



# MÁSTER EN SISTEMAS FERROVIARIOS

## TRABAJO FIN DE MÁSTER

### ESTUDIO ESTÁTICO DE LAS SOLICITACIONES MECÁNICAS EN UN DISEÑO DE UTILLAJE VOLTEADOR DE BOGIES MEDIANTE SOFTWARE CAD-FEM

CURSO ACADÉMICO 2016 – 2017

AUTOR: ROBERTO VICENTE FABREGAT

DIRECTOR: JOSÉ BORRAJO MORA (PATENTES TALGO S.L.U)

## FICHA TÉCNICA

AUTOR: Roberto Vicente Fabregat

DIRECTOR: José Borrajo Mora

PROGRAMA CURSADO: Máster en Sistemas Ferroviarios 2016 - 2017

TÍTULO: Estudio estático de las solicitaciones mecánicas en un diseño de utillaje volteador de bogies mediante software CAD-FEM.

IDEAS DESARROLLADAS: En el Trabajo Fin de Máster se trata de dar unas pautas paso a paso de cómo realizar el estudio de las solicitaciones mecánicas a realizar para comprobar el diseño de un útil realizado en el software de Diseño Asistido por Ordenador (CAD) a través del módulo de cálculo de elementos finitos (FEM) incluido en el programa.

Se mostrarán las etapas necesarias, como el modelado de las piezas y el ensamblaje de las mismas para que, una vez completado el útil se proceda al estudio de las solicitaciones.

En el estudio se tratará de forma ordenada con imágenes y explicaciones los pasos a seguir para seleccionar el material de cada una de las piezas.

Se definirán los contactos entre las diferentes piezas.

Se impondrán las sujeciones necesarias.

Se estudiarán las cargas externas necesarias para simular la realidad.

Se procederá a detallar el paso de mallado.

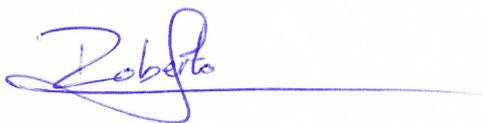
Se ejecutará un cálculo de resultados. Además, una vez obtenidos los primeros resultados se sacará el factor de seguridad del útil.

Se comprobará el diseño analizando los resultados arrojados por el estudio. En este apartado se verá cómo a partir de los resultados podremos indicar si el útil soportará las solicitaciones a las que será sometido en servicio.

Se procederá a realizar las conclusiones obtenidas en el estudio, valorando tanto el diseño del útil como la herramienta informática empleada.

Para finalizar, se enumerarán las aportaciones realizadas con el trabajo, buscando ser de utilidad para futuros estudios de diseños, con las ventajas que nos ofrecen las herramientas informáticas actuales en las etapas de diseño.

FIRMA DEL AUTOR:



FIRMA DEL DIRECTOR:





## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| 1.RESUMEN .....  | 2  |
| 2.INTRODUCCIÓN .....                                   | 2  |
| 2.1 TALGO 250 (SERIE 130 Y 730 DE RENFE) .....         | 4  |
| 2.2 BASTIDOR DE BOGIE TALGO 250 Y TALGO 250 DUAL ..... | 5  |
| 2.3 GATO VOLTEADOR GOMIL GV-04.17 .....                | 7  |
| 3.OBJETIVOS .....                                      | 8  |
| 4.TAREAS .....   | 8  |
| 5.PLANIFICACIÓN .....                                  | 9  |
| 6.DESARROLLO .....                                     | 9  |
| 6.1.MODELAJE .....                                     | 9  |
| 6.2.ENSAMBLAJE .....                                   | 12 |
| 6.3 ESTUDIO DE SOLICITACIONES MECÁNICAS .....          | 13 |
| 6.3.1 Tensiones.....                                   | 23 |
| 6.3.2 Factor de seguridad.....                         | 26 |
| 6.3.3 Deformaciones .....                              | 29 |
| 6.4 RESULTADOS .....                                   | 31 |
| 6.4.1 Supuesto 1: masa de 5 kg.....                    | 31 |
| 6.4.2 Supuesto 2: masa de 1500 kg.....                 | 37 |
| 7. CONCLUSIONES .....                                  | 43 |
| 8. APORTACIONES .....                                  | 44 |
| 9. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO .....                     | 45 |
| 10.BIBLIOGRAFÍA.....                                   | 45 |

## 1.RESUMEN

En el presente Trabajo de Fin de Máster se expondrá una guía de las comprobaciones a realizar en el diseño de un útil que facilite el volteo del bastidor de bogie sin interferir con ninguna parte de este y pudiendo tener instalados algunos componentes del sistema de freno y cableado. Para ello, se modelará con el software Solidworks un útil en 3D y posteriormente se simulará la respuesta a las sollicitaciones mecánicas. Por último, se enumerarán las conclusiones y aportaciones del estudio realizado.

## 2.INTRODUCCIÓN

En el Trabajo Fin de Máster se va a realizar el estudio del diseño de un útil para voltear un bastidor de bogie. A continuación, se va a realizar una descripción de qué es un bastidor de bogie.

Un bogie es un dispositivo giratorio formado por un conjunto de ejes paralelos y solidarios entre sí sobre los que se apoya la caja. Es el invento que dio solución a los problemas que presentan los ejes simples cuando se quiere aumentar la velocidad y la comodidad en marcha. Con los ejes simples se dieron cuenta que se ganaba estabilidad a medida que se aumentaba la distancia entre ellos, y que, al alejar los ejes, la inscripción en curva empeoraba. Pero en el caso de disminuir la distancia entre ejes, la inscripción en curva mejoraba en contra de la estabilidad en recta a alta velocidad.

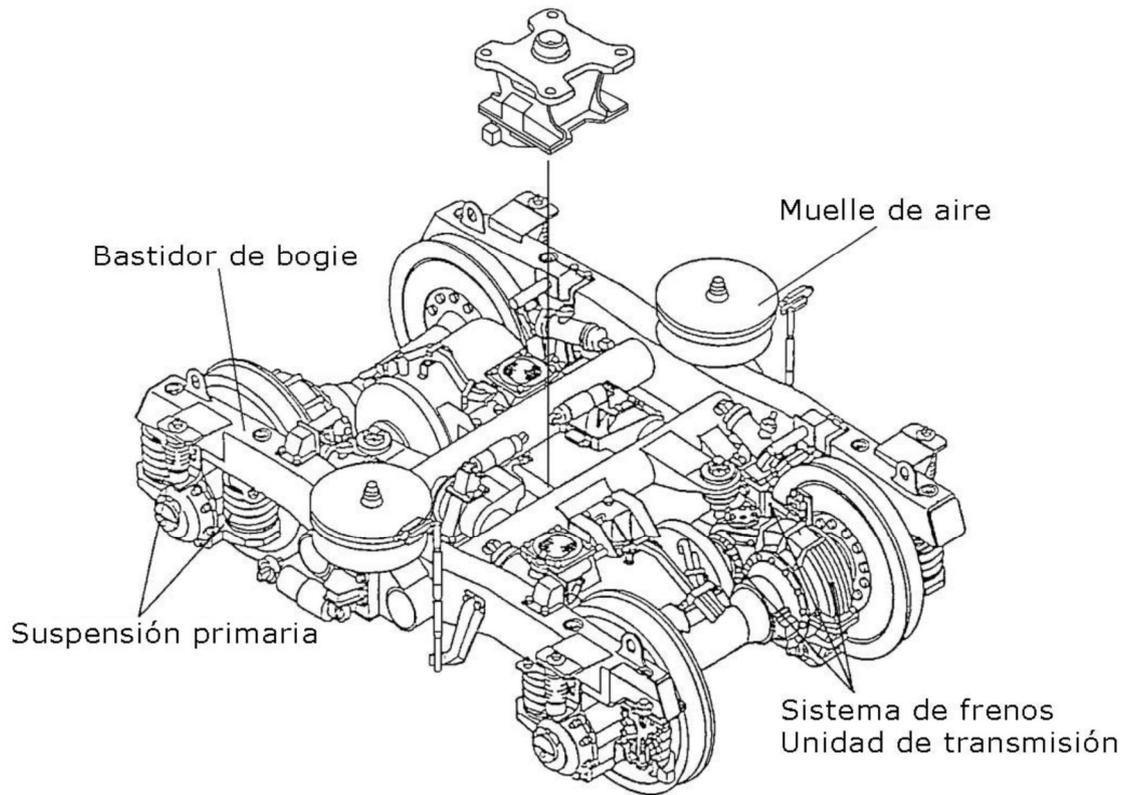


Ilustración 1. Bogie [1]

Los ejes de un bogie están unidos al bastidor de bogie mediante los elementos de la suspensión, es decir, elementos elásticos y disipadores de energía tanto de forma longitudinal, lateral y vertical. En el ferrocarril podemos definir dos suspensiones, la primaria y la secundaria, además estas suspensiones definirán el tipo de masa a la que pertenece cada componente.

La suspensión primaria es aquella que se encuentra entre el eje y el bastidor del bogie, y la secundaria entre el bastidor de bogie y la caja.

La masa no suspendida es toda masa que se encuentre entre por “debajo” de la suspensión primaria. La masa suspendida es aquella que esté por encima de la suspensión secundaria, y la masa que se encuentre entre suspensiones es la masa no suspendida.

## 2.1 TALGO 250 (SERIE 130 Y 730 DE RENFE)

En el presente trabajo, se va a emplear el bogie motorizado del tren TALGO 250, correspondientes a las series 130 y 730. A continuación, se describirá brevemente el material rodante.



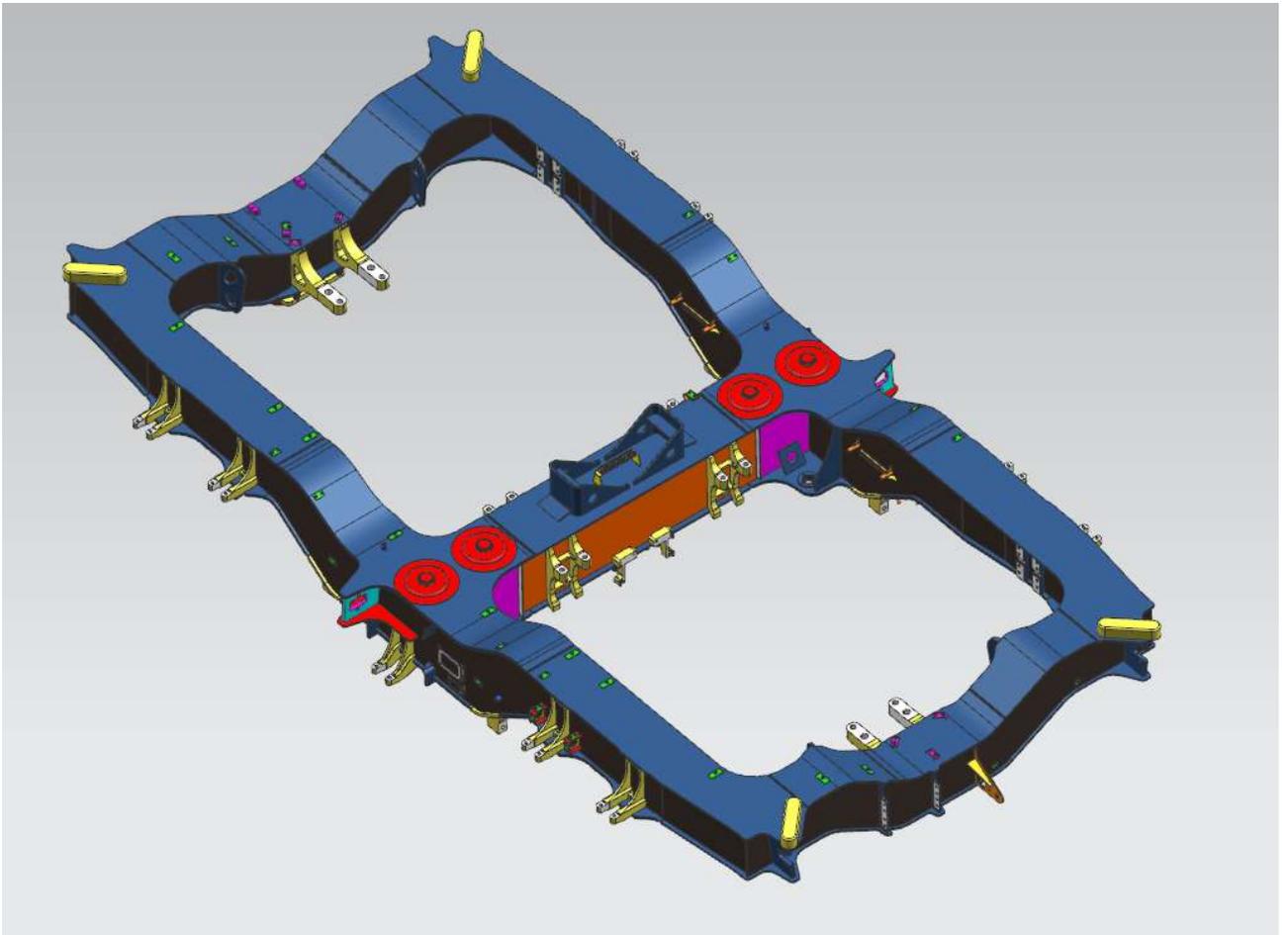
*Ilustración 2. TALGO 250 (serie 130 de RENFE) [2]*

El TALGO 250 Dual, conocido por RENFE como serie 730, es un TALGO 250 que ha cambiado sus coches extremos por CET (Coche Extremo Técnico), en ellos se incorpora un motor generador y un convertidor. Incluye al igual que el TALGO 250 rodadura desplazable, que convierte al TALGO 250 Dual en uno de los trenes más versátiles del mundo por su posibilidad de ir en 2 anchos y tanto en tracción diésel como eléctrica, esta última tanto 3 kV de corriente continua como 25 kV a 50 Hz en corriente alterna. [2 - 4]

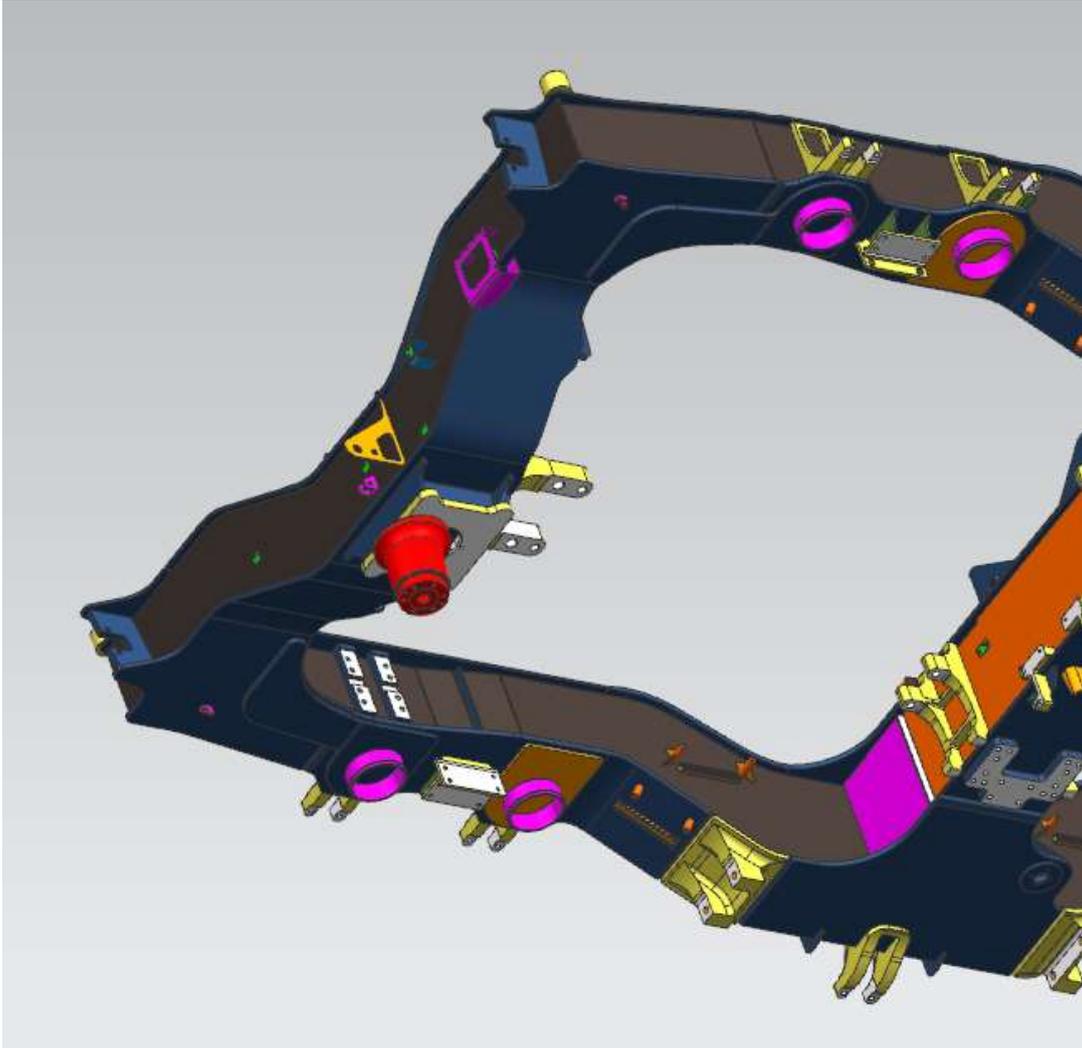
## 2.2 BASTIDOR DE BOGIE TALGO 250 Y TALGO 250 DUAL

El bastidor de bogie es la estructura principal, sobre ella se disponen los distintos elementos que formarán el bogie. Para completar el bogie se integran las armaduras, los ejes, reductores, y demás componentes, entre ellos las suspensiones. En el caso del Talgo 250 la suspensión primaria está formada por muelles helicoidales igual que la secundaria como es habitual en las locomotoras de alta velocidad.

El bastidor de bogie del Talgo 250 y Talgo 250 Dual tiene la característica de disponer de un pivote con una rótula de caucho en donde se acopla la barra de tracción. Esta característica hace que sea necesario un utillaje específico para manipular el bastidor una vez montado.



*Ilustración 3. Dibujo 3D del bastidor de bogie de un Talgo 250*



*Ilustración 4. Detalle de la vista inferior del bastidor de bogie del Talgo 250*

El bogie de un tren de alta velocidad como el de estudio suele tener una masa cercana a las 16 toneladas, pero al quitar los componentes y dejar el bastidor, este no pesa más de dos toneladas y media.

2.3 GATO VOLTEADOR GOMIL GV-04.17

El gato volteador que se empleará es un gato de la empresa GOMIL S.A del modelo GV-04.17 con las siguientes características técnicas:

|                                  |                 |
|----------------------------------|-----------------|
| EQUIPO: GATOS VOLTEADORES: ..... | GV-04.17        |
| NUMERO DE SERIE .....            | 1606            |
| PESO .....                       | 670 x 2 Kg.     |
| DIMENSIONES                      |                 |
| BASE .....                       | 1 200x1.400 mm. |
| ALTO .....                       | 2.500 mm.       |
| CAPACIDAD DE CARGA .....         | 2.000 x 2Kg     |
| POTENCIA INSTALADA .....         | 4 Kw            |
| VOLTAJE NOMINAL .....            | 400 V           |
| MAXIMA CORRIENTE .....           | 10 A            |

Ilustración 5. Características técnicas gato volteador

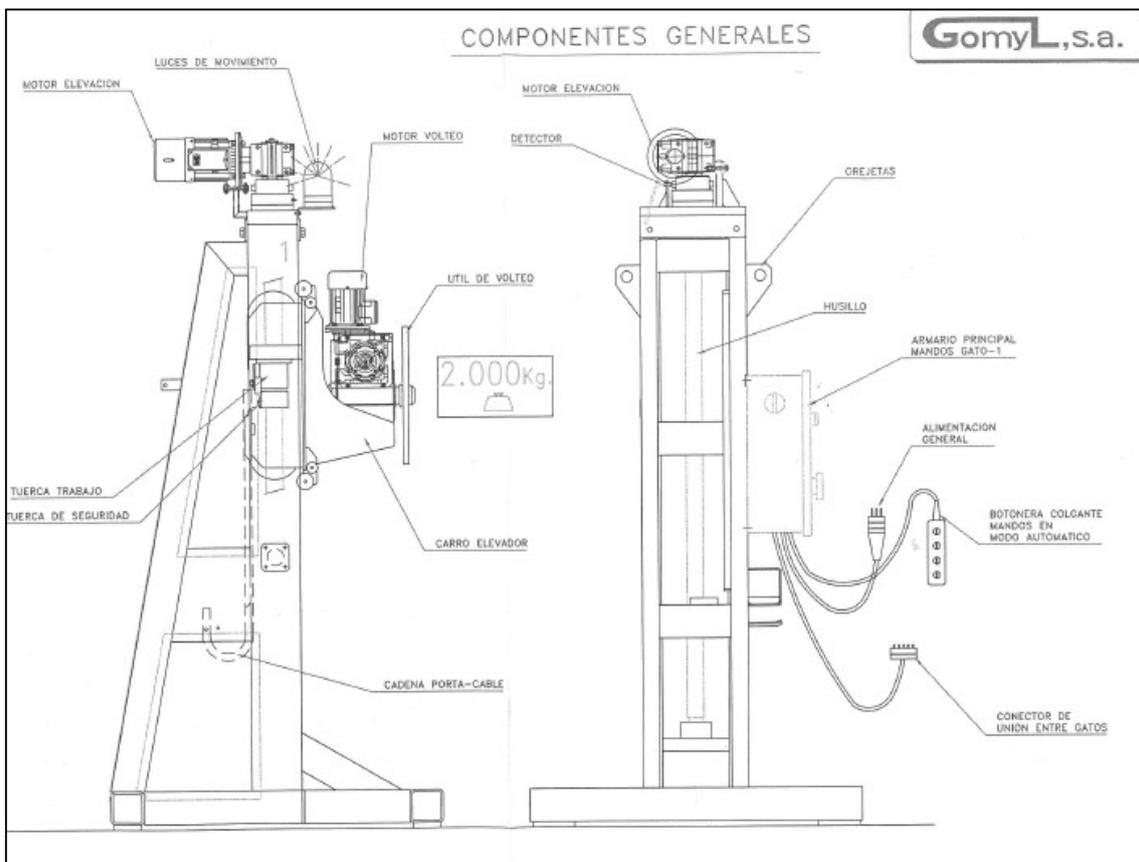


Ilustración 6. Esquema con los componentes generales del gato volteador

### 3.OBJETIVOS

El objetivo del Trabajo de Fin de Máster es comprobar el diseño de un útil mediante el empleo de programas CAD (Diseño Asistido por Ordenador de sus siglas en inglés) con módulo de cálculo por elementos finitos. El útil tendrá la finalidad de voltear un bastidor de bogie 360° para poder realizar las operaciones de montaje en la construcción del bogie, y operaciones de desmontaje y montaje en el mantenimiento del bogie. El problema al que tiene que dar solución es la incompatibilidad del útil existente en la empresa Patentes Talgo con el montaje de componentes, especialmente del pivote y la rótula de la barra de tracción.

El útil será empleado en operaciones que actualmente se realizan desde abajo, con los problemas de seguridad y ergonomía asociados. Con el útil, se pretende dar solución a estos problemas dotando a los operarios la posibilidad de trabajar en una posición más natural y con mayor seguridad.

El trabajo espera poder ser una guía básica para poder realizar paso a paso las comprobaciones más sencillas y necesarias a la hora de diseñar un útil usando el software SolidWorks.

### 4.TAREAS

En el Trabajo de Fin de Máster se desarrollaron las siguientes tareas:

- Búsqueda de información.
- Modelado en 3D de las diferentes piezas del útil.
- Simulaciones de sollicitaciones mecánicas: se realizó una simulación por medio del módulo de elementos finitos de SolidWorks. El estudio realizado consistió en calcular:
  - Tensiones
  - Factor de seguridad
  - Deformaciones
- Conclusiones del estudio

## 5.PLANIFICACIÓN

La planificación para el trabajo ha sido la siguiente:

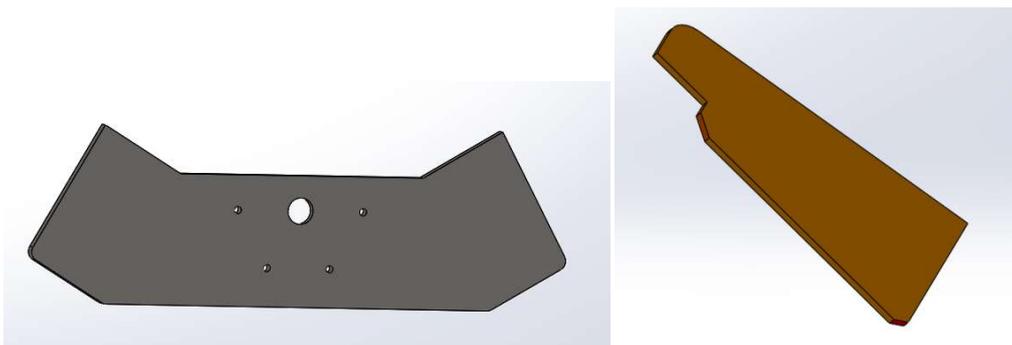
| FECHA INICIO | TAREA                                   | FECHA FIN |
|--------------|---|-----------|
| 03-abr-17    | Búsqueda de información                 | 09-abr-17 |
| 10-abr-17    | Modelado del útil                       | 15-may-17 |
| 16-may-17    | Estudio de las solicitaciones mecánicas | 31-may-17 |
| 01-jun-17    | Conclusiones                            | 09-jun-17 |
| 10-jun-17    | Redacción de la memoria                 | 06-jul-17 |

## 6.DESARROLLO

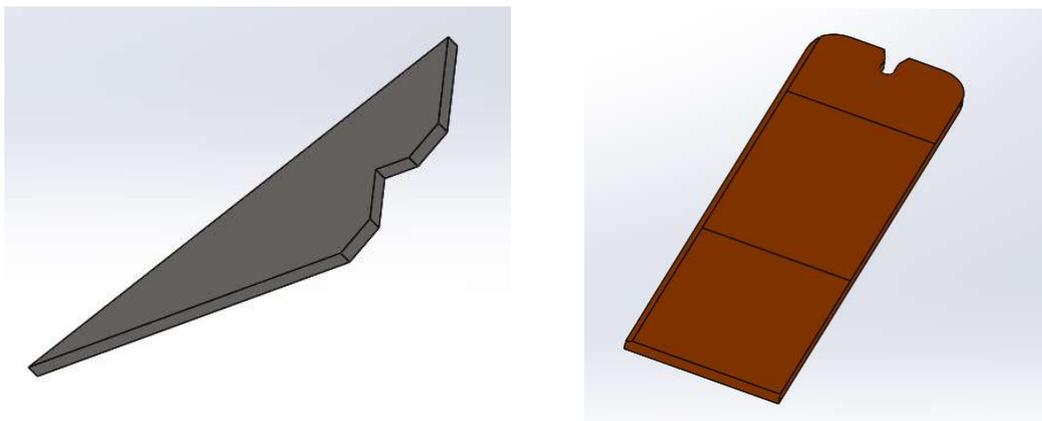
### 6.1.MODELAJE

En esta fase se crean las piezas necesarias para componer el útil con el software SolidWorks.

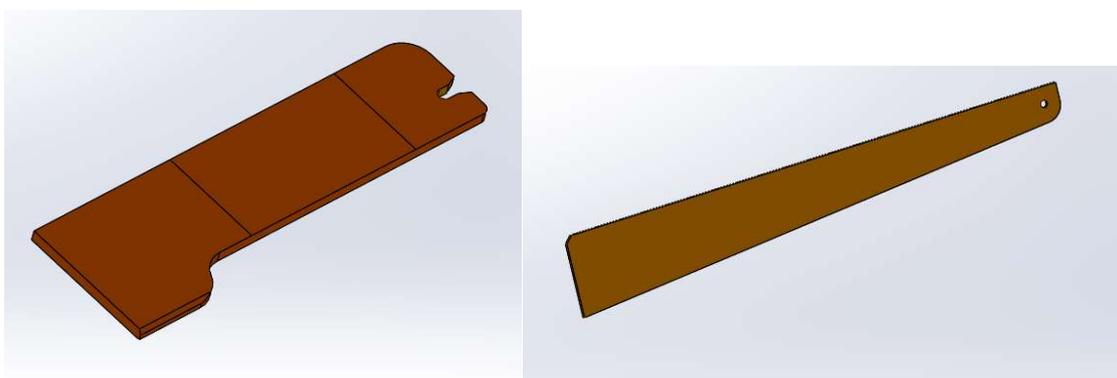
Aproximadamente se han modelado una docena de piezas, a saber:



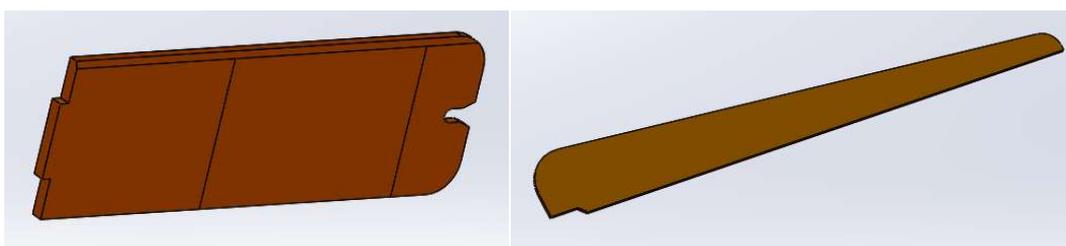
*Ilustración 7. Placa principal y Refuerzo vertical*



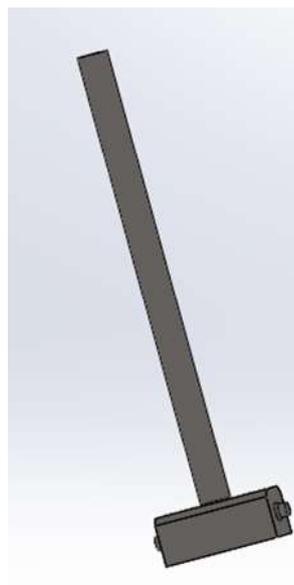
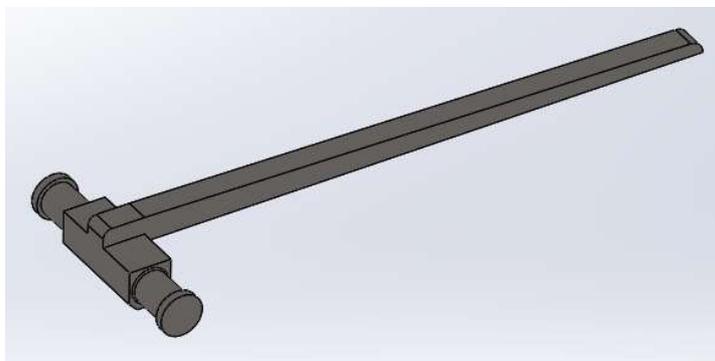
*Ilustración 8. Refuerzo superior y placa inferior*



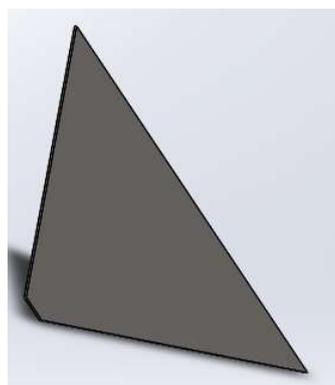
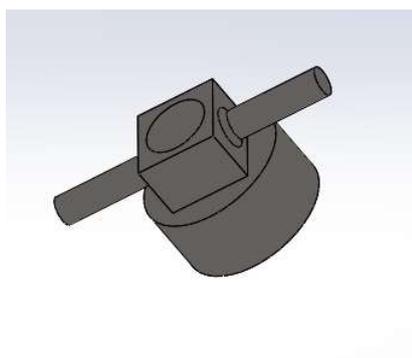
*Ilustración 9. Placa inferior modificada y refuerzo placa inferior*



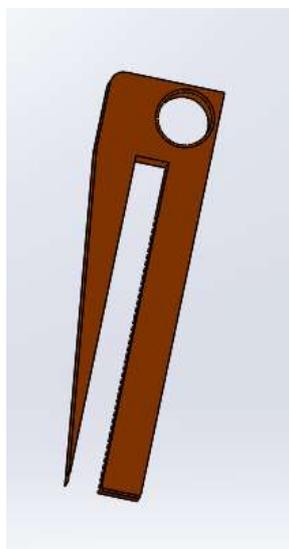
*Ilustración 10. Placa superior y refuerzo placa superior*



*Ilustración 11. Soporte superior y soporte barra*



*Ilustración 12. Tuerca y refuerzo inferior*



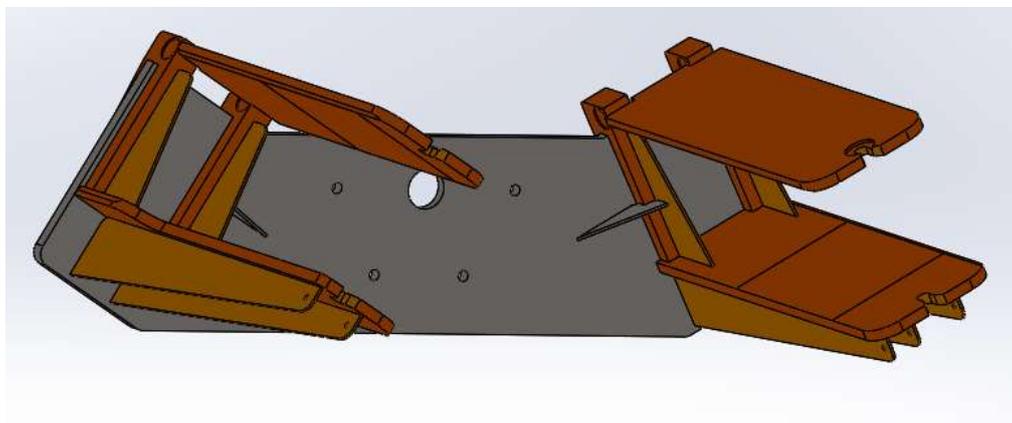
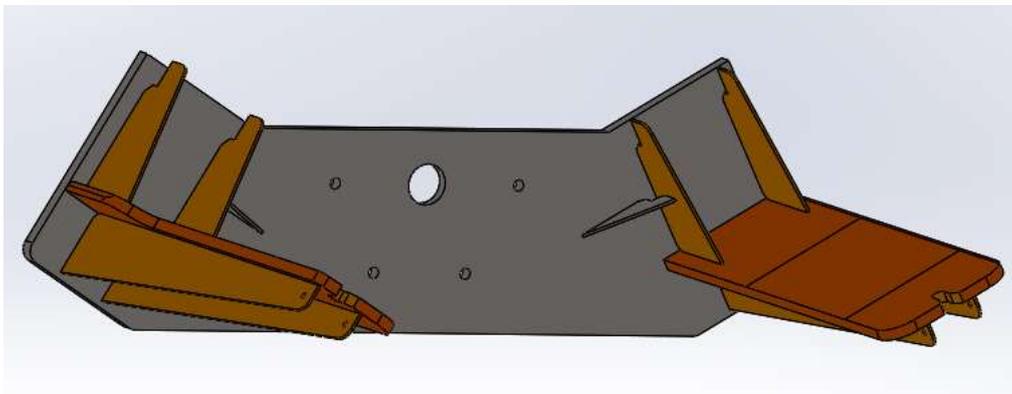
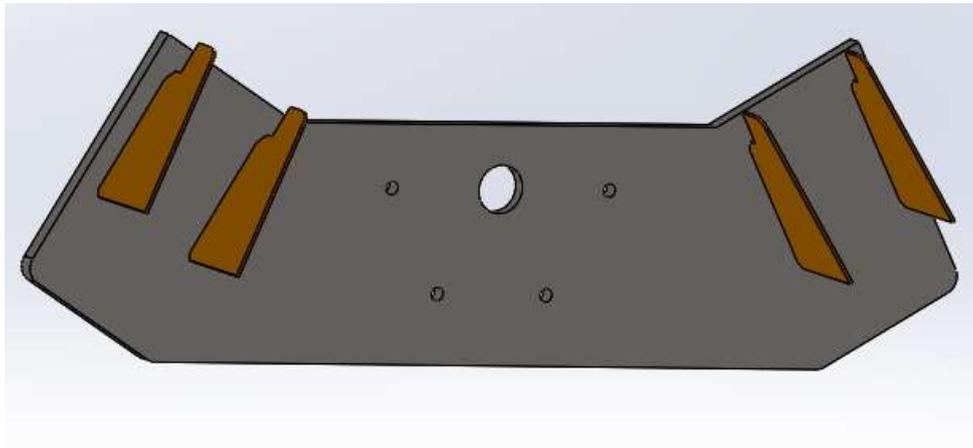
*Ilustración 13. Soporte bulón lateral*

## 6.2.ENSAMBLAJE

Una vez que las piezas están modeladas, se tiene que proceder al montaje de las mismas formando el útil. Para ello se utiliza la herramienta “relación de posición”.

Con ella, partiendo de una pieza “base”, en este caso, placa principal, se pueden ir montando las distintas piezas definiendo caras coincidentes, paralelismo, tangencia, perpendicularidad, concentricidad, distancia, ángulo, simetría, anchura, bisagra, tornillo entre otras.

En las siguientes imágenes se puede observar algunos de los pasos realizados en esta fase:



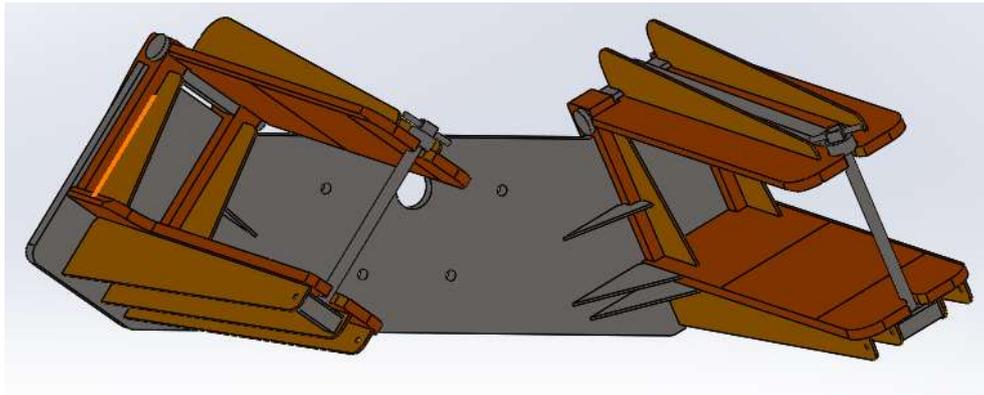


Ilustración 14. Secuencia de fotos en distintas fases del proceso de ensamble

### 6.3 ESTUDIO DE SOLICITACIONES MECÁNICAS

En ese apartado se procede a la “simulación” del resultado del comportamiento del ensamblaje frente a las solicitaciones mecánicas (pares, cargas...etc).

En el caso del volteador, los movimientos van a ser lentos, por lo que se podrá considerar como varios casos estáticos individuales. Los casos se harán simulando diferentes posiciones del volteador (0°, 60°, 240° y 180°), cambiando únicamente la dirección de la gravedad con el procedimiento que se detallará más adelante. Para realizar los estudios estáticos nos valemos del módulo simulación del software siguiendo los siguientes pasos:

Seleccionar SolidWorks simulation en la pestaña “complementos de SolidWorks”

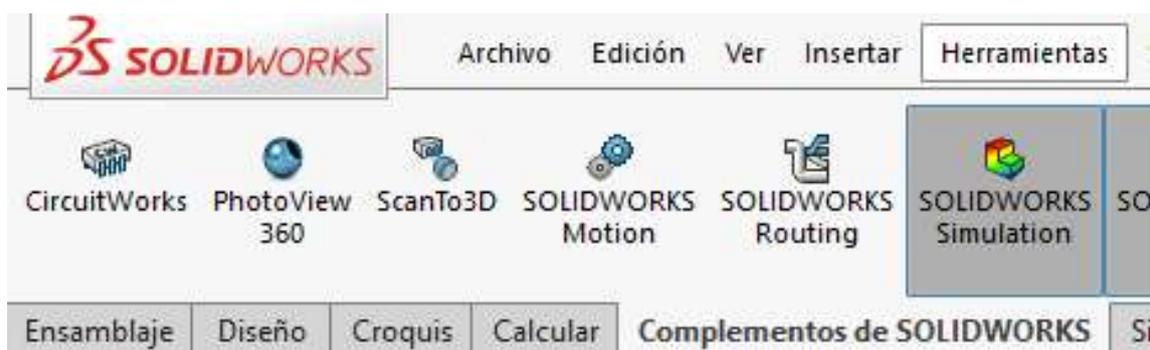


Ilustración 15. Botón para activar el módulo de simulación

En la barra de módulos seleccionaremos el botón “simulation” y posteriormente al botón “nuevo estudio” del desplegable.

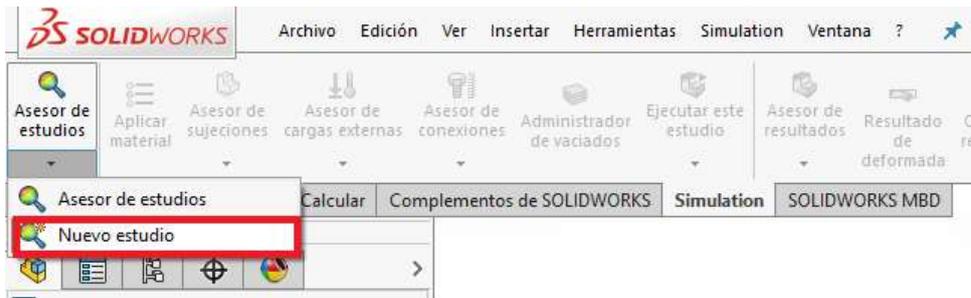


Ilustración 16. Botón nuevo estudio

Lo primero es seleccionar el tipo de estudio a realizar, en nuestro caso, realizaremos el estudio estático, que permite determinar tensiones, deformaciones, desplazamientos y factor de seguridad. Otros tipos de estudio permiten analizar flujos de temperatura, vibraciones, etc. Después de completar el nombre damos a aceptar.



Ilustración 17. Botón aceptar

En la parte izquierda de la pantalla tendremos dos ventanas, en la superior podremos ver las distintas piezas como en el modo de ensamble, y en la inferior tendremos los distintos parámetros que afectarán al útil.

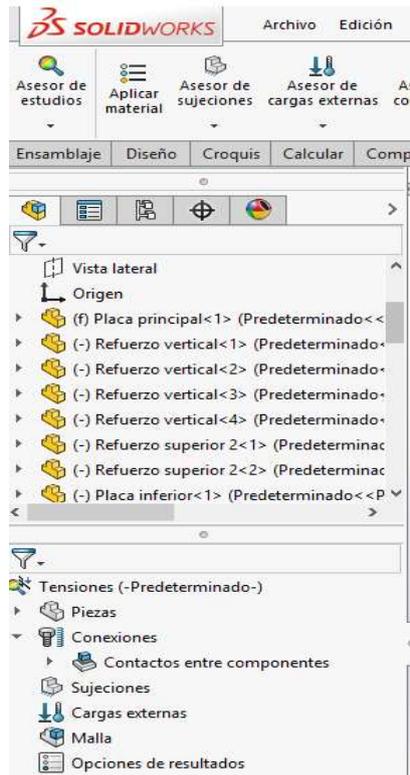


Ilustración 18. Interfaz del estudio estático

Aunque el orden en el que se introduzcan los parámetros es independiente antes de crear el mallado, vamos a seguir el orden predefinido por el software, de tal manera que empezaremos por seleccionar el material de cada una de las distintas piezas. Utilizaremos la biblioteca del software, que recoge materiales comerciales.

Desplegando el listado de piezas podremos seleccionar el material de forma individual pinchando con el botón derecho en cada una de las distintas piezas y a continuación en “Aplicar/Editar material”

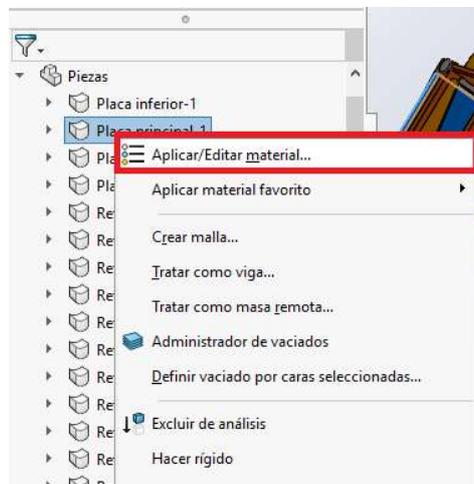


Ilustración 19. Botón aplicar/editar material

En nuestro caso, todas las piezas serán del mismo material, por lo que haremos click derecho en el desplegable “piezas” y después seleccionaremos “aplicar el material a todo”.

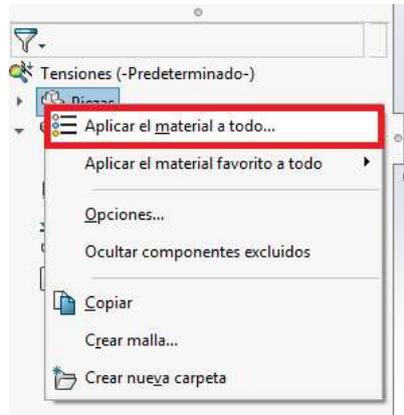


Ilustración 20. Botón aplicar el material a todo

En la ventana “material” podremos elegir entre los distintos materiales de la biblioteca del software. Dentro de “SolidWorks DIN Materials” encontraremos materiales comerciales, para el útil seleccionaremos dentro de los aceros estructurales el acero S355J2G4.

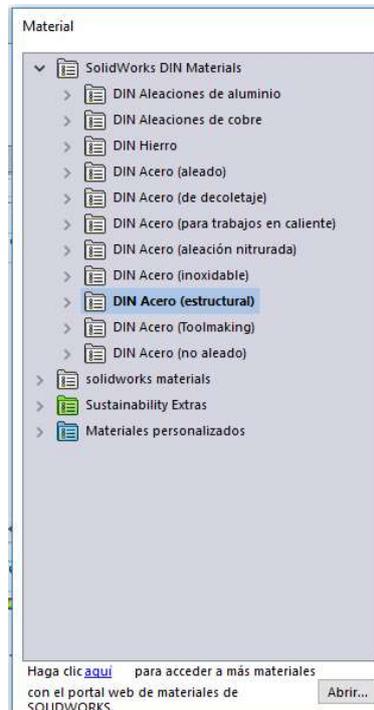


Ilustración 21. Despegable de la ventana “material”

Cuando pinchamos en un material podremos ver sus propiedades, y si queremos seleccionarlo deberemos dar al botón “aplicar” y después a “cerrar”.

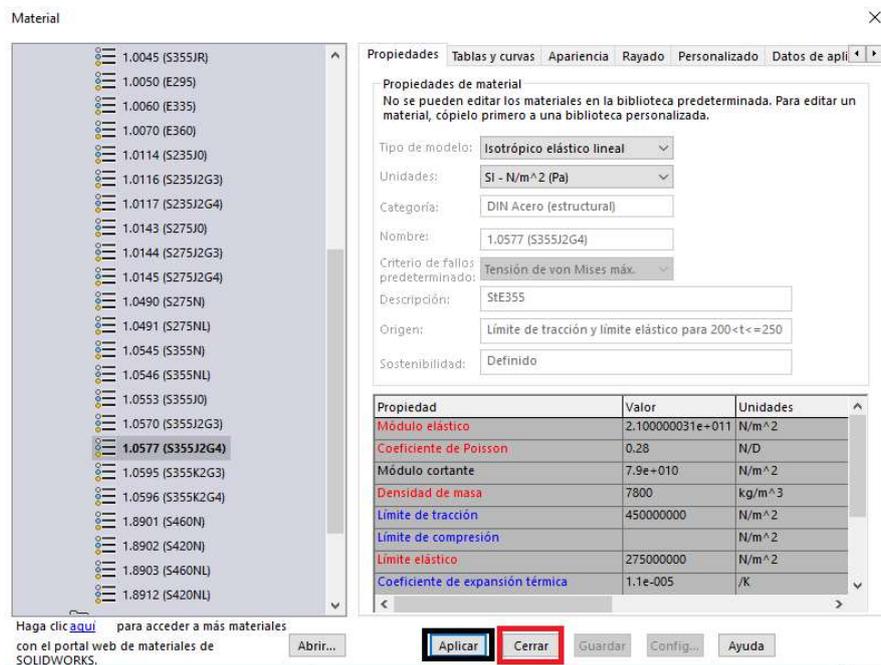


Ilustración 22. Visualización de las propiedades del material

El siguiente parámetro a definir son las conexiones entre las distintas piezas, las conexiones. Definiremos el contacto entre cada superficie siguiendo los siguientes pasos. Botón derecho en conexiones y seleccionaremos la conexión adecuada. En nuestro caso se definen todos los contactos entre componentes como uniones rígidas excepto aquellos componentes con posibilidad de movimiento, como las tuercas con las placas, que serán contactos sin penetración. En el ensamblaje definimos la interacción de las tuercas y de las bisagras.



Ilustración 23. Contactos

Buscando conjunto de contactos seleccionamos las piezas que no tengan contactos rígidos, y marcamos contacto sin penetración.

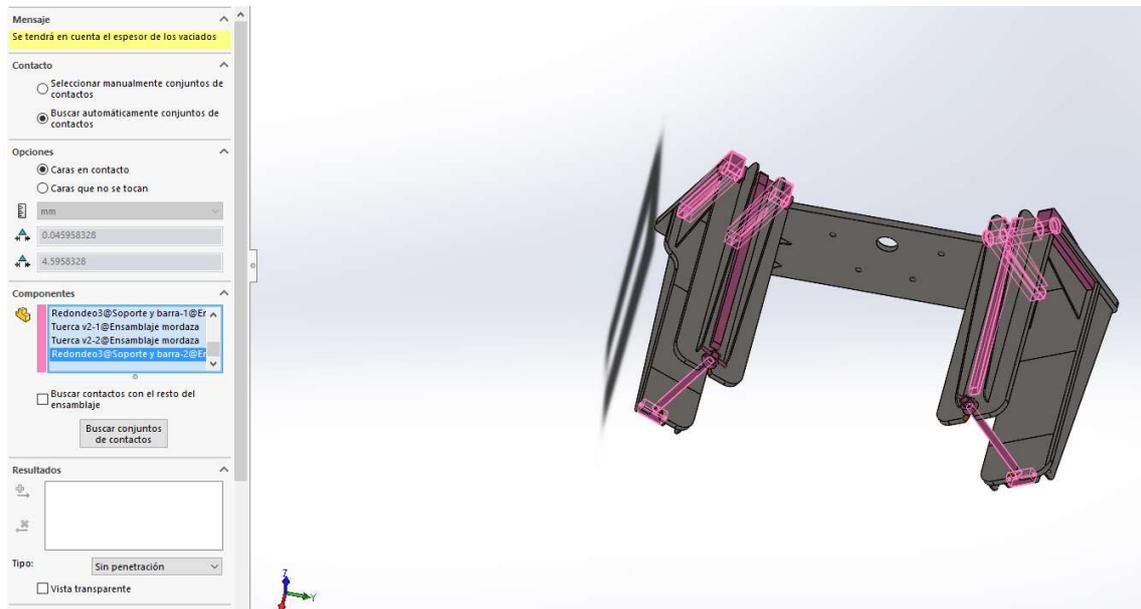


Ilustración 24. Tras seleccionar las piezas con contactos no rígidos daremos al botón buscar contactos.

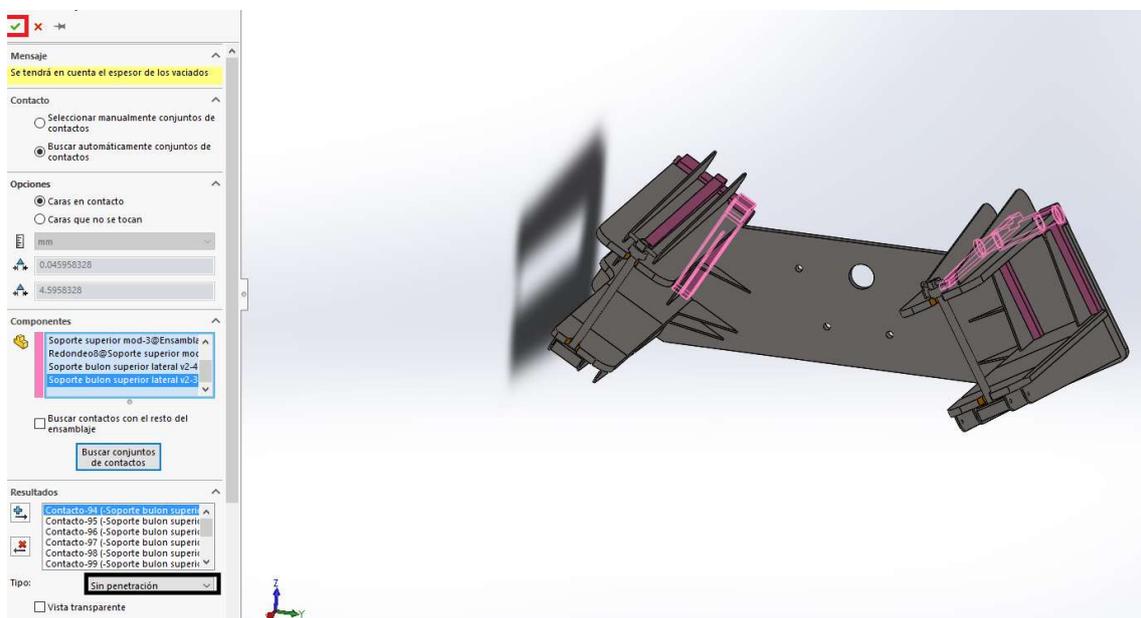


Ilustración 25. Definimos el contacto y damos a aceptar

La siguiente tarea es poner las sujeciones, esto define como se comportará el modelo. Las hay de varios tipos, según las necesidades. Se pueden imponer desplazamientos, bisagras fijas, soportes

elásticos o como en nuestro caso empotramientos. Para ello hacemos click derecho en “sujeciones” y a continuación en “geometría fija”.

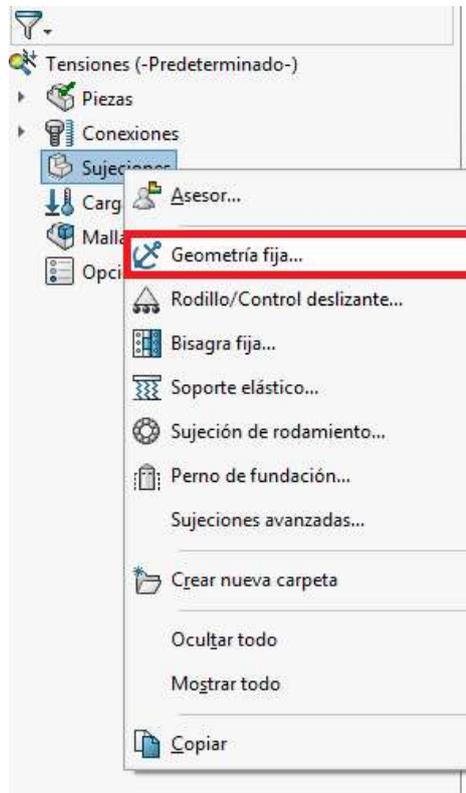


Ilustración 26. Seleccionamos geometría fija en el menú sujeciones

En nuestro caso, como el útil va a estar sujetado mecánicamente por los taladros, seleccionaremos las caras internas del taladro. Aparecerán flechas verdes en la figura indicando que la superficie está empotrada. Cuando estén todas las caras de los taladros seleccionadas daremos al botón aceptar.

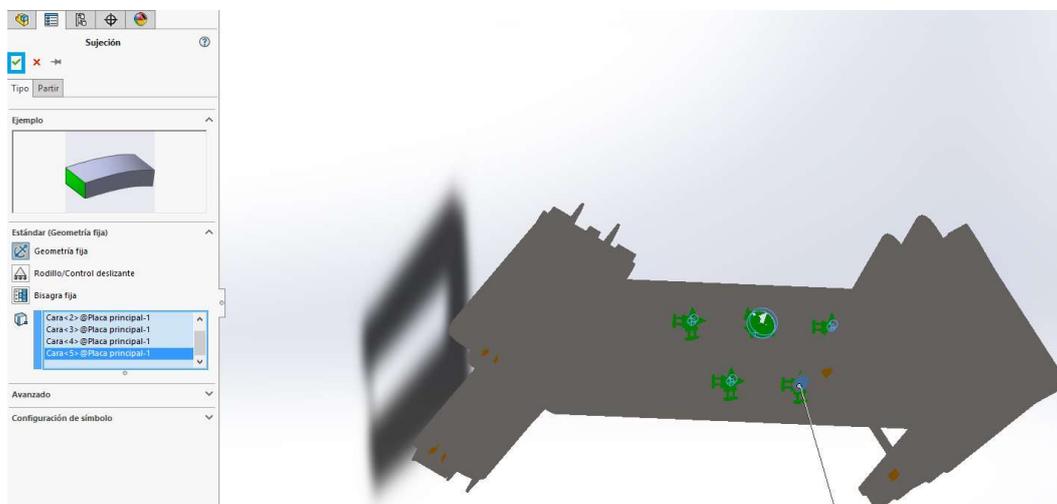


Ilustración 27. Seleccionamos las caras a empotrar

Ahora definiremos las “cargas externas”. En este apartado indicaremos cuales son las solicitaciones externas a las que someteremos el útil. Se pueden poner fuerzas, gravedad, temperatura, masas, centrifugas entre otras. Para añadir una haremos click derecho en “cargas externas” y luego en la que nos interese. En nuestro caso, aplicaremos la gravedad, para ello pincharemos en gravedad

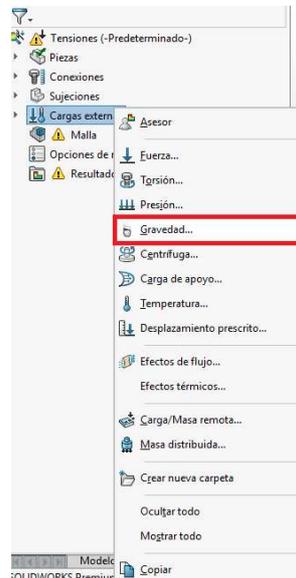


Ilustración 28. Menú cargas externas



Ilustración 29. Gravedad

Dentro de la figura, pinchamos en la cara normal a la dirección de la gravedad. La flecha roja de la imagen superior indica la dirección de la gravedad.

A demás de la gravedad, nuestro útil va a tener que soportar una masa, por lo que aplicaremos la carga externa “masa distribuida”.

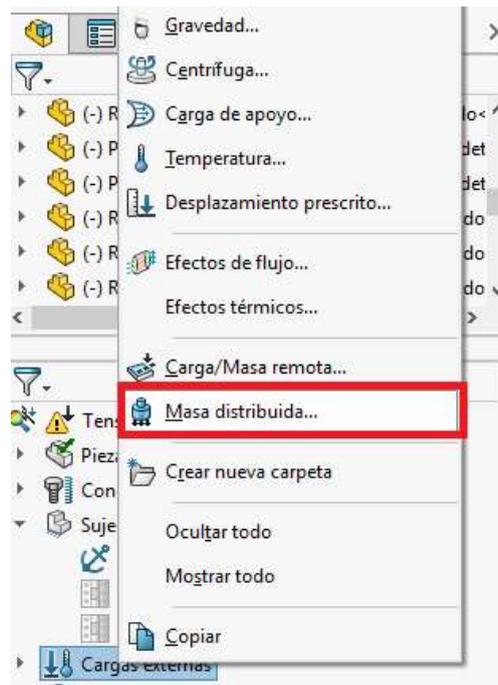


Ilustración 30

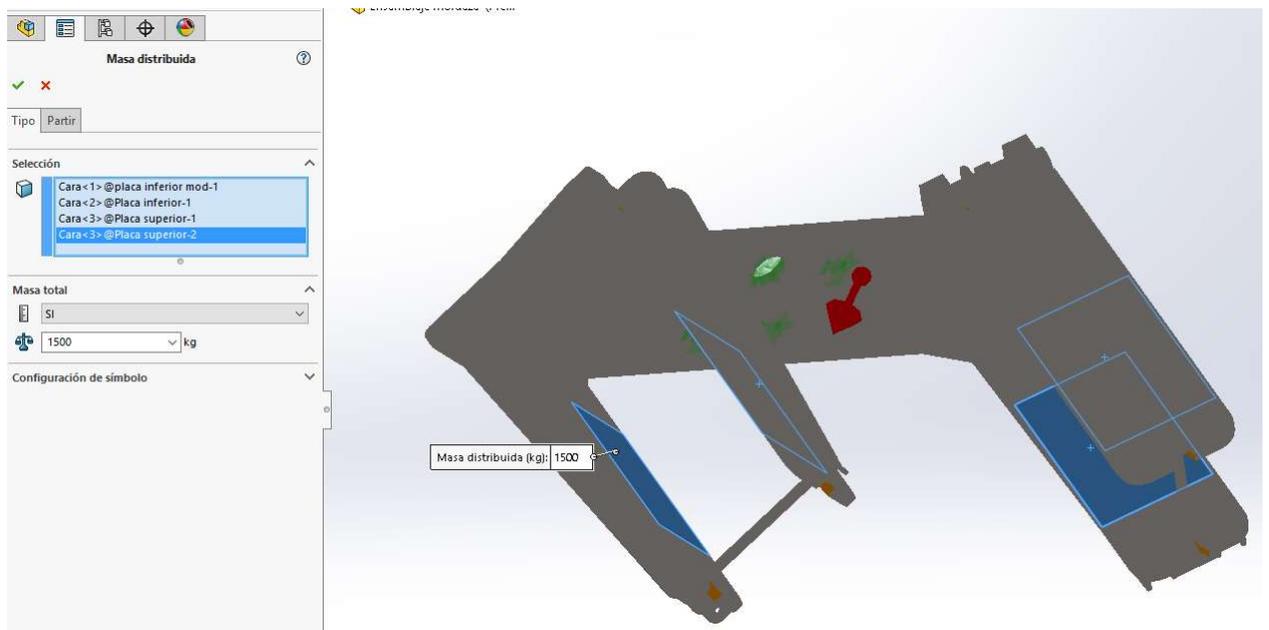


Ilustración 31. Menú masa distribuida

Es importante seleccionar las superficies que estarán en contacto con la masa. Después aplicaremos el valor de la masa y por último aceptaremos. En nuestro caso, el peso del bastidor con el pivote, la rótula y la timonería de freno la masa no sobrepasa las 3 toneladas, por lo que pondremos una masa de 1500 kg que soportará esta útil, ya que en el otro extremo del bastidor hay otro útil igual enganchado a un gato. De esta manera simplificaremos los cálculos a realizar.

Ya está definido el material, las conexiones, las sujeciones y las cargas externas a las que será sometido. Sólo queda hacer el mallado antes de ejecutar los cálculos y obtener los resultados.

Para crear el mallado haremos click derecho en malla y seleccionaremos “crear malla”.

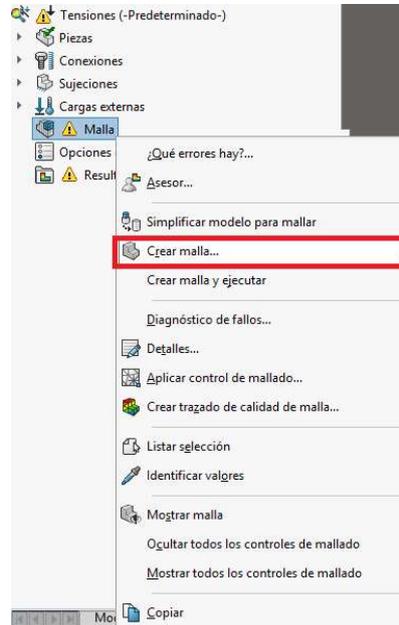


Ilustración 32. Seleccionamos “crear malla”

Dentro del menú “Malla”, podemos utilizar diferentes métodos de mallado. El recomendable es usar la malla estándar, dejando las mallas basadas en curvaturas para ensamblajes con gran cantidad de elementos curvos.

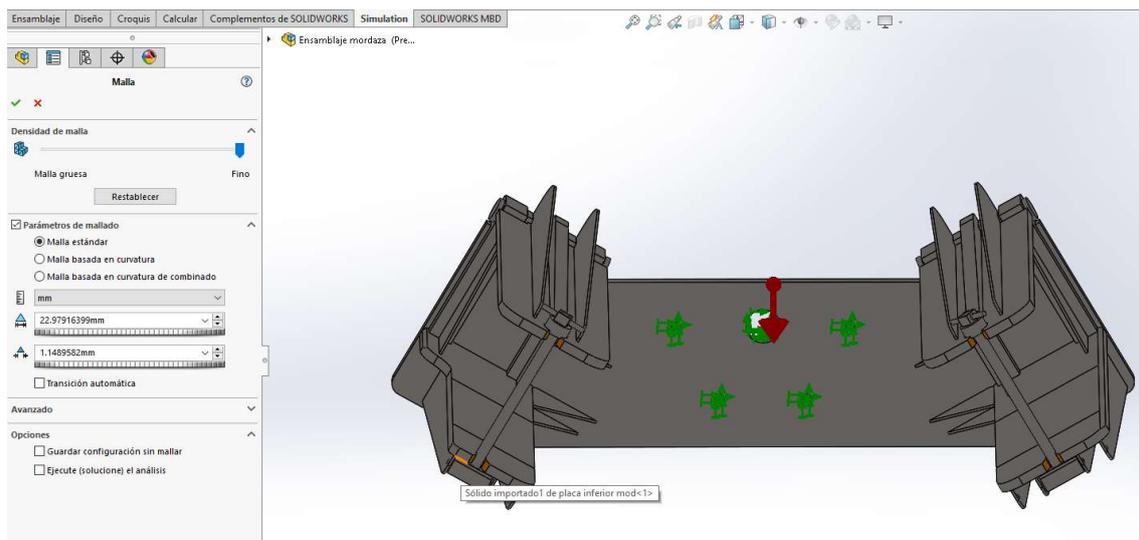


Ilustración 33. Menú malla

En el menú podemos definir la densidad de mallado, cuanto más fino sea, más pequeños serán los elementos de la maya y por tanto será más preciso en los cálculos. Ante posibles fallos de mallado,

cambiar el número de puntos jacobianos y reducir el tamaño de los elementos de la malla puede solucionarlo. En el trabajo se decidió emplear un mallado estándar fino. Después de dar a aceptar, el programa realizará el mallado.

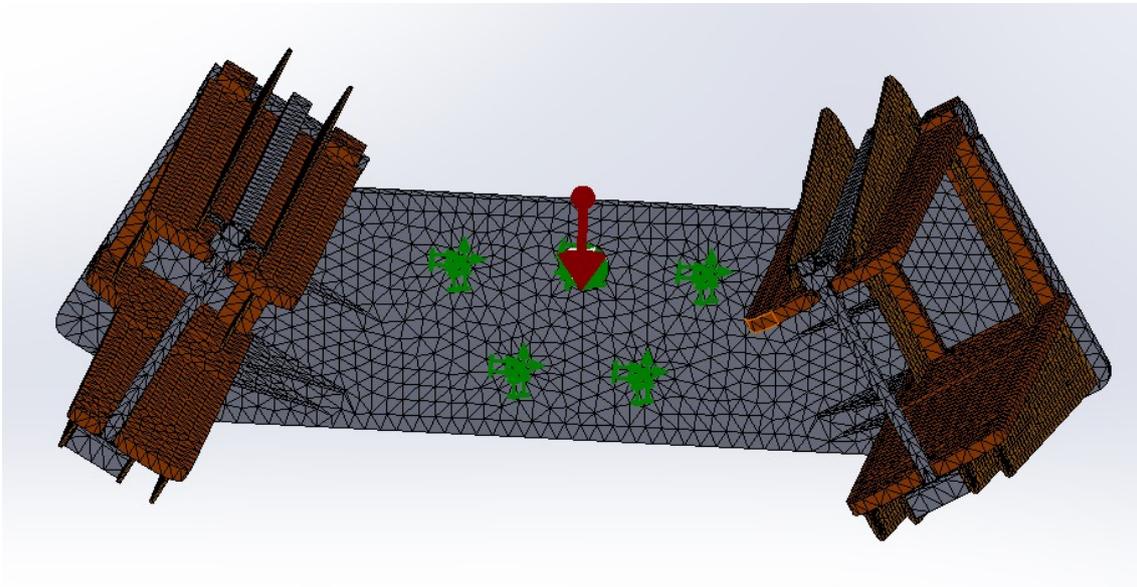


Ilustración 34. Mallado del útil

### 6.3.1 Tensiones

Con el mallado realizado se procederá a ejecutar el cálculo para obtener los resultados. Para ello haremos click derecho en el nombre del estudio, en nuestro caso “tensiones” y a continuación en ejecutar.

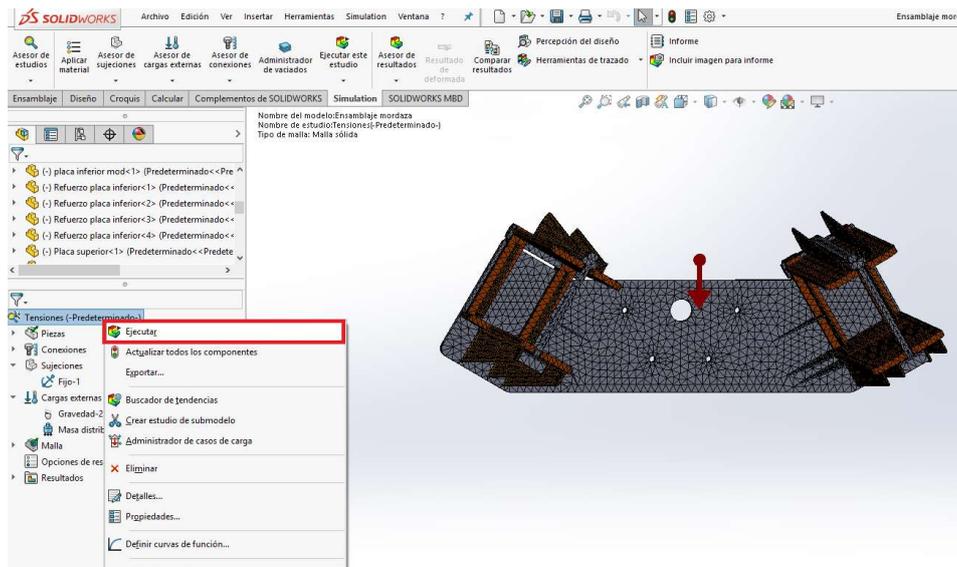


Ilustración 35. Ejecutar el cálculo

Tras esperar a que el programa realice todos los cálculos nos mostrará en la ventana principal de la interfaz la pieza con el resultado de las tensiones.

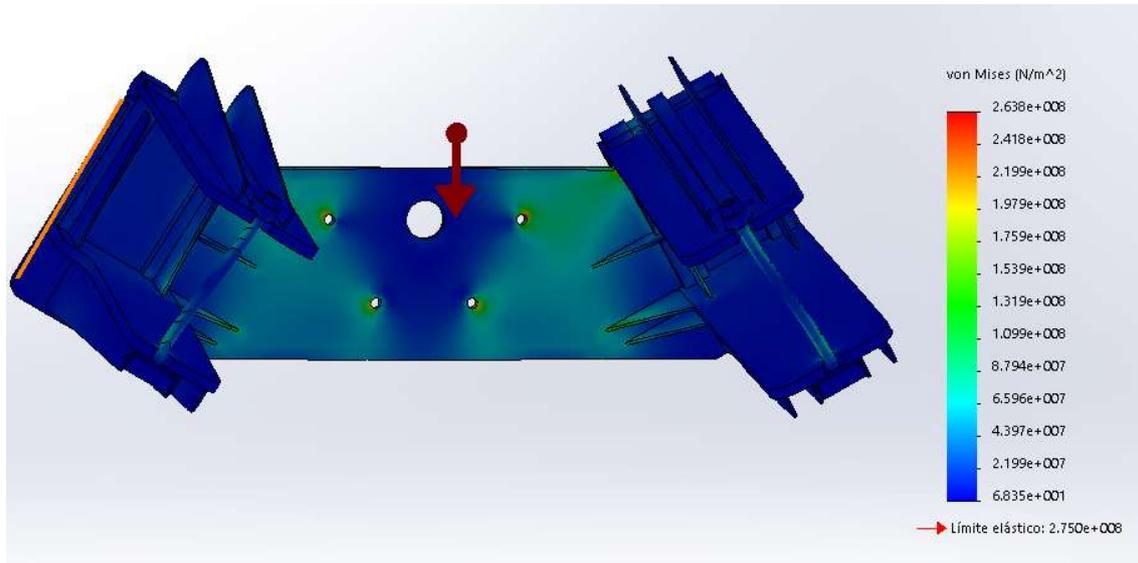


Ilustración 36. Resultado del cálculo, con las tensiones

La figura adquiere distintos colores en función del valor de tensión a la que está sometida. Las tonalidades azules expresan los valores de tensiones más bajos, mientras que los rojos se emplearán en las zonas más solicitadas. En la leyenda (por defecto estará ubicada pegada al borde de la ventana de la interfaz de la figura) se puede consultar el límite elástico del material seleccionado y se puede apreciar de manera rápida el valor de las tensiones máxima y mínima. En el caso de que la pieza esté solicitada con tensiones que no pueda resistir el material, aparecerá una flecha roja a la altura del valor del límite elástico, indicando la tonalidad con la que será representada y permitiendo ver de manera rápida la diferencia entre los valores obtenidos y los valores máximos para que pueda resistir el material.

La razón por la cual el software nos indica el límite elástico y no el valor de rotura es porque como todo diseño, hay que diseñar para que el material trabaje en la zona de deformación elástica, es decir, que cualquier deformación producida al aplicar las cargas es recuperada tras la extinción de estas, volviendo la figura a recuperar su forma original. Esta zona está limitada por el límite elástico (gráfica tensión-deformación) y a partir de ella se encuentra la zona de deformación plástica, donde las deformaciones sufridas por el material al aplicar las cargas permanecen de a lo largo del tiempo tras la extinción de las mismas, quedando la pieza deformada permanentemente.

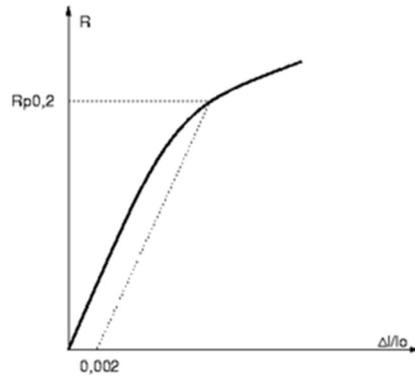


Ilustración 37. Curva tensión - deformación

Para los siguientes pasos, vamos a realizar los cálculos con una carga externa de “masa distribuida” de 5 kg.

En la siguiente imagen se puede ver la pantalla con los resultados de tensiones para la carga externa “masa distribuida” de 5 kg.

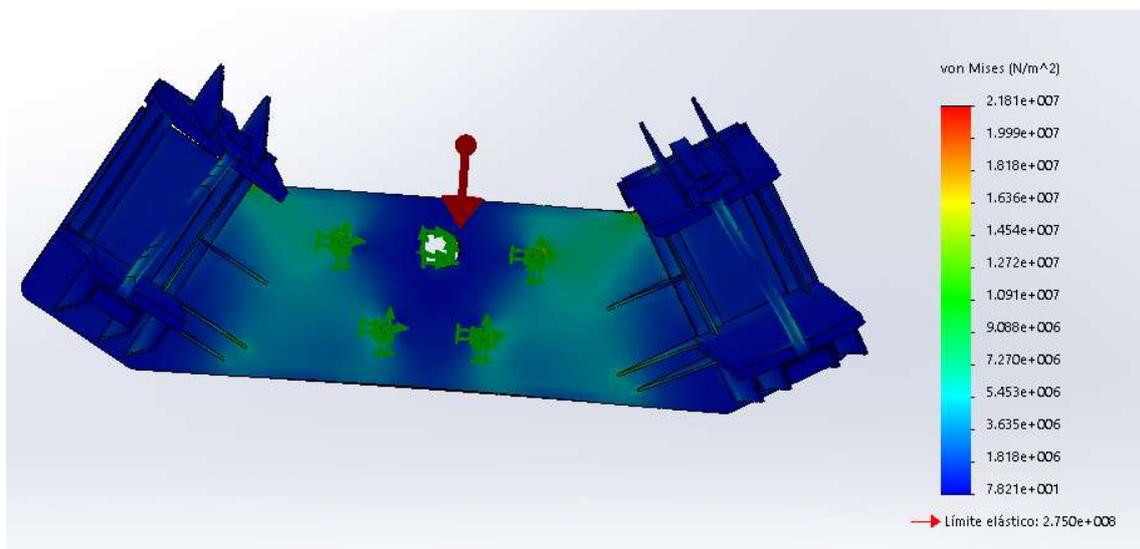


Ilustración 38. Tensiones para masa de 5 kg

Podemos pedir al programa que nos indique los puntos con el valor mayor y menor, para ello daremos con el botón derecho en tensiones y a continuación en opciones de gráfico. En el menú seleccionaremos los botones recuadrados en rojo en la siguiente imagen.

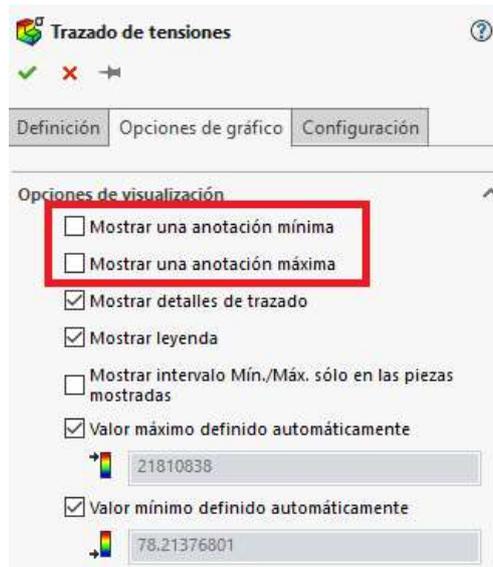


Ilustración 39. Mostrar valores máximo y mínimo de tensiones

En la siguiente imagen se observa como aparecen los puntos con valor máximo y mínimo.

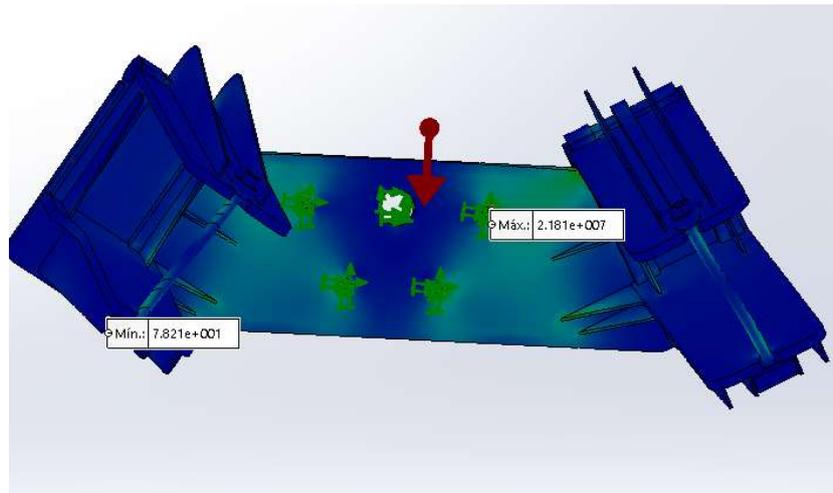


Ilustración 40. Representación de los puntos con valor máximo y mínimo

### 6.3.2 Factor de seguridad

Una vez visto el resultado de tensiones, procedemos a obtener el factor de seguridad. El factor de seguridad, también llamado coeficiente de seguridad es un valor que nos indica el grado de seguridad ante las solicitaciones impuestas, es decir, nos permite sobredimensionar la pieza para que esta sea capaz de soportar las solicitaciones requeridas multiplicadas por el factor. De esta manera, si obtenemos valores de factor de 2 con una carga de 500 kg significa que el ensamble de estudio sería capaz de soportar 1000 kg en lugar de los 500 kg solicitados.

Para obtener el factor de seguridad tendremos que ejecutar las siguientes operaciones:

Se hace click derecho en “resultados” y a continuación en “definir trazado de factor de seguridad”

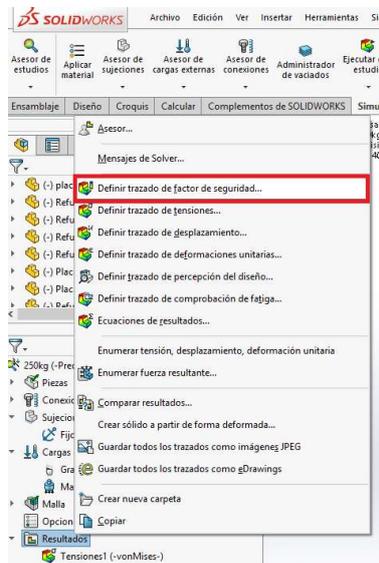


Ilustración 41. Obtención del factor de seguridad

Aparecerá el menú factor de seguridad, en él podremos indicar los sólidos en los que queremos que calcule y limitar un valor máximo representado.

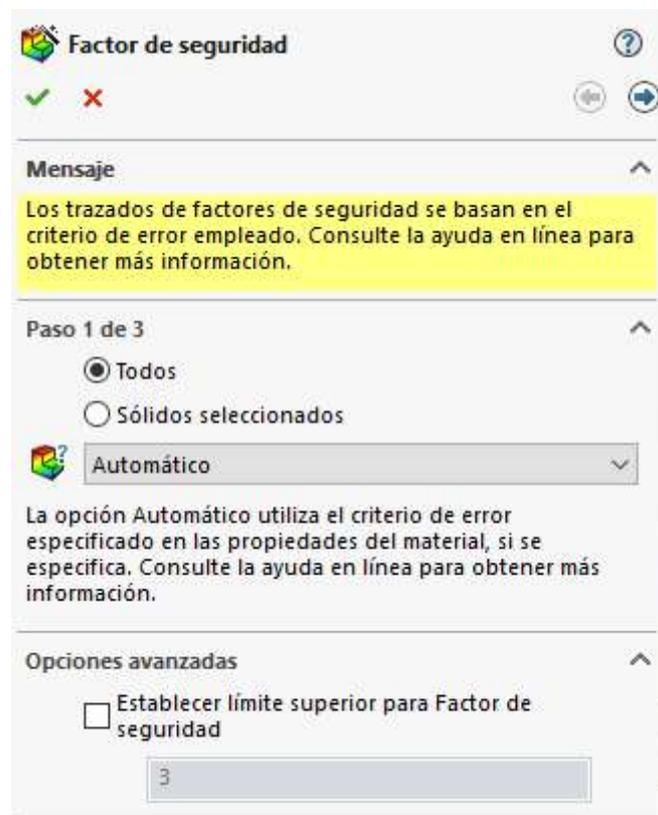


Ilustración 42. Menú factor de seguridad

Después del cálculo nos aparecerán los resultados.

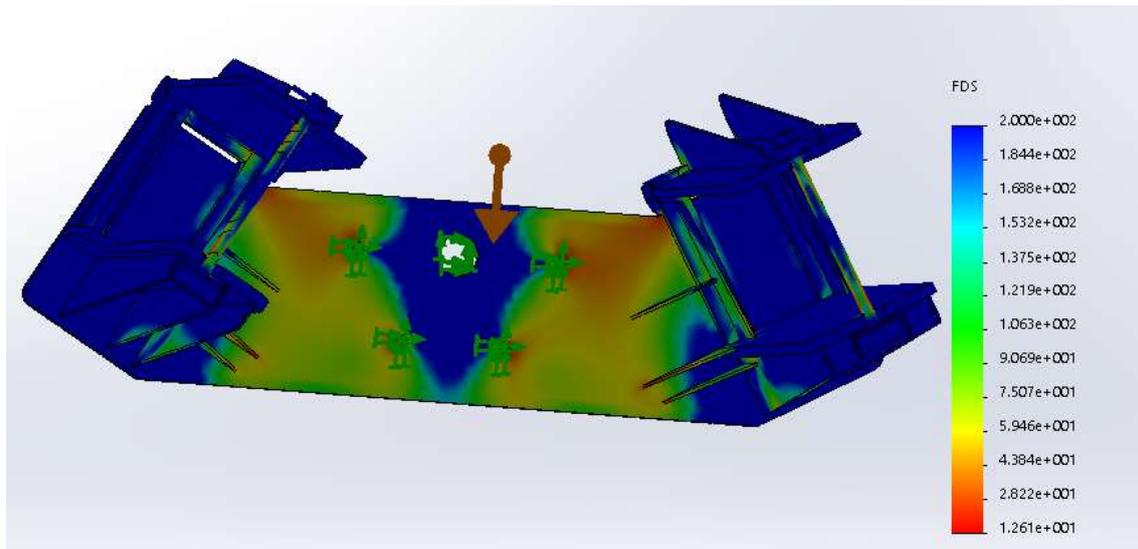


Ilustración 43. Representación del Factor de seguridad

Como podemos ver en la imagen, la representación es parecida a la ofrecida para el cálculo de las tensiones. En rojo obtendremos el menor valor y en azul los valores más altos, pulsando en “factor de seguridad” con el botón derecho y “opciones de gráfico” podremos solicitar al programa que nos indique el punto con mayor y menor factor de seguridad.

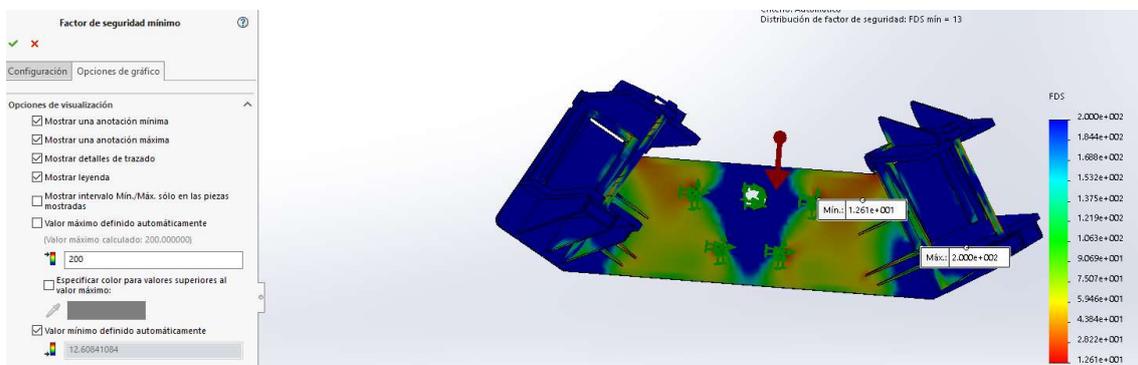


Ilustración 44. Representación punto máximo y mínimo valor de factor de seguridad

Con este análisis podremos ver de forma rápida cual es el valor mínimo del factor de seguridad, sabiendo cual es la distribución del factor a lo largo del ensamble. Hay que indicar que valores menores a 1 aparecerán cuando las solicitaciones sean mayores a la resistencia del material.

Los valores de factor de seguridad requeridos más comunes son los comprendidos entre 1.5 y 3, en el caso del útil, la parte del útil con menor factor deberá tener un valor de 2, especialmente si esta parte son los taladros de la placa principal que permitirán fijar el útil al volteador.

### 6.3.3 Deformaciones

En este capítulo se consultará el cálculo de las deformaciones, para ello haremos pincharemos dos veces en “desplazamientos (-Despl resultantes)”, en la pantalla se podrá visualizar las deformaciones producidas por las solicitaciones.

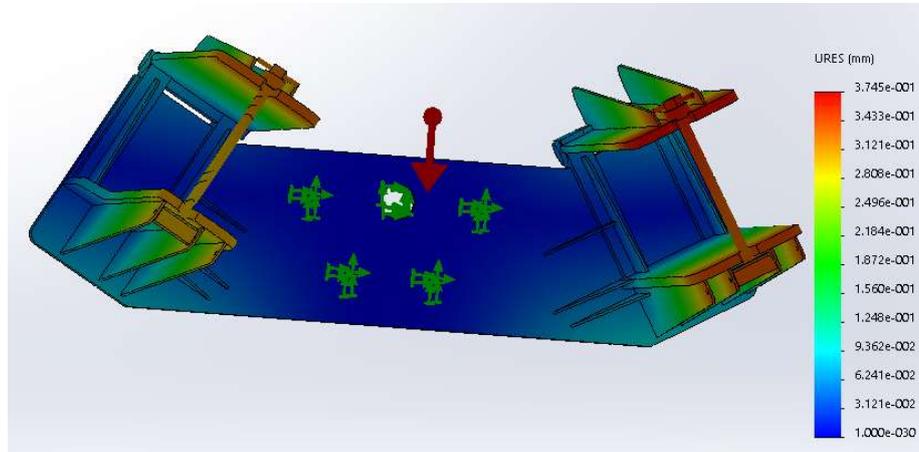


Ilustración 45. Representación de desplazamientos

La representación es la misma que en los otros apartados vistos, siendo el color rojo el que nos indique las partes del útil con deformaciones más desfavorables (mayores desplazamientos) y en azul aquellas que tengan una deformación más favorable (menores desplazamientos).

Para determinar si el útil serviría bajo las solicitaciones puestas usaremos el siguiente criterio:

$$\text{Deformación simulada (mm)} < \frac{\text{espesor de la chapa (mm)}}{100}$$

En nuestro caso para dar por bueno el apartado de las dimensiones, las deformaciones en las placas sobre las que se aplica la fuerza deberán ser menores a 0.2 mm, al tener cada una un espesor de 20 mm.

El software permite representar los desplazamientos en las direcciones de los ejes, así como las fuerzas de reacción en los ejes y la resultante. Para ello, haremos click derecho en Desplazamientos y a continuación en editar definición.

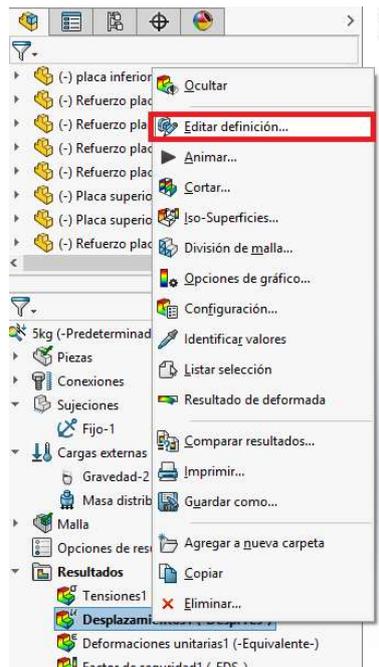


Ilustración 46. Desplegar el menú para cambiar desplazamientos o fuerzas de reacción

En el menú, en el desplegable, seleccionaremos la que nos interese y al aceptar, será representada.

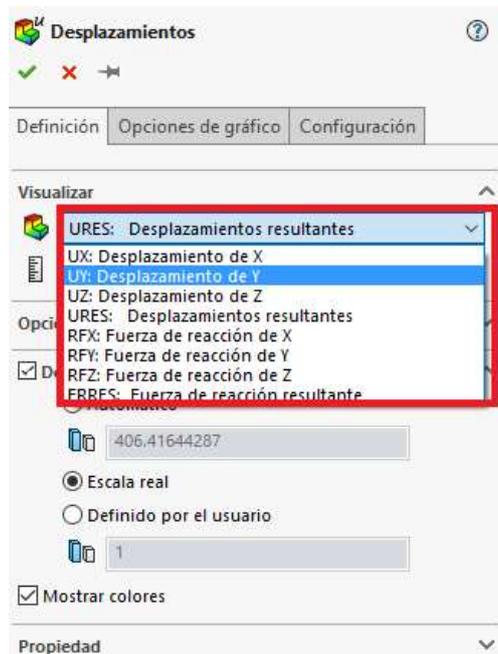


Ilustración 47. Menú desplazamientos con el desplegable para seleccionar el desplazamiento o la fuerza de reacción deseada

## 6.4 RESULTADOS

Este capítulo lo vamos a tratar en dos apartados, cada uno de ellos reflejará los resultados de cada una de las cargas estudiadas, es decir, con una masa a voltear de 250 kg y de 1500 kg respectivamente.

### 6.4.1 Supuesto 1: masa de 5 kg

Todos los resultados han sido obtenidos siguiendo los pasos detallados en la extensión del trabajo.

Tensiones:

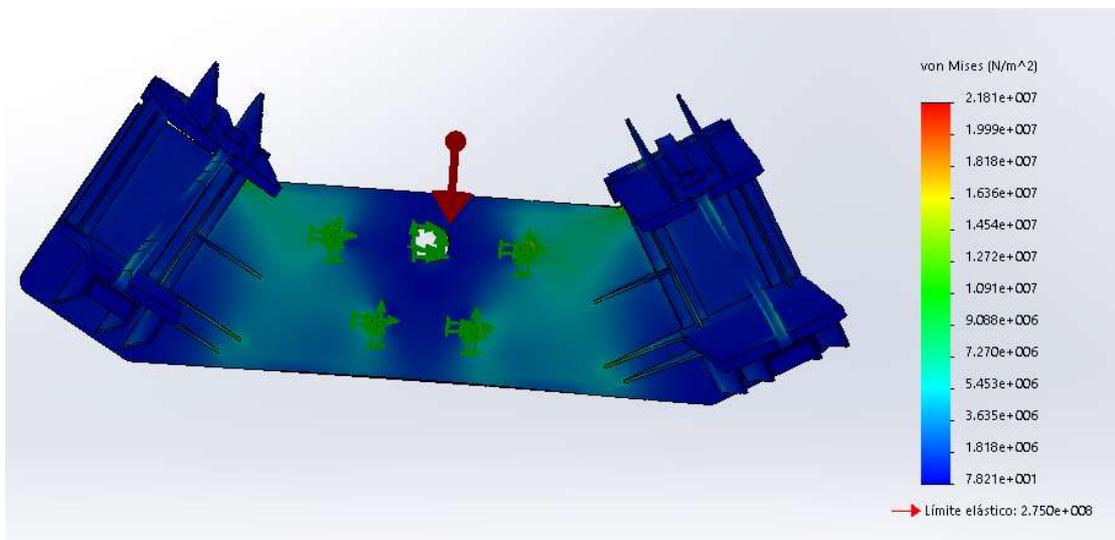


Ilustración 48. Tensiones a 0°

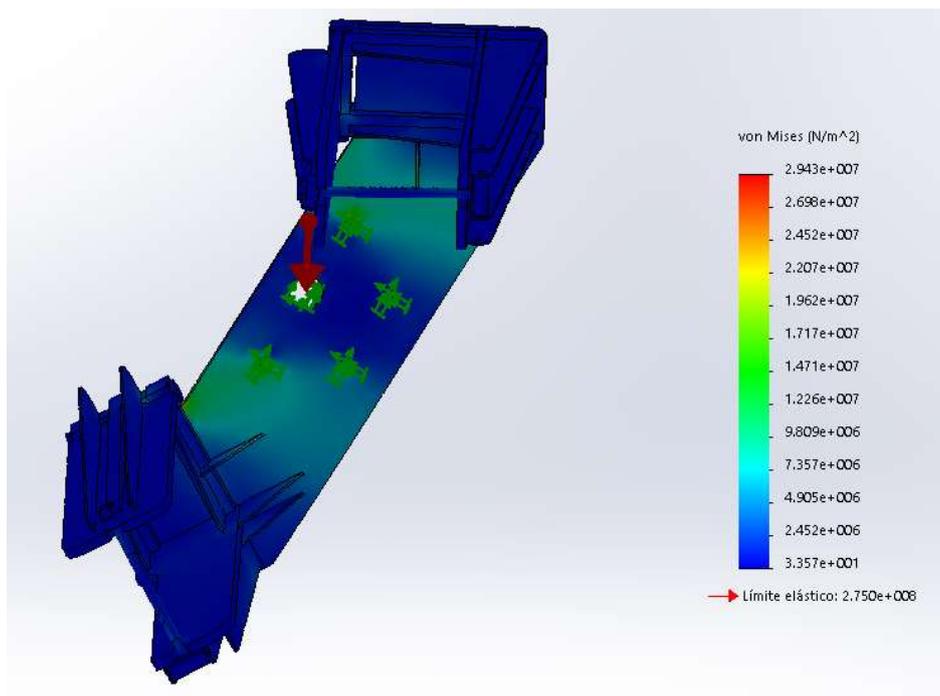


Ilustración 49. Tensiones a 60°

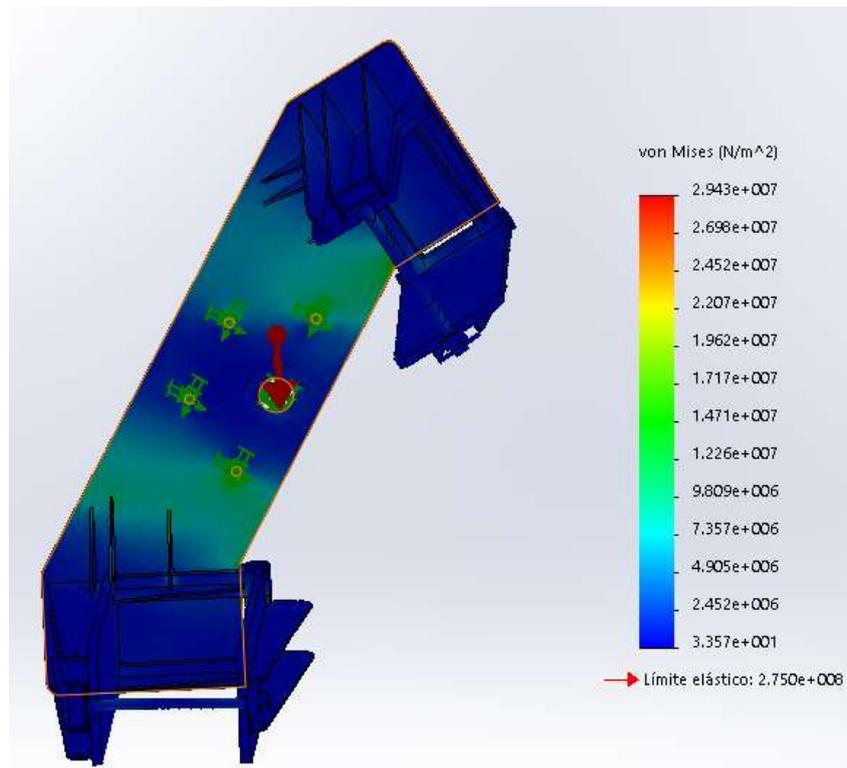


Ilustración 50. Tensiones a 240°

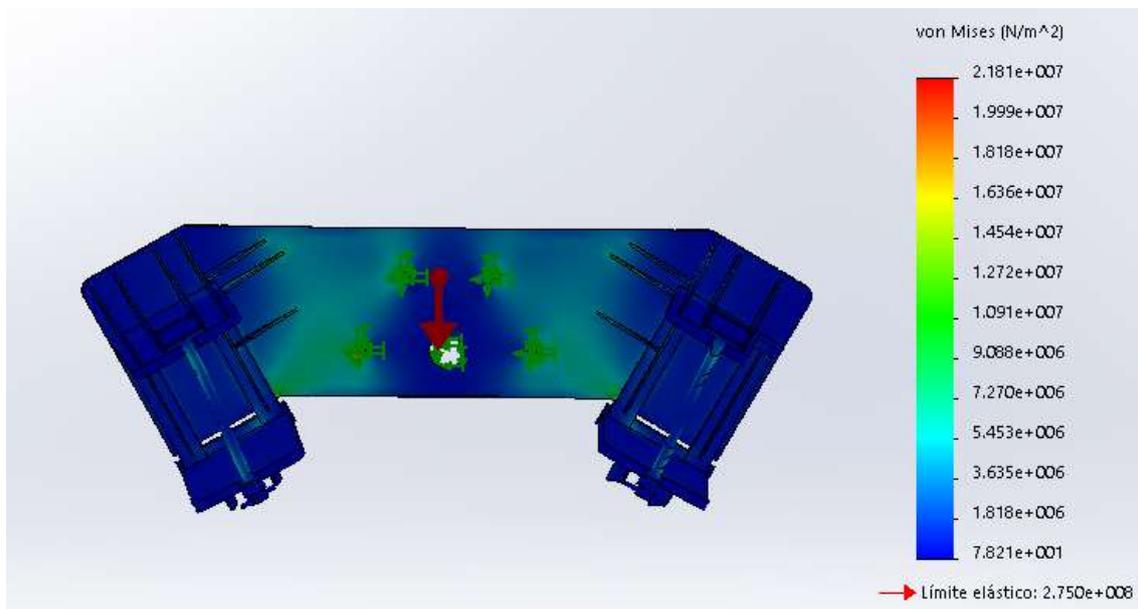


Ilustración 51. Tensiones a 180°

Factor de seguridad:

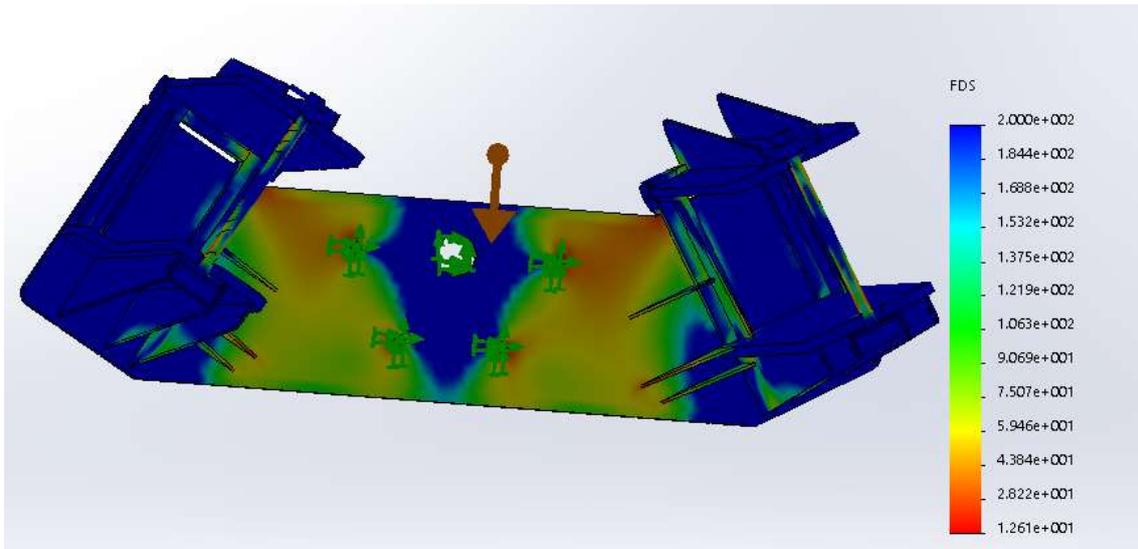


Ilustración 52. Factor de seguridad a 0°

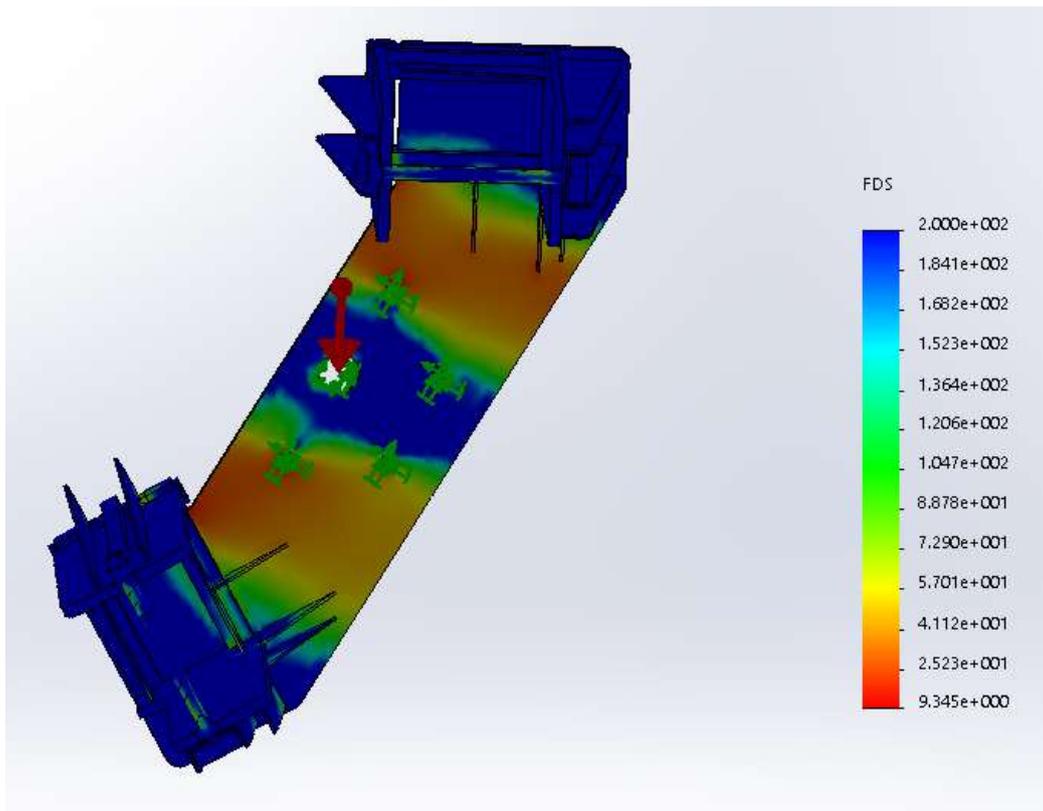


Ilustración 53. Factor de seguridad a 60°

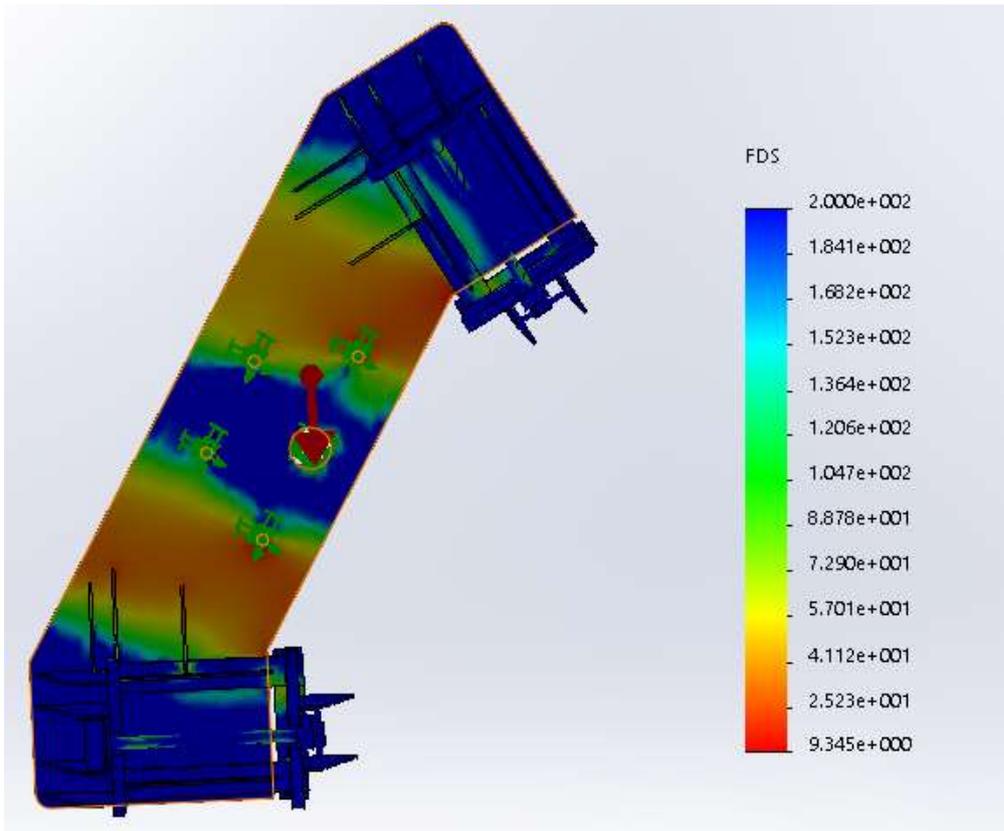


Ilustración 54. Factor de seguridad a 240°

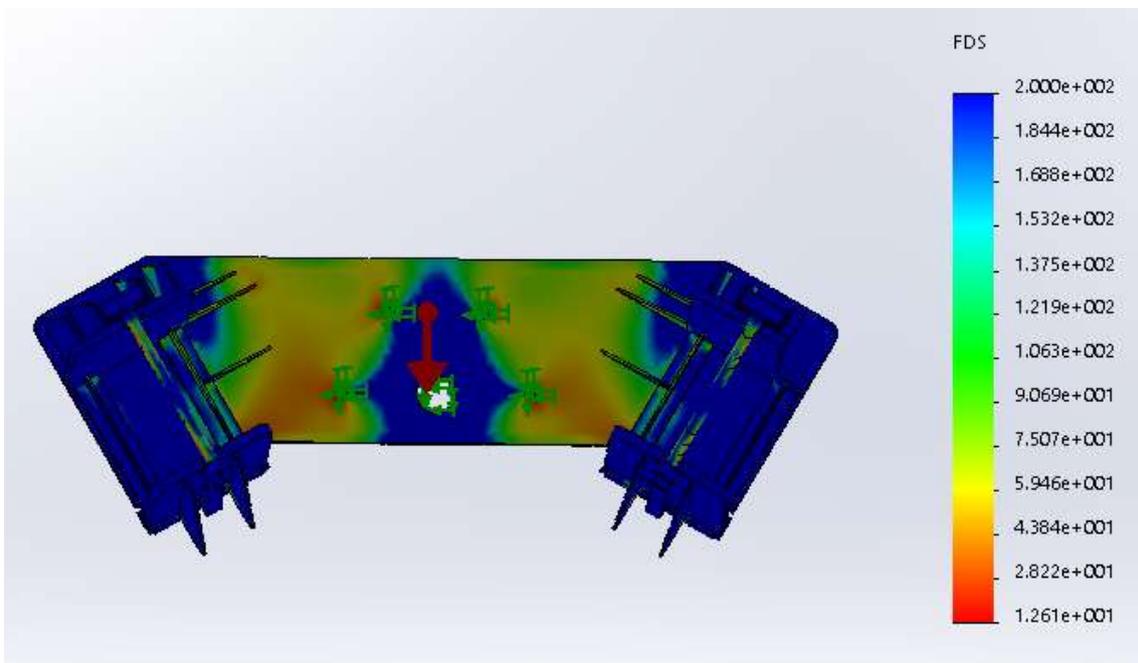


Ilustración 55. Factor de seguridad a 180°

Desplazamientos:

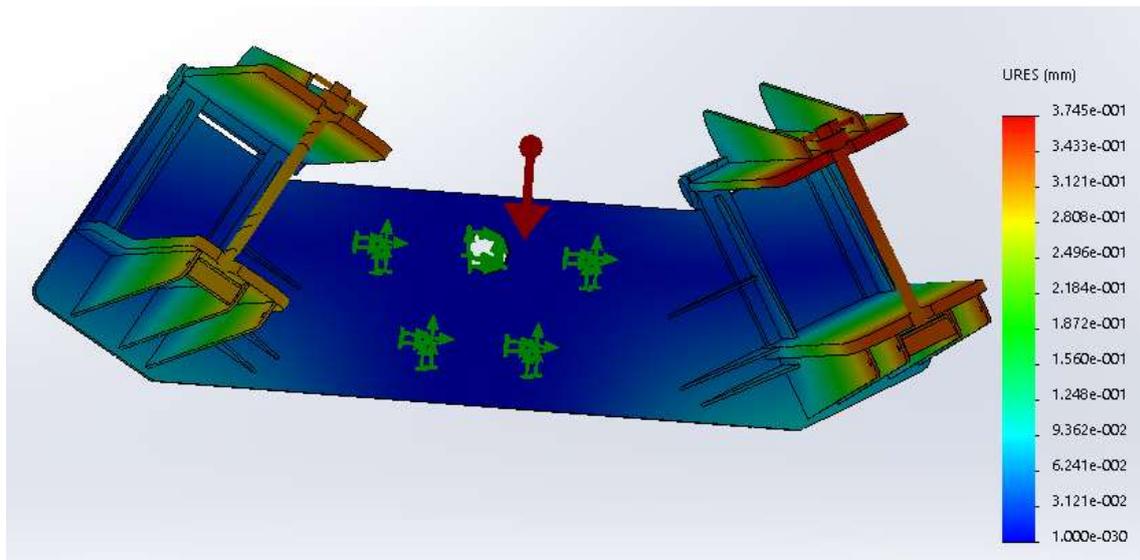


Ilustración 56. Desplazamientos a 0°

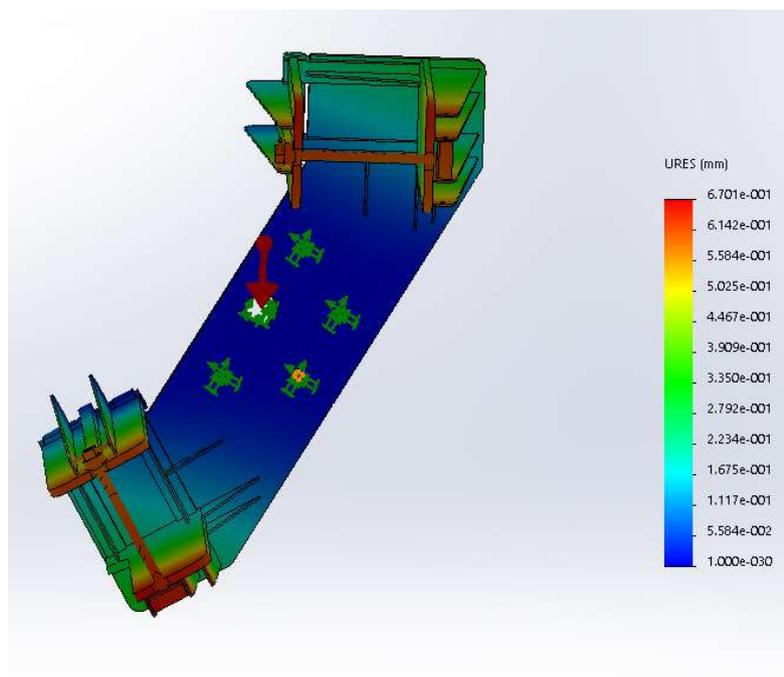


Ilustración 57. Desplazamientos a 60°

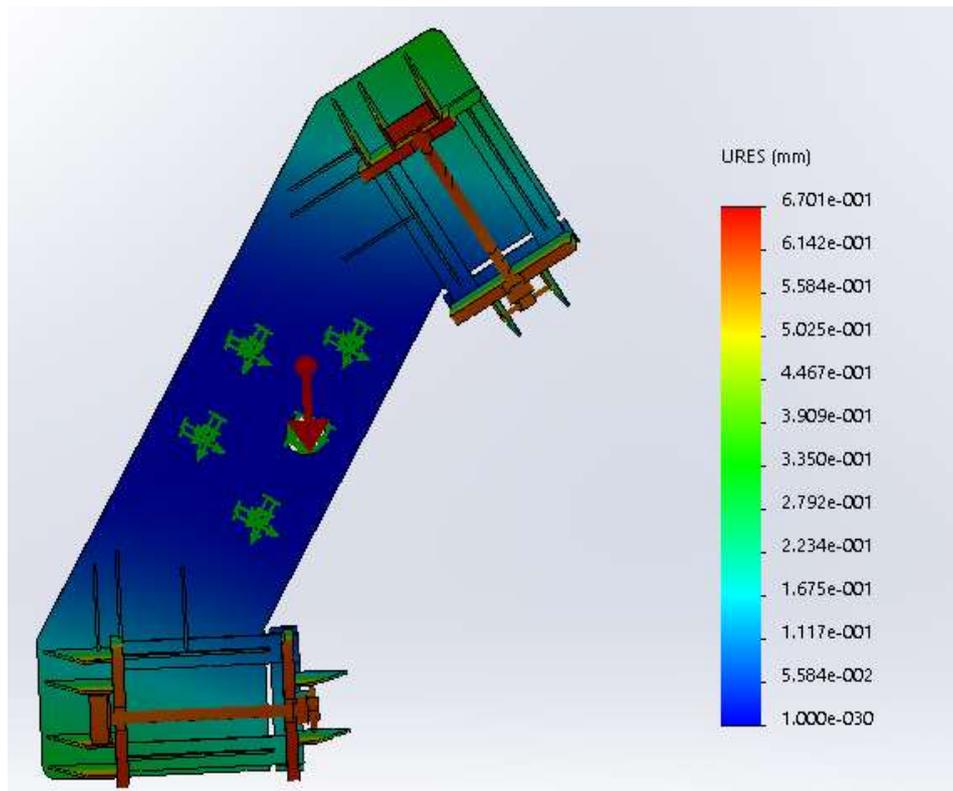


Ilustración 58. Desplazamientos a 240°

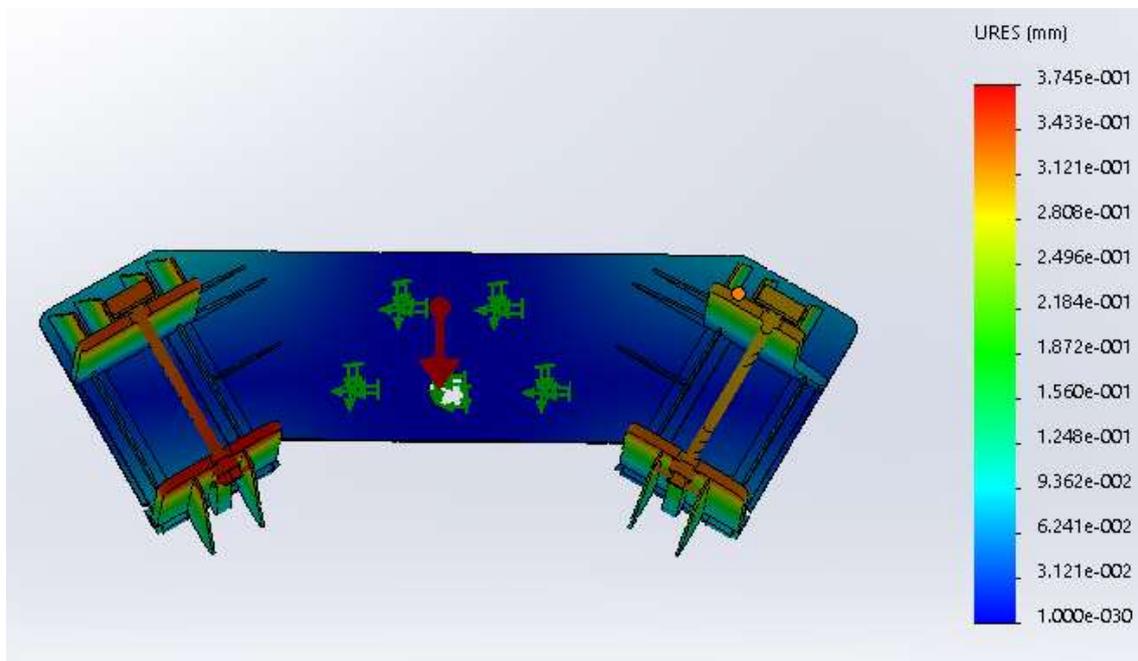


Ilustración 59. Desplazamientos a 180°

6.4.2 Supuesto 2: masa de 1500 kg

Todos los resultados han sido obtenidos siguiendo los pasos detallados en la extensión del trabajo.

Tensiones:

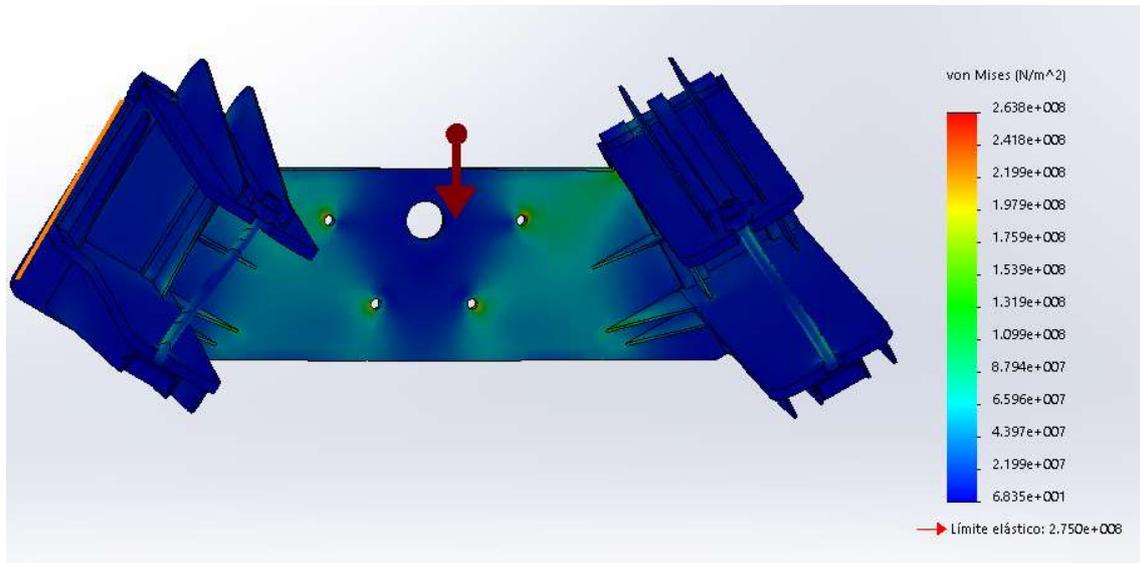


Ilustración 60. Tensiones a 0°

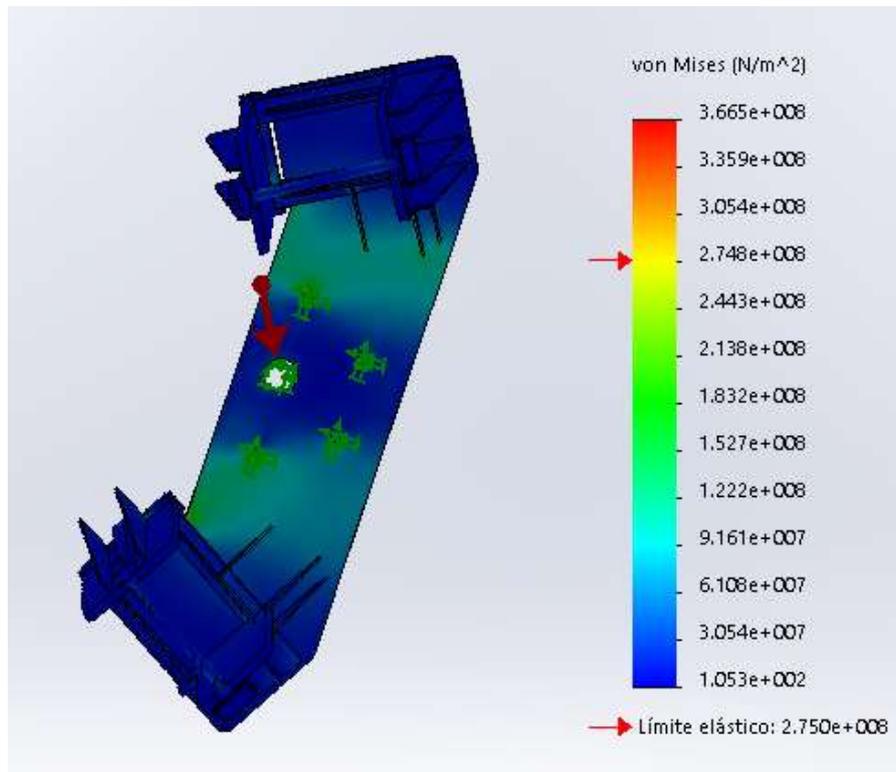


Ilustración 61. Tensiones a 60°

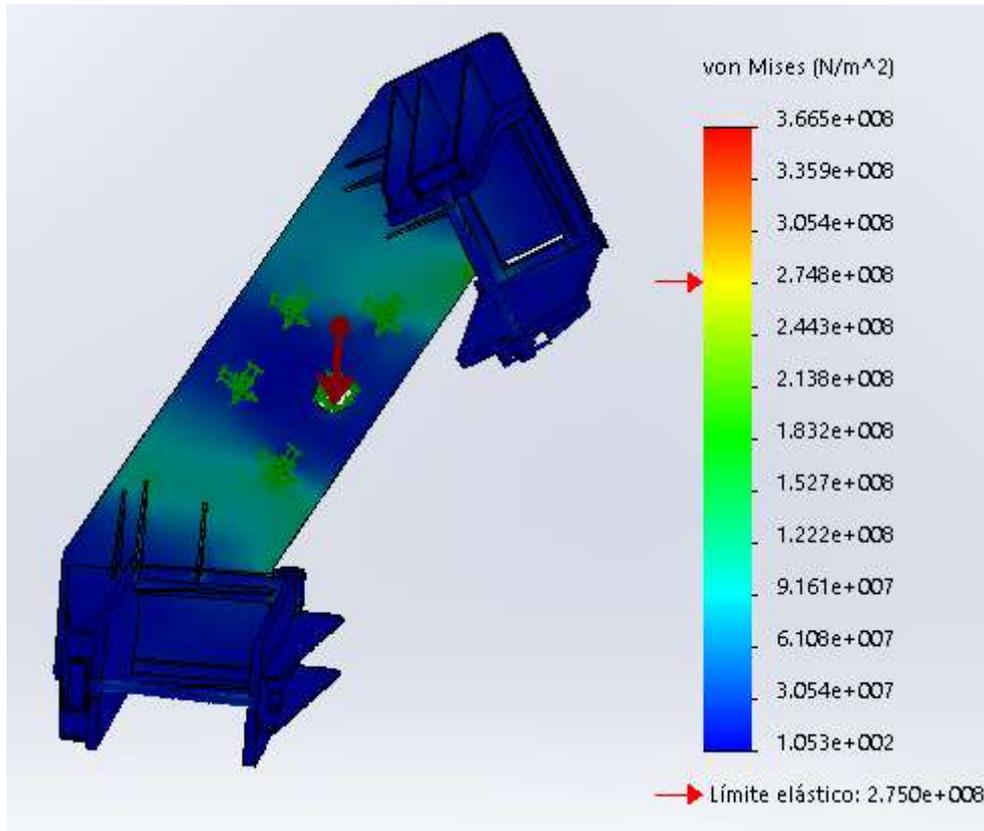


Ilustración 62. Tensiones a 240°

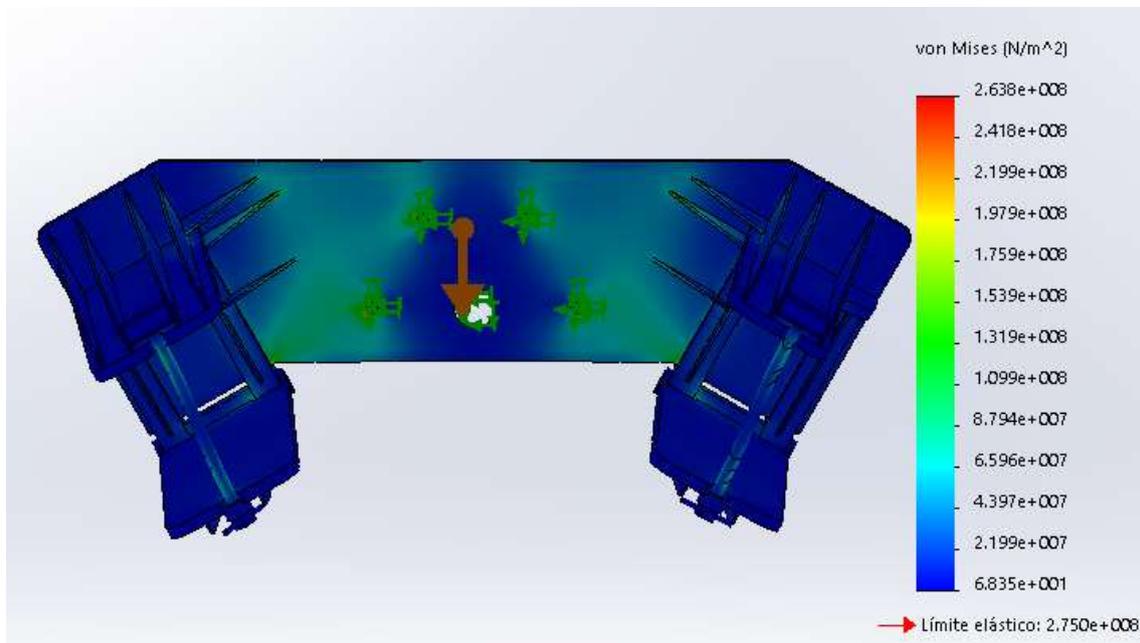


Ilustración 63. Tensiones a 180°

Factor de seguridad:

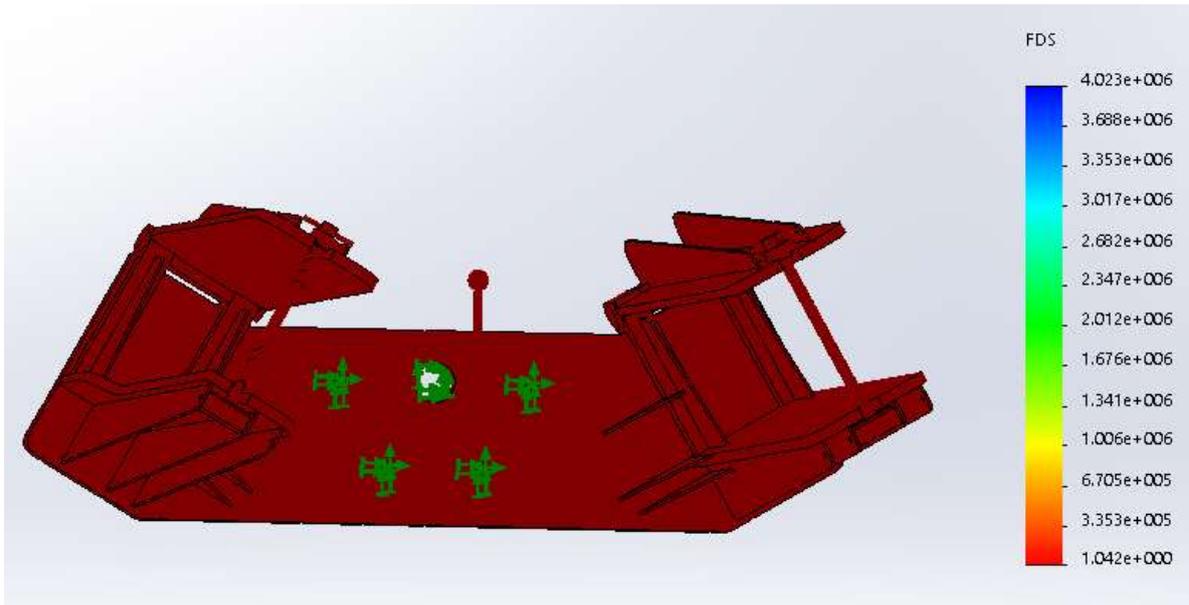


Ilustración 64. Factor de seguridad a 0°

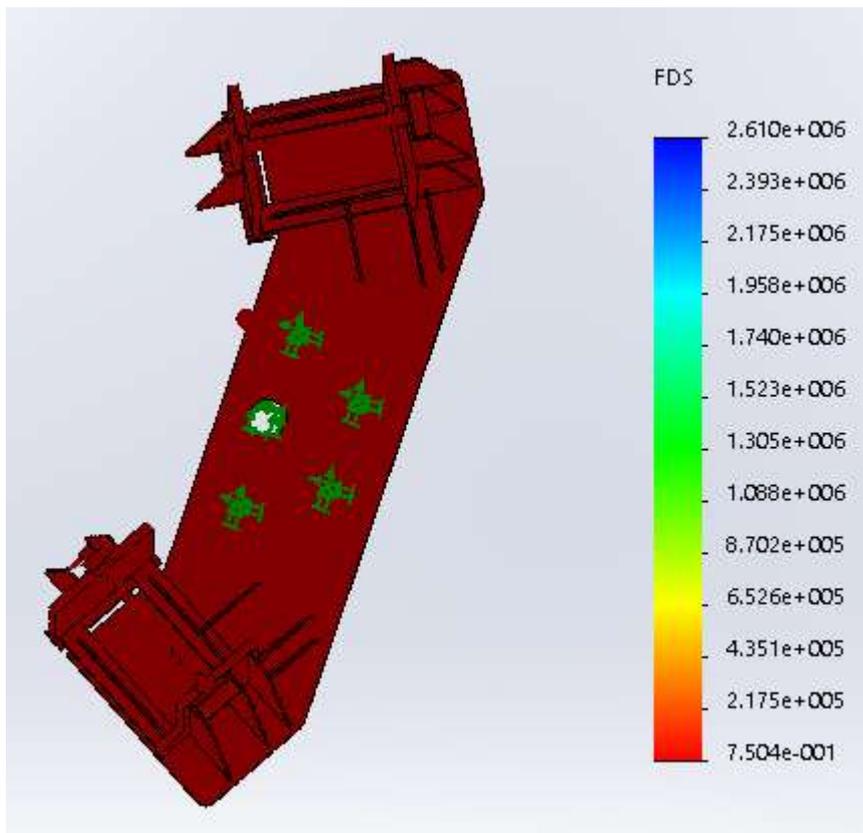


Ilustración 65. Factor de seguridad a 60°

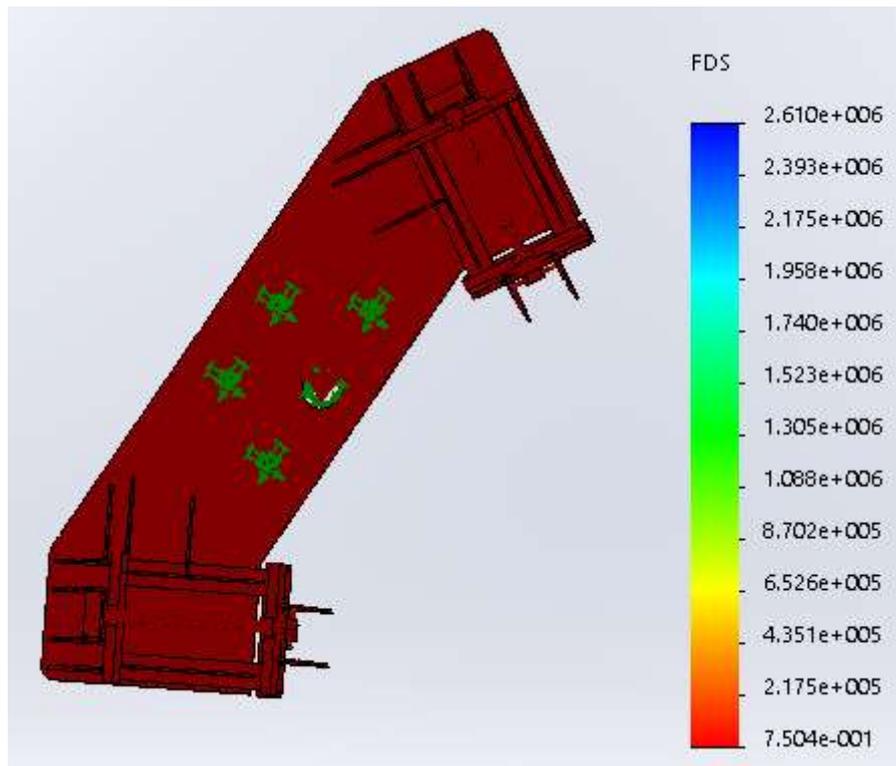


Ilustración 66. Factor de seguridad a 240°

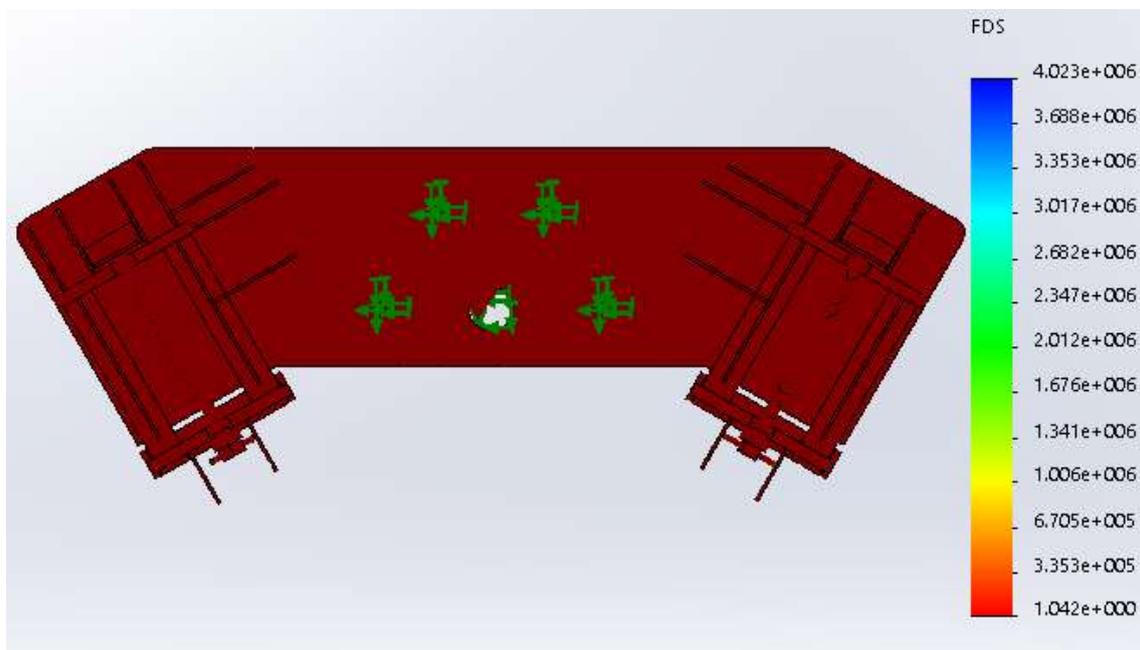


Ilustración 67. Factor de seguridad a 180°

Desplazamientos:

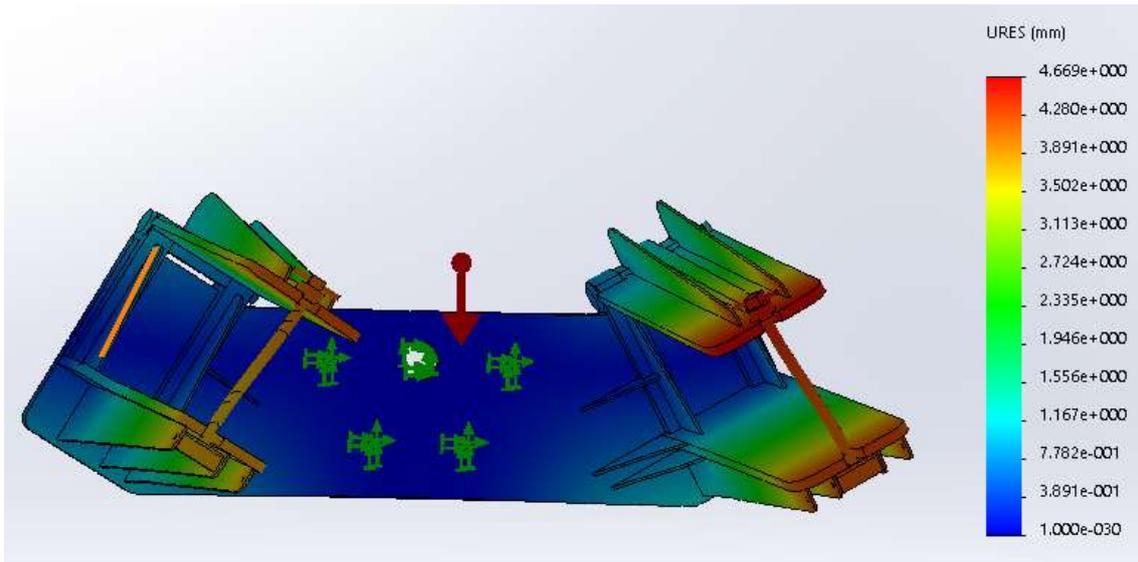


Ilustración 68. Desplazamientos a 0°

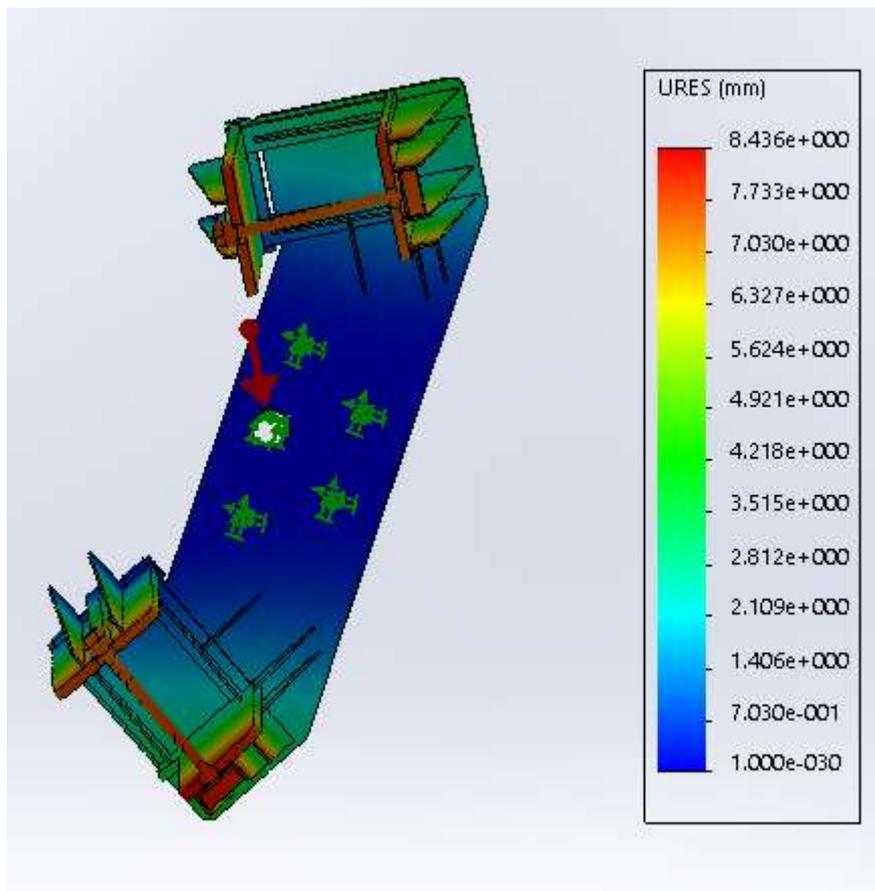


Ilustración 69. Desplazamientos a 60°

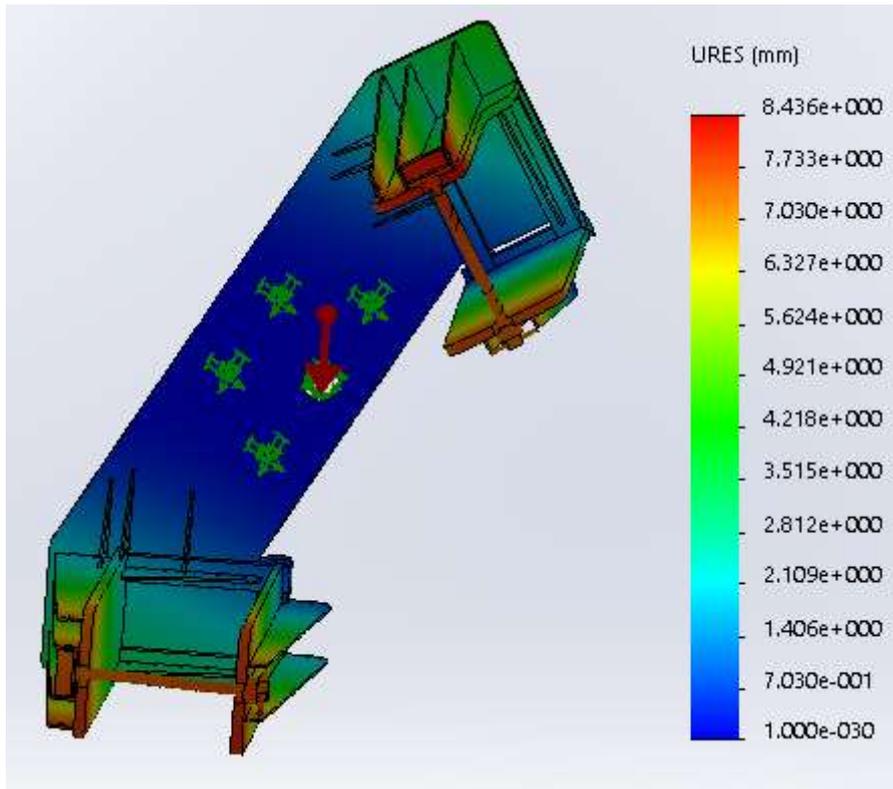


Ilustración 70. Desplazamientos a 240°

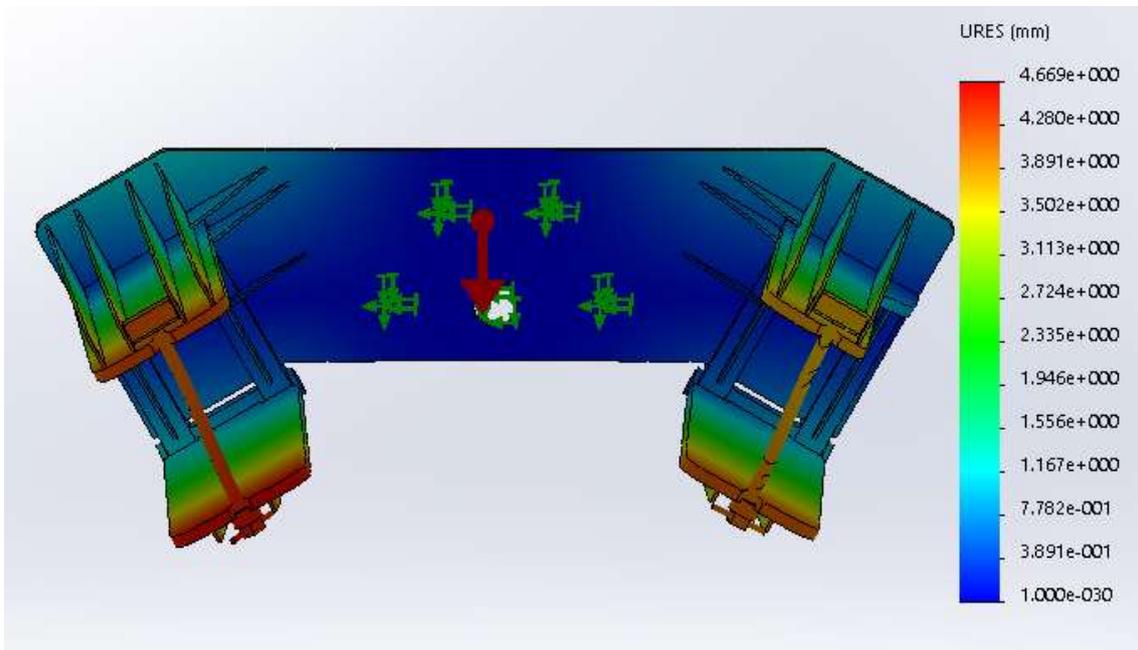


Ilustración 71. Desplazamientos a 180°

## 7. CONCLUSIONES

En el capítulo presente, se procederá a comentar las conclusiones realizadas tras el estudio de los casos de análisis.

| Masa 5 kg                      | 0°                | 60°               | 240°              | 180°              |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Tension máx (Pa)</b>        | $2,18 \cdot 10^7$ | $2,94 \cdot 10^7$ | $2,94 \cdot 10^7$ | $2,18 \cdot 10^7$ |
| <b>Factor seguridad min</b>    | 12,6              | 9,34              | 9,34              | 12,6              |
| <b>Desplazamiento máx (mm)</b> | 0,04              | 0,07              | 0,07              | 0,04              |

Tabla 1. Tabla de resultados para masa de 5 kg

| Masa 1500 kg                   | 0°                | 60°               | 240°              | 180°              |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Tension máx (Pa)</b>        | $2,64 \cdot 10^8$ | $3,66 \cdot 10^8$ | $3,66 \cdot 10^8$ | $2,64 \cdot 10^8$ |
| <b>Factor seguridad min</b>    | 1,04              | 0,75              | 0,75              | 1,04              |
| <b>Desplazamiento máx (mm)</b> | 4,67              | 8,44              | 8,44              | 4,67              |

Tabla 2. Tabla de resultados para masa de 1500 kg

Para el supuesto de una masa de 5 kg, como la lógica dictamina los valores de tensión máxima soportada están lejos del límite elástico. El menor factor de seguridad es mayor a 9, por lo que el diseño cumple. Por último, los desplazamientos son menores a 0.2, que se ha definido como el valor crítico máximo. Este caso de estudio se ha realizado para obtener datos positivos en todos los aspectos y por ello las sollicitaciones mecánicas eran muy poco exigentes.

El otro supuesto de estudio, con masa de 1500 kg, tiene sentido realizarlo, ya que se trata de la simulación con las cargas a las que se vería sometido el útil en la vida real.

En este caso de estudio, podemos ver gracias a la tabla 2 que para los ángulos 0° y 180° el valor máximo de las tensiones es el mismo, y que este se encuentra en las cercanías de los taladros. Pero si analizamos las representaciones de las tensiones, podemos comprobar que el material no tiene la misma distribución de tensiones. Con este análisis comprobamos que el útil no es simétrico, y tiene un comportamiento diferente según el ángulo de giro.

Analizando los resultados, bastaría con irse a cualquier valor de desplazamientos para rechazar el diseño, pero vamos a analizarlo más detalladamente.

En el caso de 0°, obtenemos un valor de tensiones máximas de 264 MPa, mientras que el límite elástico es de 275MPa, por lo tanto, estamos dentro de los límites, pero con unos valores que cualquier ingeniero debería descartar. El factor de seguridad es mayor que 1, pero también es demasiado bajo como para poder considerar el útil como válido. La afirmación de que el diseño del útil no cumple los requerimientos se confirma con los desplazamientos calculados, siendo estos un orden de magnitud superiores a los permitidos. Cuando se gira el útil la respuesta a las sollicitaciones es aún más pobre, por lo tanto, podemos concluir que el diseño deberá ser

modificado reforzando la respuesta en todas las direcciones, y habrá que hacer mayor énfasis en el comportamiento del útil dependiendo del grado de giro.

Después del análisis anterior, concluimos que el útil diseñado no cumplirá los requisitos mecánicos, teniendo que ser modificado.

Además de las conclusiones sacadas de los resultados analíticos, se van a numerar algunas conclusiones relativas al empleo de herramientas informáticas en el diseño industrial.

El software CAD-FEM permite simular el comportamiento de los diseños que creamos con rapidez, facilidad y ahorro de costes sin tener que fabricar cada pieza cada vez que la modifiquemos.

Después del diseño, tendremos que validar el modelo mediante una maqueta 1:1 en piezas pequeñas o en otras relaciones si fuera necesario por limitaciones de tamaño, coste o cualquier otra limitación posible.

Por tanto, podemos concluir que el empleo de herramientas informáticas en el diseño y cálculo mejoran la productividad, ahorran costes y tiempos, proporcionando opciones que hace 50 años resultarían difíciles de imaginar.

## 8. APORTACIONES

En este capítulo, vamos a nombrar las aportaciones hechas para el presente trabajo:

- Modelado en 3D con el software SolidWorks: como se comentó en el capítulo “6.1 modelaje” se han creado las piezas del útil en el programa.
- Guía detallada de los pasos a seguir para realizar un estudio estático con gravedad y masa distribuida: el trabajo puede seguirse paso a paso como si fuera un manual de uso, con la ayuda de las imágenes. Este era uno de los objetivos del trabajo, crear un documento para que personas que no hayan realizado antes un estudio sean capaces de realizarlo con la mayor facilidad posible.
- Criterios de evaluación de los resultados: indicando en cada resultado los criterios para aceptar o rechazar un diseño.

## 9. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Con la finalización de los estudios estáticos no se puede afirmar categóricamente la validez del diseño, para ello, una vez terminados los estudios estáticos los pasos lógicos a realizar son:

-Comprobación del ensamblaje a fatiga: para simular la respuesta del ensamblaje ante ciclos de carga/descarga. Se podría realizar una guía como la presentada en este trabajo.

-Validación de los resultados simulados: una vez obtenidos los resultados del software se deberá proceder a la fabricación del útil y a cargar con las sollicitaciones requeridas. Gracias a galgas extensiométricas en el útil se recogerán los datos de las deformaciones, y gracias a la relación de la Ley de Hooke entre tensiones y deformaciones podremos hallar el estado tensional. Comparando los valores de tensión y deformación obtenidos por medio de las galgas extensiométricas en el ensamble real con los obtenidos en la simulación con el programa informático podremos validar el estudio.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

García, E. G. (s.f.). *Apuntes Dinámica Ferroviaria*.

RENFE. (s.f.). *Ficha técnica serie 130 y 170*.

S.A, G. (s.f.). *Manual técnico gato volteador GV-04.17*.

Systems, D. (s.f.). *Ayuda SolidWorks*.

TALGO. (s.f.). *Información TALGO 250 Dual*.

TALGO. (s.f.). *Información TALGO 250*.