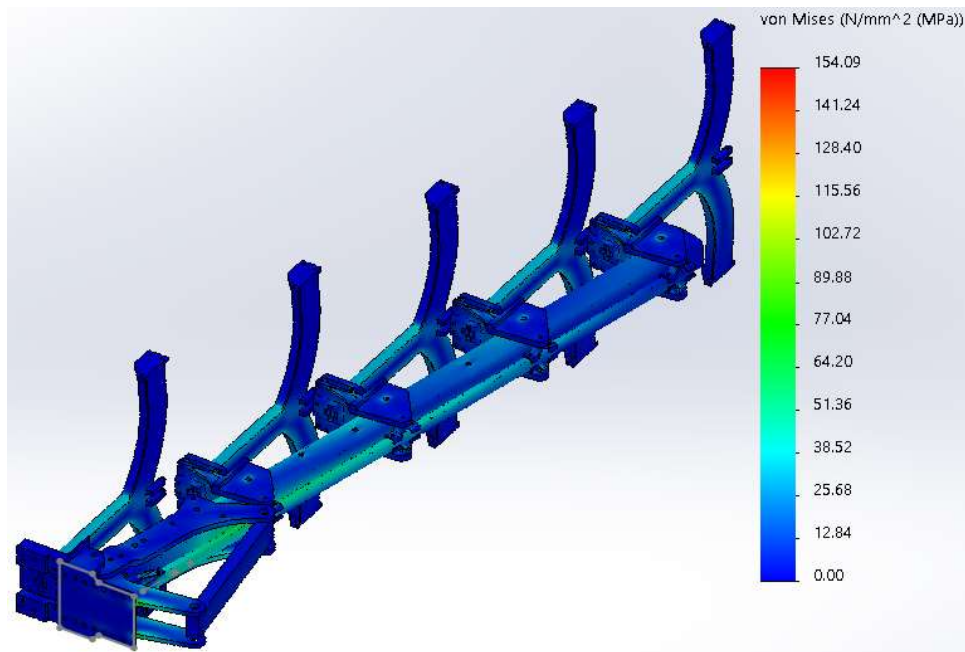


Figura 88: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad máxima, suelo limoso.



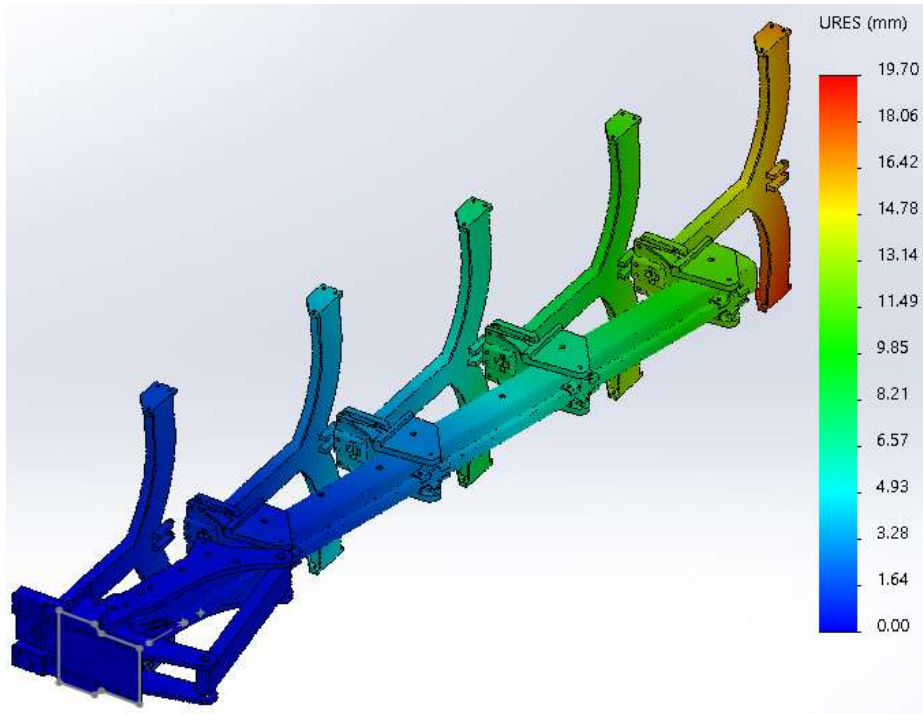


Figura 89: Desplazamientos, anchura mínima, velocidad máxima, suelo limoso.

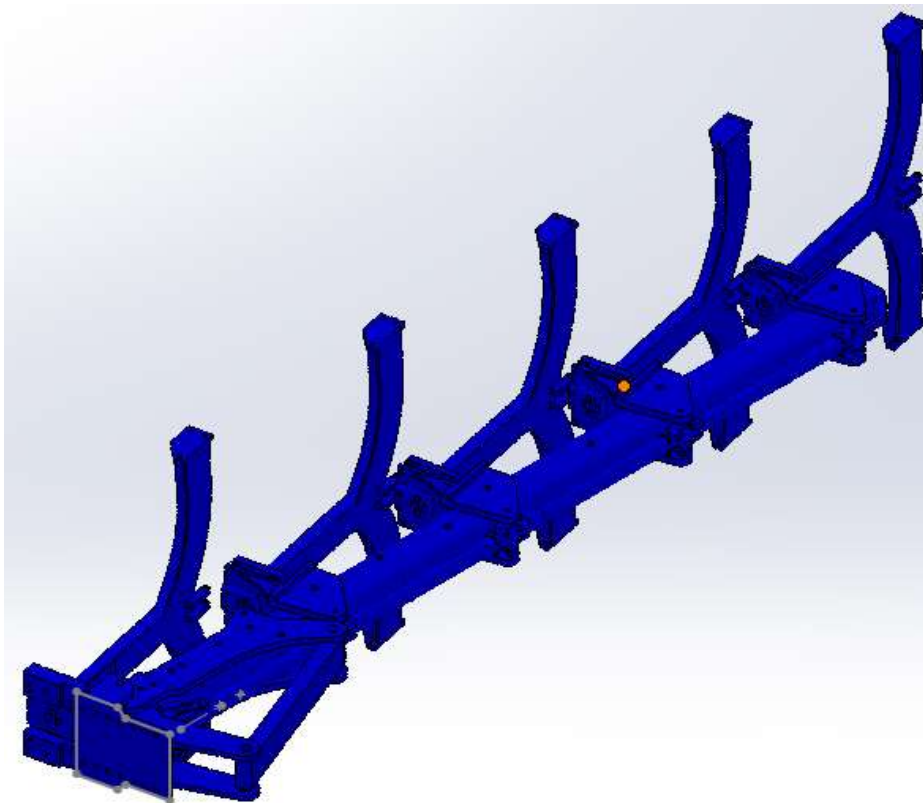


Figura 90: Factor de seguridad, anchura mínima, velocidad máxima, suelo limoso.

E.3.1.2.2 Suelo franco

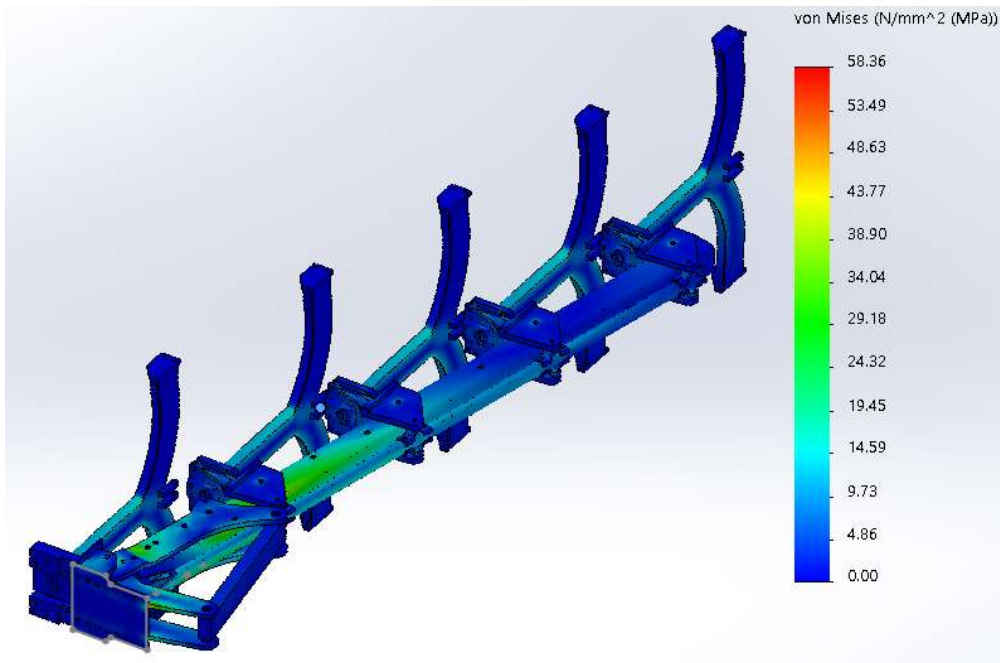


Figura 91: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad máxima, suelo franco.

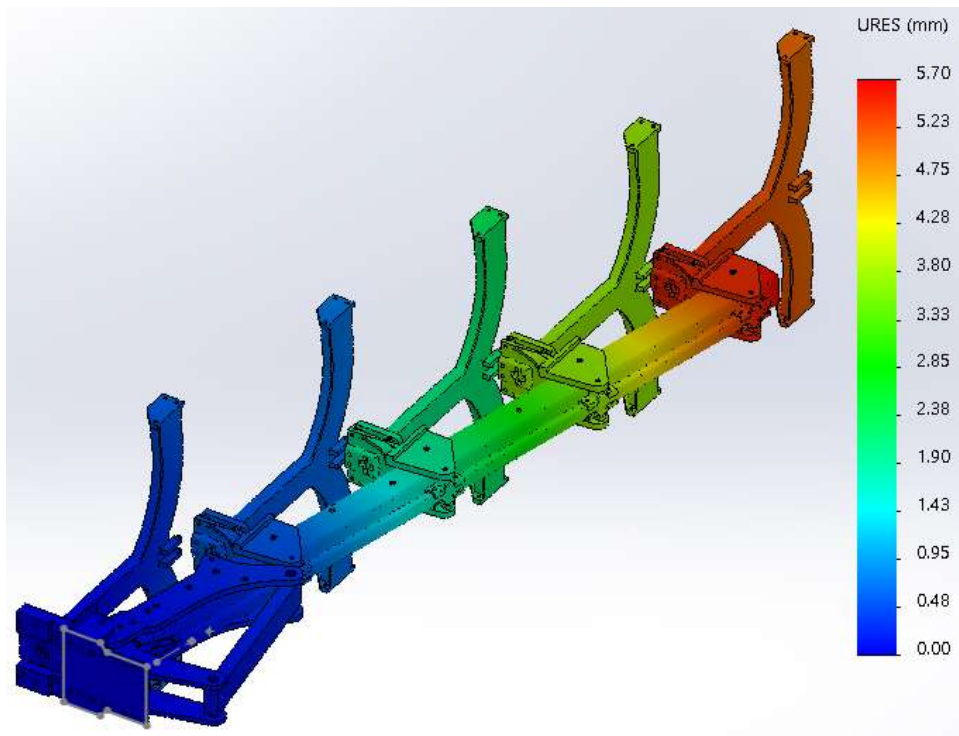


Figura 92: Desplazamientos, anchura mínima, velocidad máxima, suelo franco.

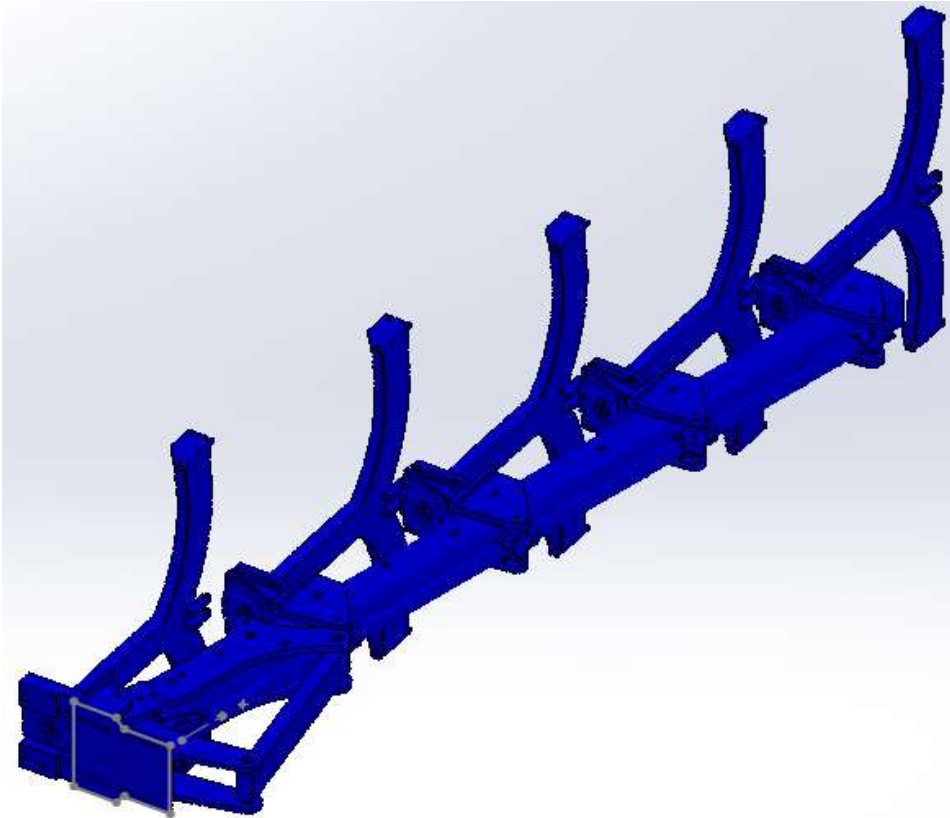


Figura 93: Factor de seguridad, anchura mínima, velocidad máxima, suelo franco.

### E.3.1.2.3. Suelo arenoso

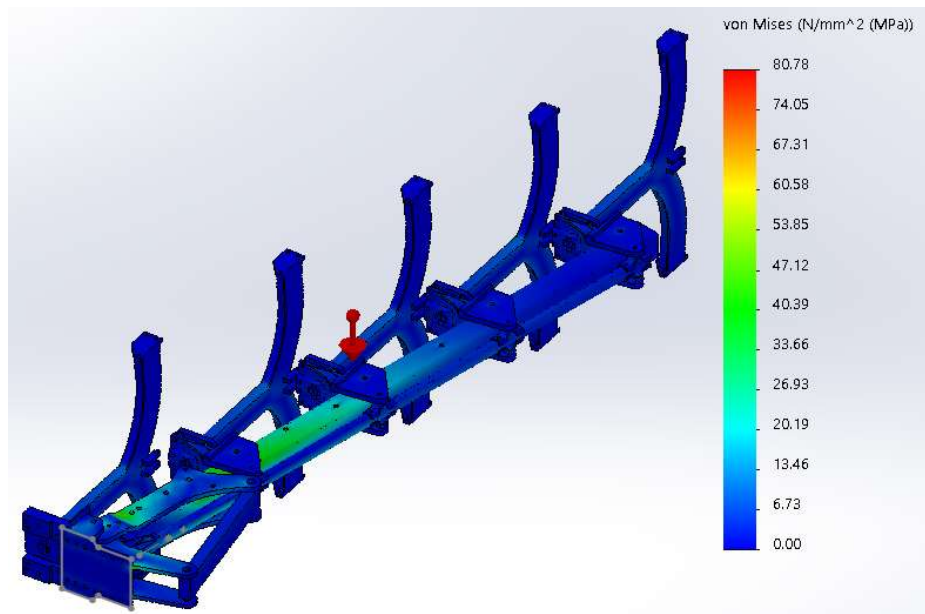


Figura 94: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad máxima, suelo arenoso.

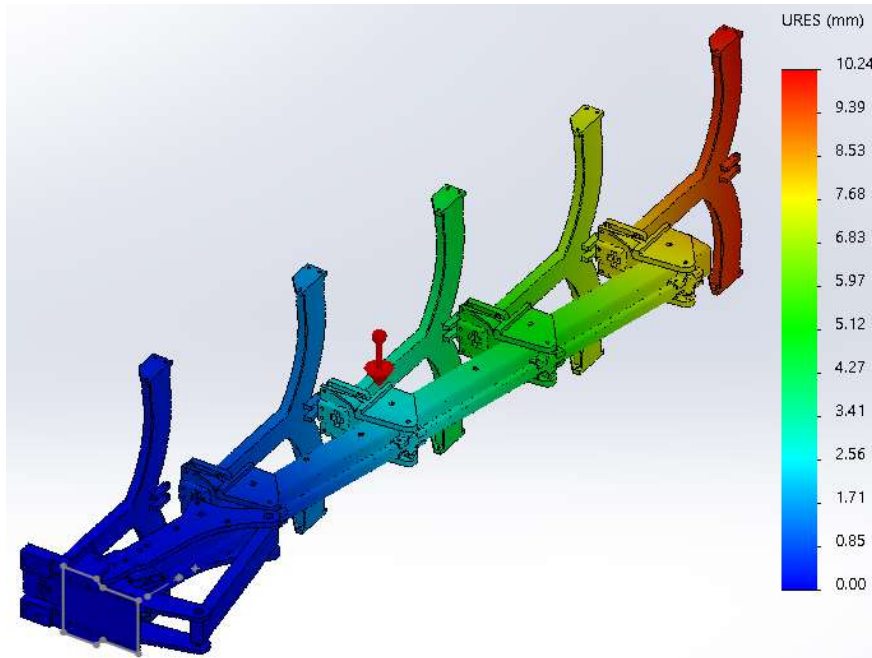


Figura 95: Desplazamientos, anchura mínima, velocidad máxima, suelo arenoso.

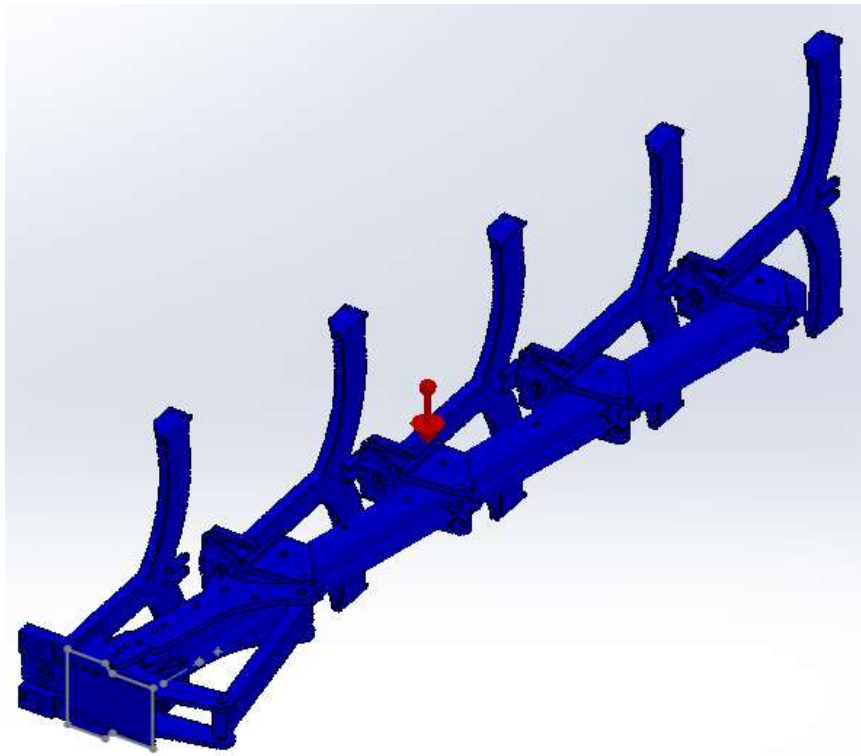


Figura 96: Factor de seguridad, anchura mínima, velocidad máxima, suelo arenoso.

E.3.2. Modelo trabajando a máxima profundidad y anchura máxima

E.3.2.1. Velocidad media

E.3.2.1.1 Suelo limoso

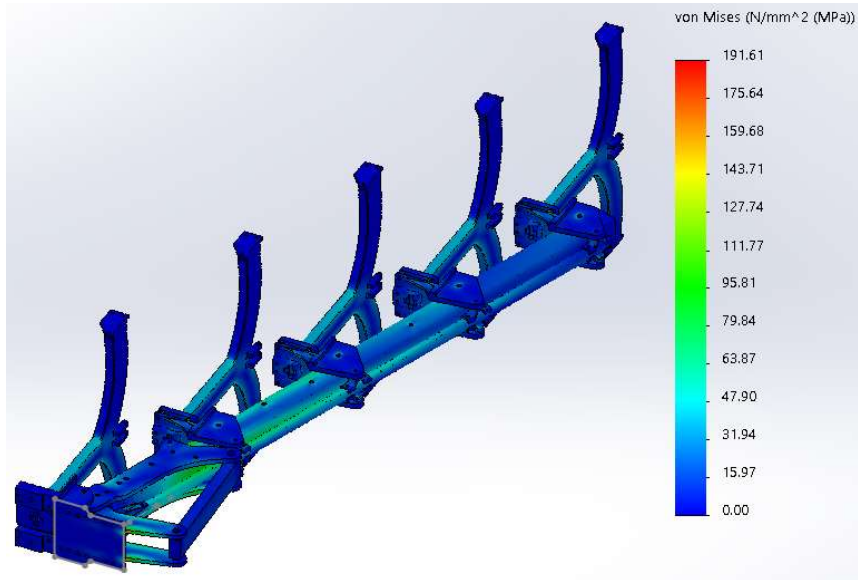


Figura 97: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad mínima, suelo limoso.

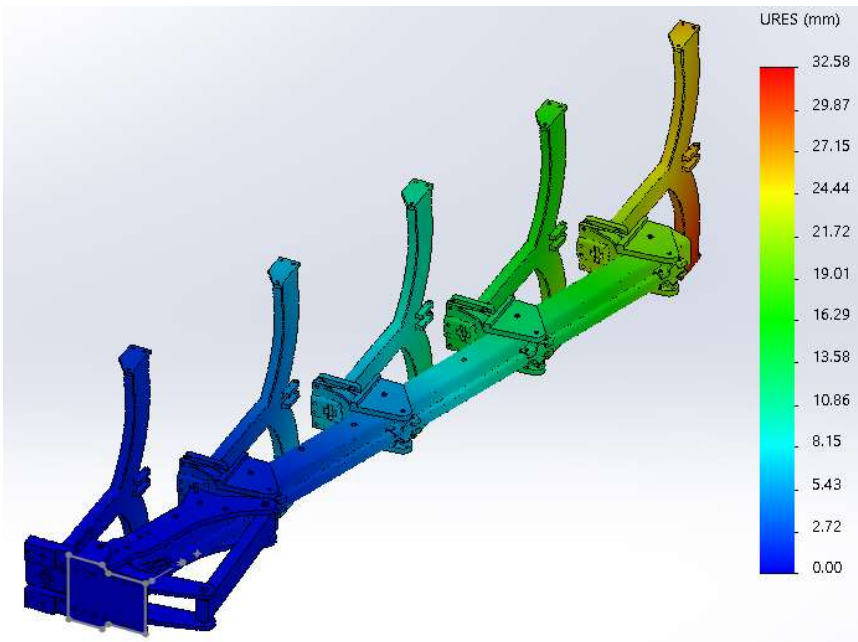


Figura 98: Desplazamientos, anchura máxima, velocidad mínima, suelo limoso.

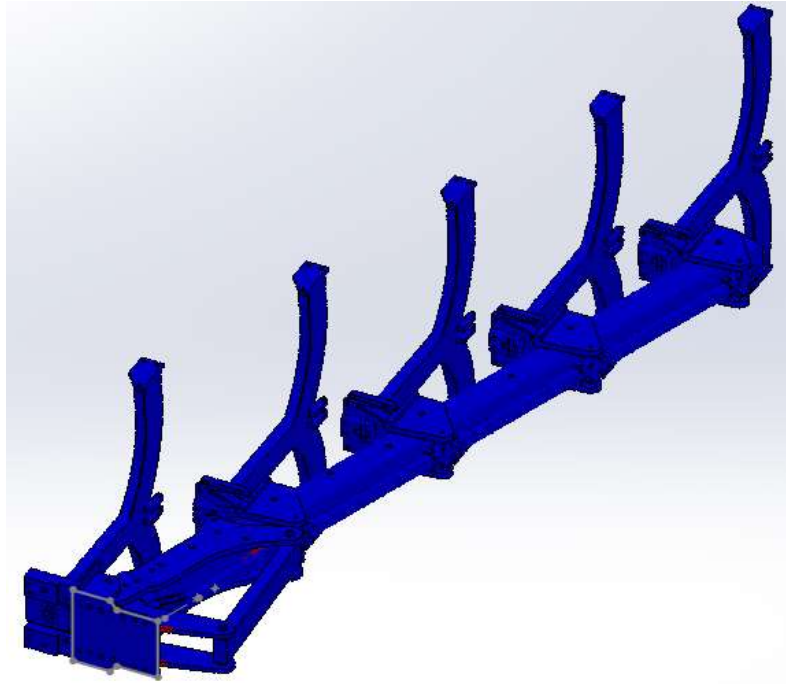


Figura 99: Factor de seguridad, anchura máxima, velocidad mínima, suelo limoso.

#### E.3.2.1.2. Suelo franco

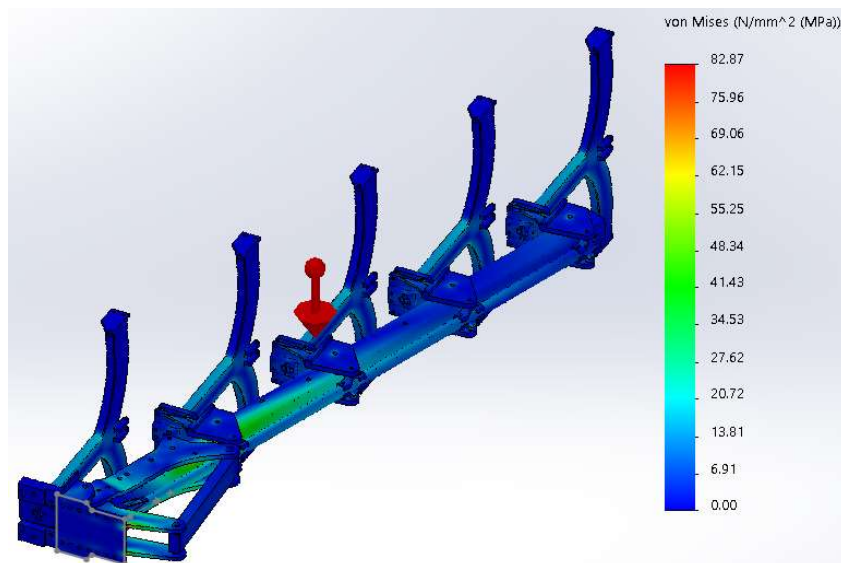


Figura 100: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad mínima, suelo franco.

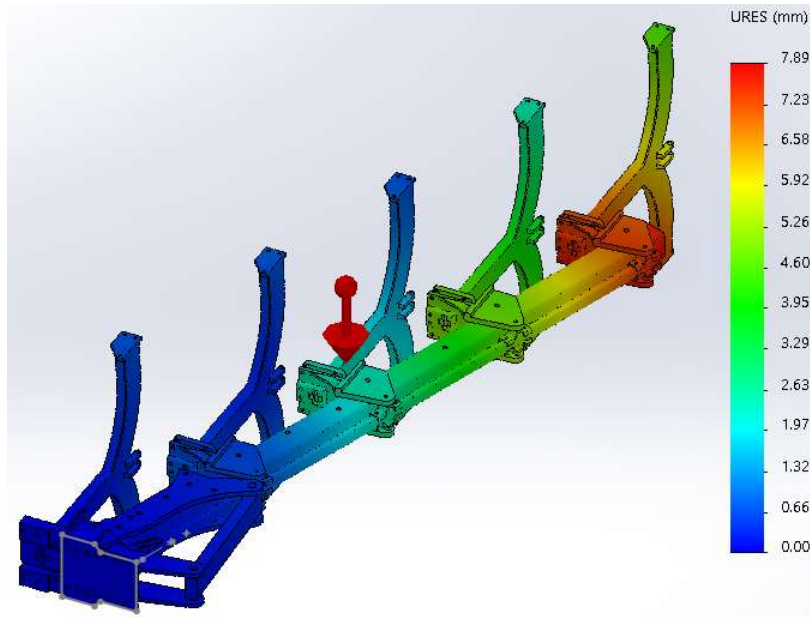


Figura 101: Desplazamientos, anchura máxima, velocidad mínima, suelo franco.

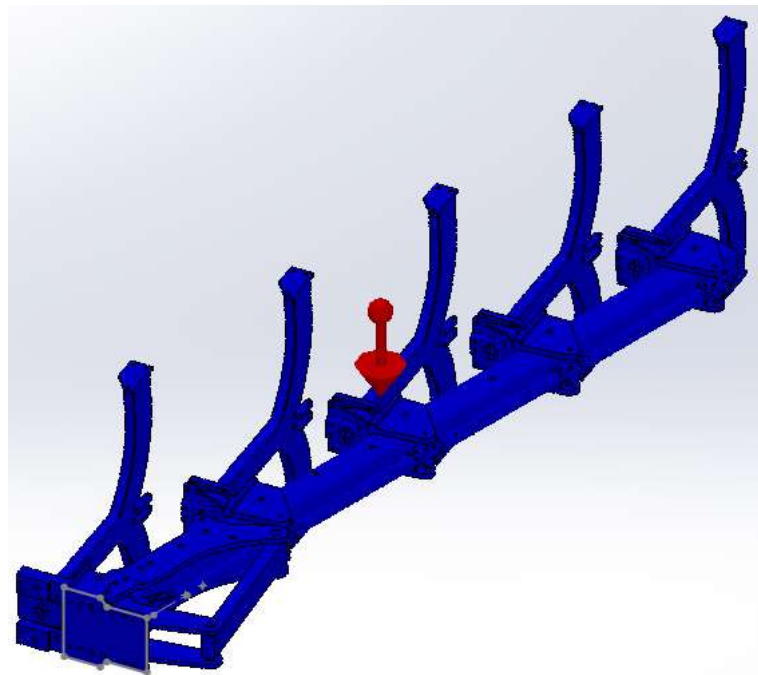


Figura 102: Factor de seguridad, anchura máxima, velocidad mínima, suelo franco.

E.3.2.1.3. Suelo arenoso

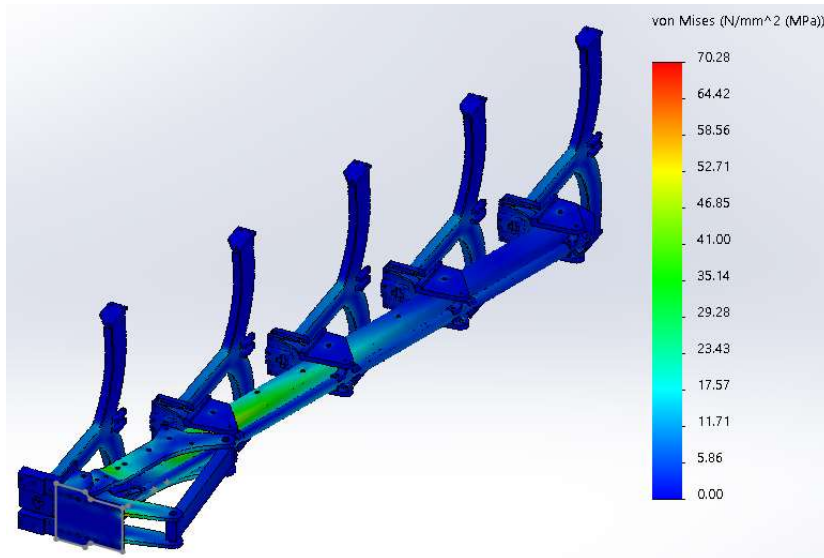


Figura 103: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad mínima, suelo arenoso.

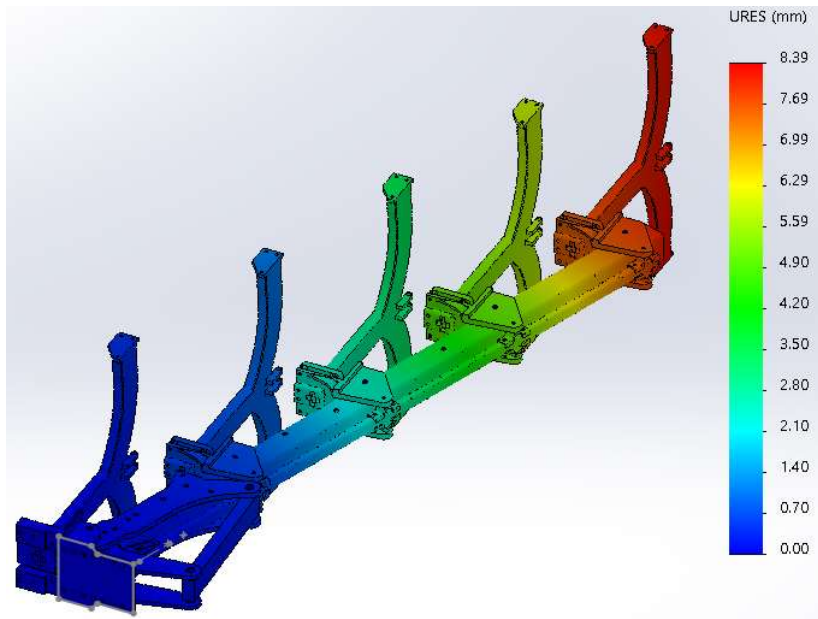


Figura 104: Desplazamientos, anchura máxima, velocidad mínima, suelo arenoso.



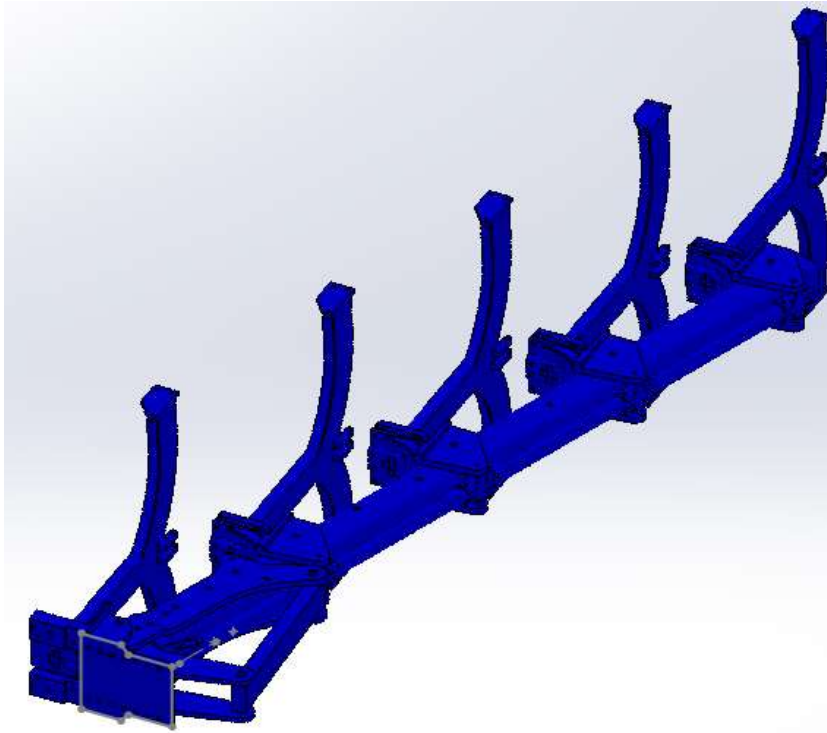


Figura 105: Factor de seguridad, anchura máxima, velocidad mínima, suelo arenoso.

### E.3.2.2. Velocidad máxima

#### E.3.2.2.1. Suelo limoso

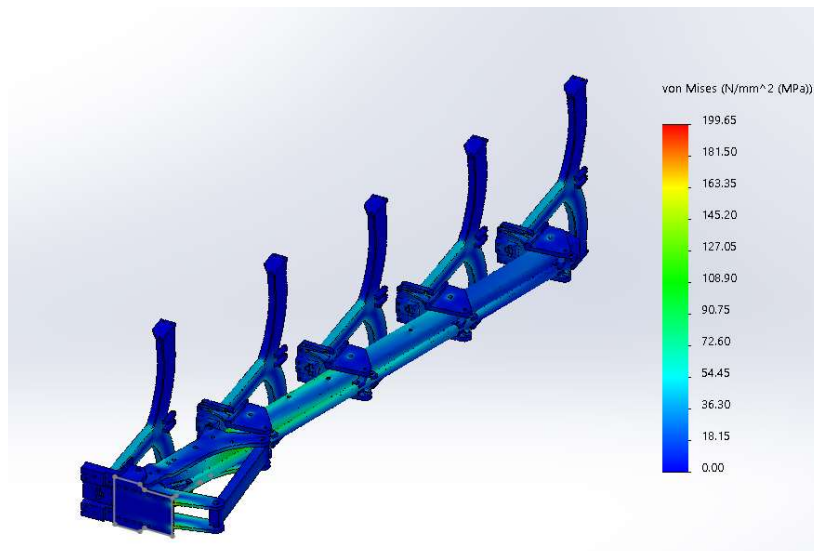


Figura 106: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso.

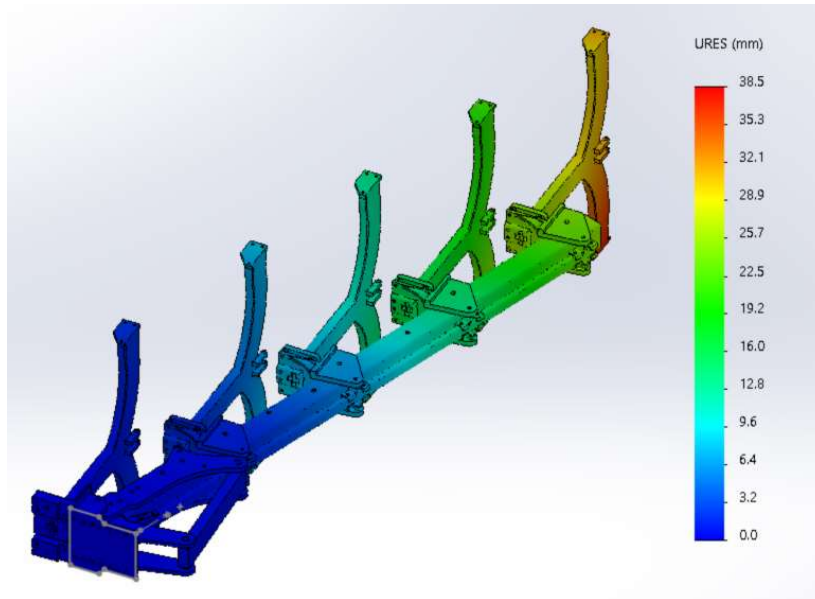


Figura 107: Desplazamientos, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso.

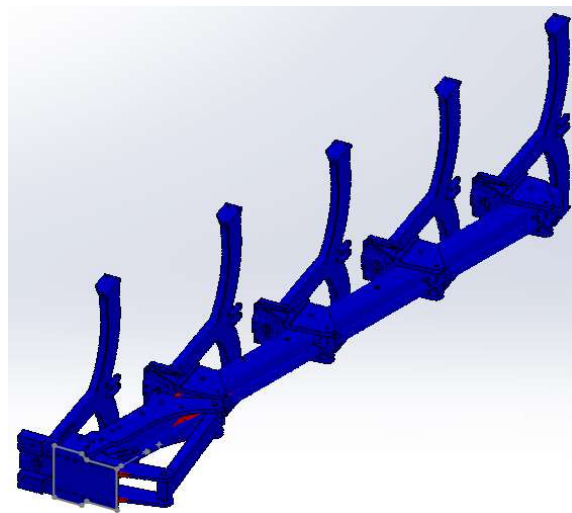


Figura 108: Factor de seguridad, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso.

E.3.2.2.2. Suelo franco

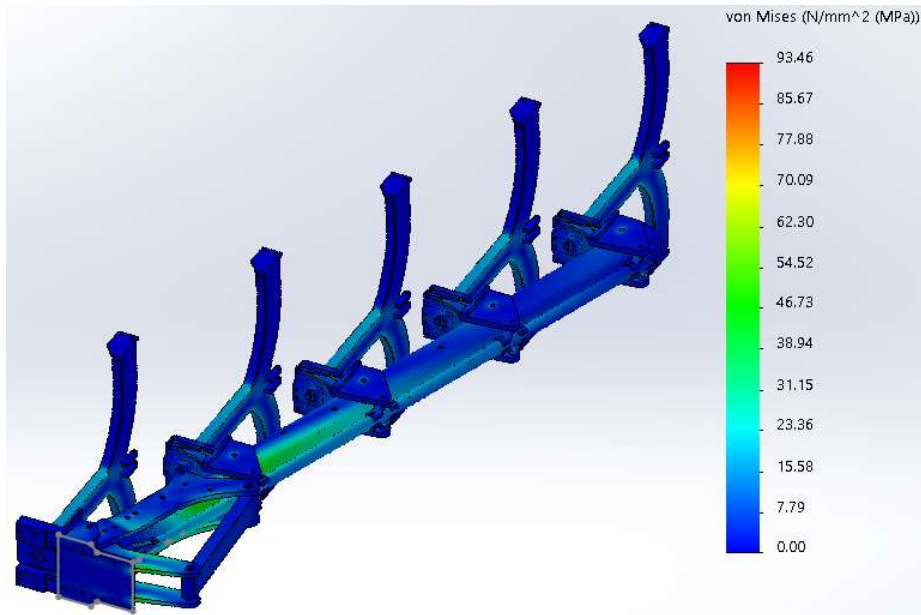


Figura 109: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo franco.

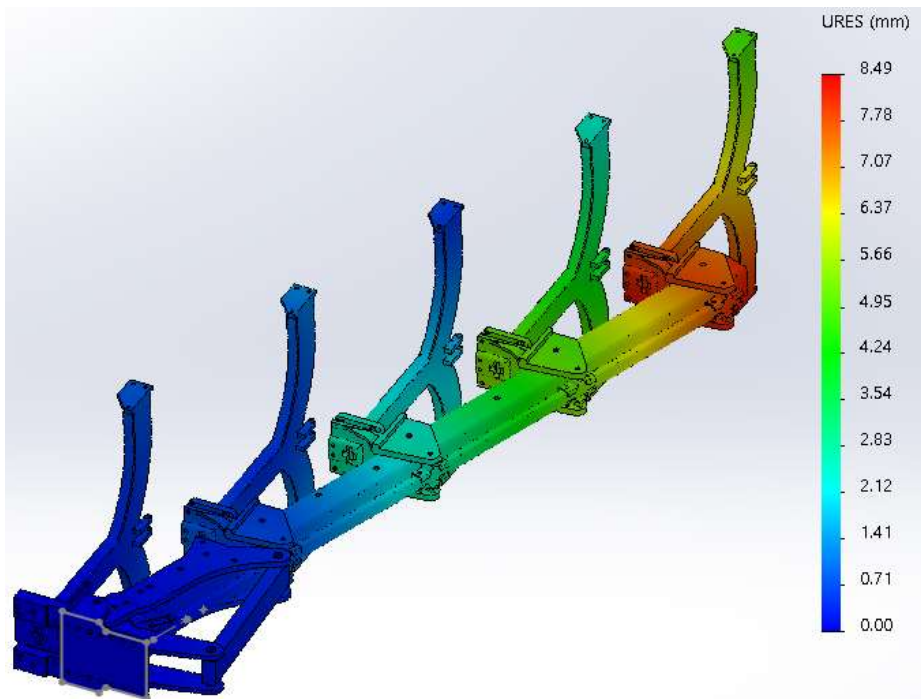


Figura 110: Desplazamientos, anchura máxima, velocidad máxima, suelo franco.

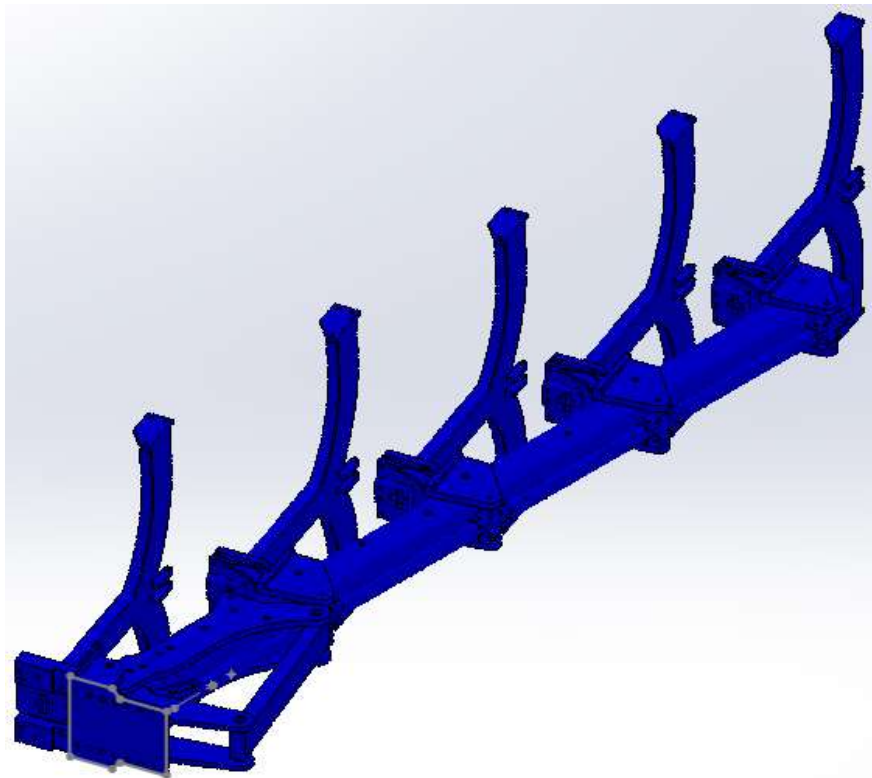


Figura 111: Factor de seguridad, anchura máxima, velocidad máxima, suelo franco.

#### E.3.2.2.3. Suelo arenoso

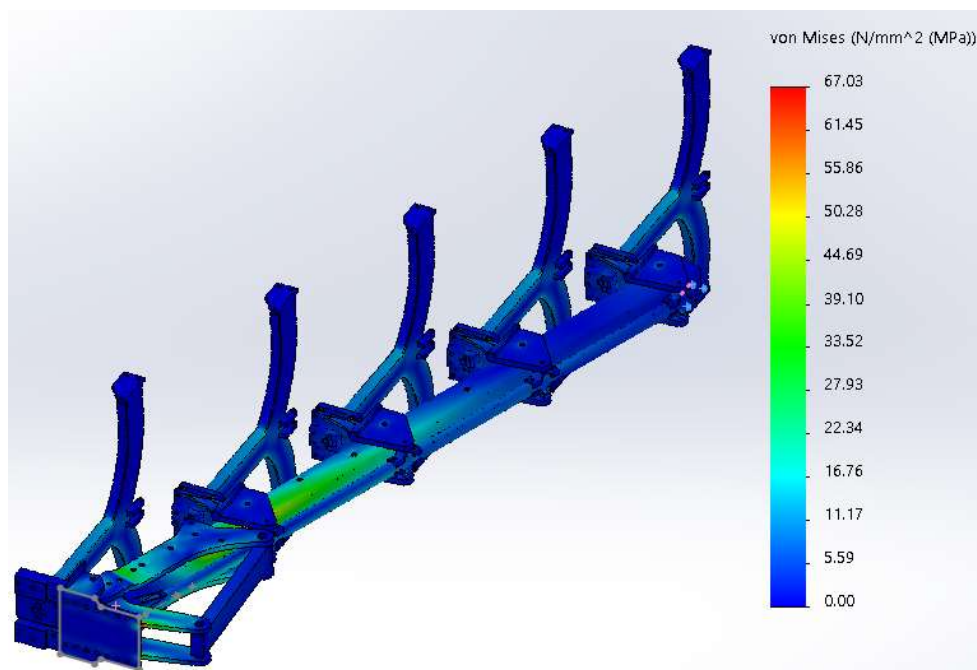


Figura 112: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo arenoso.

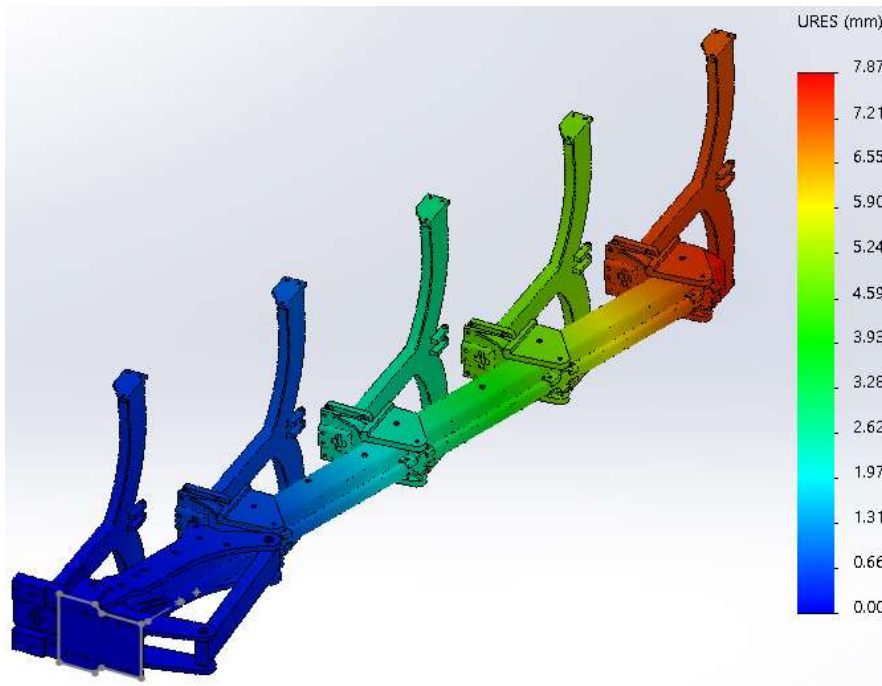


Figura 113: Desplazamientos, anchura máxima, velocidad máxima, suelo arenoso.

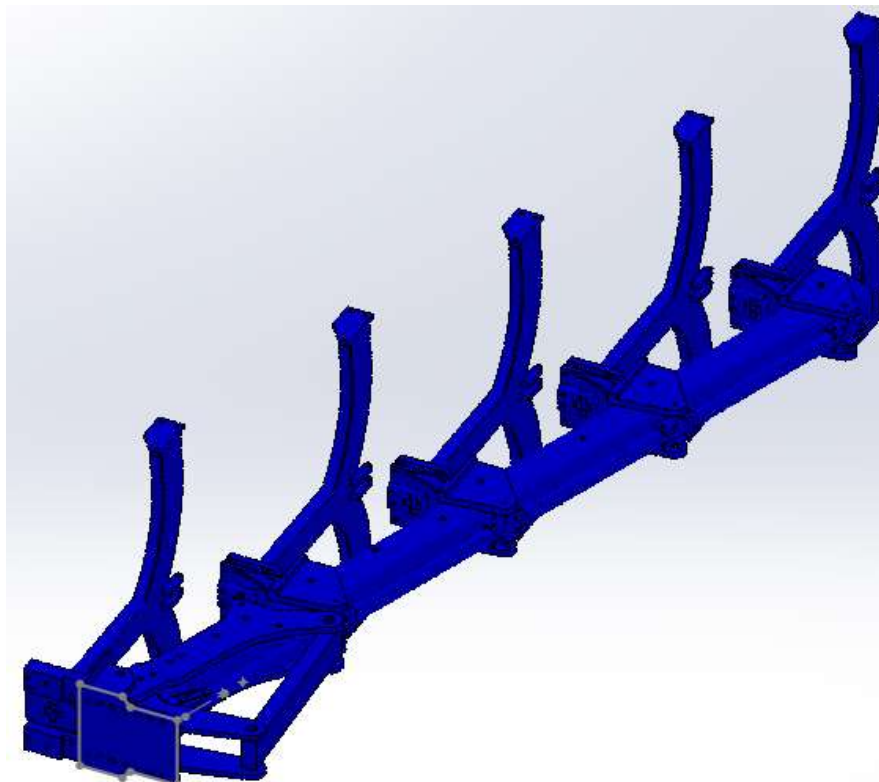


Figura 114: Factor de seguridad, anchura máxima, velocidad máxima, suelo arenoso.

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Arado de vertedera fijo. ....  | 2  |
| Figura 2: Arado de vertedera reversible. ....  | 3  |
| Figura 3: Partes básicas de un arado de vertedera. ....  | 4  |
| Figura 4: Conjunto reja vertedera. ....  | 4  |
| Figura 5: Tipos de vertederas (izquierda) y tipos de reja (derecha). ....  | 5  |
| Figura 6: Arado real. ....   | 6  |
| Figura 7: Modelo 3D. ....  | 7  |
| Figura 8: Modelo 3D para el análisis. ....   | 7  |
| Figura 9: Partes que componen el chasis. ....  | 8  |
| Figura 10: Partes que componen el conjunto reja vertedera. ....  | 8  |
| Figura 11: Malla gruesa. ....  | 9  |
| Figura 12: Análisis de las tensiones para establecer controles de mallado. ....  | 10 |
| Figura 13: Sujeción fija en cabezal fijo. ....   | 11 |
| Figura 14: Conexiones conector tipo pasador. ....  | 12 |
| Figura 15: Detalle del conector tipo pasador. ....   | 12 |
| Figura 16: Conexiones contacto sin penetración. ....   | 13 |
| Figura 17: Detalle de dos componentes que poseen giro relativo. ....   | 13 |
| Figura 18: Pieza con la que se varía la anchura del apero. ....  | 15 |
| Figura 19: Anchura mínima 1135mm. ....   | 16 |
| Figura 20: Anchura máxima 1520. ....   | 16 |
| Figura 21: Cargas aplicadas para el análisis del arado de vertedera en voladizo. ....                                      | 17 |
| Figura 22: Cargas aplicadas para el análisis del arado de vertedera trabajando a profundidad máxima y anchura mínima. .... | 18 |
| Figura 23: Cargas aplicadas para el análisis del arado de vertedera trabajando a profundidad máxima y anchura máxima. .... | 19 |
| Figura 24: Tensión máxima de Von Mises, anchura máxima, voladizo. ....   | 20 |
| Figura 25: Desplazamientos, anchura máxima, voladizo. ....   | 20 |
| Figura 26: Factor de seguridad, anchura máxima, voladizo. ....   | 21 |
| Figura 27: Tensión máxima de Von Mises, anchura mínima, voladizo. ....   | 22 |
| Figura 28: Desplazamientos, anchura mínima, voladizo. ....   | 22 |
| Figura 29: Factor de seguridad, anchura mínima, voladizo. ....   | 23 |
| Figura 30: Distancia entre el cabezal fijo y el extremo final de la viga centran, con el apero en anchura máxima. ....     | 33 |
| Figura 31: Distancia entre el cabezal fijo y el extremo final de la viga centran, con el apero en anchura mínima. ....     | 33 |
| Figura 32: Anchura máxima. ....  | 34 |
| Figura 33: Anchura mínima. ....  | 34 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 34: Espesor viga central, 6.5mm (izquierda) 10 mm (derecha).....   | 38 |
| Figura 35: Refuerzo viga central (1000x110x20mm) .....  | 38 |
| Figura 36: Posicionamiento refuerzo viga central.....   | 39 |
| Figura 37: Espesor viga lateral, 5mm (izquierda) 8 mm (derecha).....  | 39 |
| Figura 38: Puntos críticos del cabezal fijo. ....   | 40 |
| Figura 39: Espesor orejetas cabezal fijo, 23mm (izquierda) 20 mm (derecha).....                                       | 40 |
| Figura 40: Suavizado de la unión de las orejetas. ....  | 40 |
| Figura 41: Espesor unión cabezal fijo-viga central, 25mm (arriba) 30mm (abajo). ....                                  | 41 |
| Figura 42: Unión cabezal fijo-viga central, Taladros para distribución de tensiones. ....                             | 41 |
| Figura 43: Separadores añadidos para distribución de tensiones. ....  | 42 |
| Figura 44: Tensión máxima de Von Mises, anchura mínima, voladizo, Tras la optimización. ..                            | 42 |
| Figura 45: Desplazamientos, anchura mínima, voladizo, Tras la optimización.....                                       | 43 |
| Figura 46: Factor de seguridad, anchura mínima, voladizo, Tras la optimización.....                                   | 43 |
| Figura 47: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso, Tras la optimización. .... | 44 |
| Figura 48: Desplazamientos, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso, Tras la optimización. ....                | 45 |
| Figura 49: Factor de seguridad, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso, Tras la optimización.....             | 45 |
| Figura 50: Arado de timón. ....   | 51 |
| Figura 51: Arado de vertedera antiguo.....  | 51 |
| Figura 52: Bernete.....   | 52 |
| Figura 53: Arado rusá.....  | 52 |
| Figura 54: Viga central.....  | 53 |
| Figura 55: Viga central aislada.....  | 53 |
| Figura 56: Viga lateral.....  | 54 |
| Figura 57: Viga lateral aislada. ....   | 54 |
| Figura 58: Unión viga central-viga lateral-brazo. ....  | 55 |
| Figura 59: Unión viga central-viga lateral-brazo vista detallada .....  | 55 |
| Figura 60: Cuerpos del arado. ....  | 56 |
| Figura 61: Conjunto reja-vertedera unido al brazo. ....   | 56 |
| Figura 62: Cabezal fijo.....  | 57 |
| Figura 63: Cabezal fijo vista detallada.....  | 57 |
| Figura 64: Unión cabezal fijo-viga central.....   | 58 |
| Figura 65: Unión cabezal fijo-viga central vista detallada.....   | 58 |
| Figura 66: Unión viga lateral-cuerpo. ....  | 59 |
| Figura 67: Unión viga lateral-cuerpo vista detallada. ....  | 59 |
| Figura 68: Unión viga lateral-cabezal fijo.....   | 60 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 69: Unión viga lateral-cabezal fijo vista detallada.....   | 60 |
| Figura 70: Separadores cuerpo.....  | 61 |
| Figura 71: Separadores cuerpo vista detallada.....  | 61 |
| Figura 72: Conjunto reja-vertedera.....   | 62 |
| Figura 73: Puntera (azul) y reja (verde).....   | 62 |
| Figura 74: Cuchilla vertical.....   | 63 |
| Figura 75: Vertedera.....   | 63 |
| Figura 76: Protector vertedera.....   | 64 |
| Figura 77: Unión conjunto reja-vertedera con cuerpo.....  | 64 |
| Figura 78: Variación de las fuerzas resistentes del suelo en función de la humedad. LL = Límite líquido. LP = Límite plástico. LR = Límite de refracción..... | 66 |
| Figura 79: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad media, suelo limoso.....   | 77 |
| Figura 80: Desplazamientos, anchura mínima, velocidad media, suelo limoso.....  | 77 |
| Figura 81: Factor de seguridad, anchura mínima, velocidad media, suelo limoso.....  | 78 |
| Figura 82: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad media, suelo franco.....   | 78 |
| Figura 83: Desplazamientos, anchura mínima, velocidad media, suelo franco.....  | 79 |
| Figura 84: Factor de seguridad, anchura mínima, velocidad media, suelo franco.....  | 79 |
| Figura 85: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad media, suelo arenoso.....  | 80 |
| Figura 86: Desplazamientos, anchura mínima, velocidad media, suelo arenoso.....   | 80 |
| Figura 87: Factor de seguridad, anchura mínima, velocidad media, suelo arenoso.....   | 81 |
| Figura 88: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad máxima, suelo limoso.....  | 81 |
| Figura 89: Desplazamientos, anchura mínima, velocidad máxima, suelo limoso.....   | 82 |
| Figura 90: Factor de seguridad, anchura mínima, velocidad máxima, suelo limoso.....   | 82 |
| Figura 91: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad máxima, suelo franco.....  | 83 |
| Figura 92: Desplazamientos, anchura mínima, velocidad máxima, suelo franco.....   | 83 |
| Figura 93: Factor de seguridad, anchura mínima, velocidad máxima, suelo franco.....   | 84 |
| Figura 94: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad máxima, suelo arenoso.....   | 84 |
| Figura 95: Desplazamientos, anchura mínima, velocidad máxima, suelo arenoso.....  | 85 |
| Figura 96: Factor de seguridad, anchura mínima, velocidad máxima, suelo arenoso.....  | 85 |
| Figura 97: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad mínima, suelo limoso.....  | 86 |
| Figura 98: Desplazamientos, anchura máxima, velocidad mínima, suelo limoso.....   | 86 |
| Figura 99: Factor de seguridad, anchura máxima, velocidad mínima, suelo limoso.....   | 87 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 100: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad mínima, suelo franco. ....  | 87 |
| Figura 101: Desplazamientos, anchura máxima, velocidad mínima, suelo franco. ....                 | 88 |
| Figura 102: Factor de seguridad, anchura máxima, velocidad mínima, suelo franco. ....             | 88 |
| Figura 103: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad mínima, suelo arenoso. .... | 89 |
| Figura 104: Desplazamientos, anchura máxima, velocidad mínima, suelo arenoso. ....                | 89 |
| Figura 105: Factor de seguridad, anchura máxima, velocidad mínima, suelo arenoso. ....            | 90 |
| Figura 106: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso. ....  | 90 |
| Figura 107: Desplazamientos, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso. ....                 | 91 |
| Figura 108: Factor de seguridad, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso. ....             | 91 |
| Figura 109: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo franco. ....  | 92 |
| Figura 110: Desplazamientos, anchura máxima, velocidad máxima, suelo franco. ....                 | 92 |
| Figura 111: Factor de seguridad, anchura máxima, velocidad máxima, suelo franco. ....             | 93 |
| Figura 112: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo arenoso. .... | 93 |
| Figura 113: Desplazamientos, anchura máxima, velocidad máxima, suelo arenoso. ....                | 94 |
| Figura 114: Factor de seguridad, anchura máxima, velocidad máxima, suelo arenoso. ....            | 94 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: Características del arado real. ....  | 6  |
| Tabla 2: Materiales del chasis del arado. ....   | 9  |
| Tabla 3: Superficies de labor por brazo. ....  | 14 |
| Tabla 4: Fuerzas por unidad de superficie en función de la velocidad. ....   | 14 |
| Tabla 5: Continuación. ....  | 15 |
| Tabla 6: Continuación. ....  | 15 |
| Tabla 7: Peso rueda y conjunto reja vertedera. ....  | 17 |
| Tabla 8: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, voladizo. ....  | 21 |
| Tabla 9: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, voladizo. ....  | 23 |
| Tabla 10: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad media, suelo limoso. ....                        | 24 |
| Tabla 11: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad media, suelo franco. ....                        | 25 |
| Tabla 12: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad media, suelo arenoso. ....                       | 26 |
| Tabla 13: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad máxima, suelo limoso. ....                       | 26 |
| Tabla 14: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad máxima, suelo franco. ....                       | 27 |
| Tabla 15: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, velocidad máxima, suelo arenoso. ....                      | 28 |
| Tabla 16: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad media, suelo limoso. ....                        | 29 |
| Tabla 17: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad media, suelo franco. ....                        | 29 |
| Tabla 18: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad media, suelo arenoso. ....                       | 30 |
| Tabla 19: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso. ....                       | 31 |
| Tabla 20: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo franco. ....                       | 31 |
| Tabla 21: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo arenoso. ....                      | 32 |
| Tabla 22: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, voladizo. ....   | 36 |
| Tabla 23: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso. ....                       | 36 |
| Tabla 24: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso, Tras la optimización. .... | 37 |
| Tabla 25: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, voladizo, Tras la optimización. ....                       | 37 |

Tabla 26: Tensiones máximas de Von Mises, anchura mínima, voladizo, Tras la optimización. .... 44

Tabla 27: Tensiones máximas de Von Mises, anchura máxima, velocidad máxima, suelo limoso, Tras la optimización. .... 46