



**Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza**

# PROYECTO FIN DE CARRERA

Cálculo y diseño de una camilla con cilindro  
hidráulico

Autor: Francisco Gil Chico

Directora: Paula Canalís Martínez

Área de Ingeniería Mecánica



## Índice

<b>1.- Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>2.- Objeto y alcance del proyecto. ....</b>	<b>3</b>
<b>3.- Proceso de diseño y su aplicación. ....</b>	<b>5</b>
3.1.- Proceso de diseño .....	5
3.2.- Aplicación del proceso de diseño.....	9
<b>4.- Descripción de la máquina.....</b>	<b>11</b>
4.1.- Descripción .....	11
4.2.- Características de la camilla hidráulica.....	16
<b>5.- Cálculos analíticos .....</b>	<b>18</b>
5.1.- Cálculo de la carrera del cilindro hidráulico IJ. ....	20
5.2.- Cálculo de la fuerza máxima necesaria en el cilindro hidráulico. ....	24
5.3.- Selección del diámetro normalizado del cilindro hidráulico. ....	32
5.4.- Cálculo a pandeo del diámetro normalizado del vástago. ....	33
5.5.- Cálculo del diámetro de los pasadores J e I, punto inferior y superior del cilindro hidráulico. ....	35
5.6.- Cálculo de los diámetros de los pasadores A, B, E, F, a simple cortadura y suponiendo que deben tener el mismo diámetro. ....	37
5.7.- Cálculo de la anchura “b” y el espesor “e” de las orejetas del amarre del cilindro hidráulico. ....	39
5.8.- Cálculo del perfil cuadrado para todas las barras de la estructura. ....	43
5.8.1.- Barra I - I’ .....	43
5.8.2.- Barra J - J’ .....	47
5.8.3.- Barra AB (plataforma) .....	51
5.8.4.- Barra AIE (travesaño) .....	53
5.8.5.- Barra EHF (bastidor o chasis).....	57
5.8.6.- Elección perfil .....	60
<b>6.- Diseño en SolidWorks.....</b>	<b>64</b>
6.1- Introducción.....	64
6.2- Diseño de piezas en SolidWorks .....	68
6.2.1.- Patas .....	68

6.2.2.- Barra abajo (bastidor) .....	69
6.2.3.- Barra sujeción pistón (abajo) .....	69
6.2.4.- Barra sujeción pistón (arriba).....	70
6.2.5.- Travesaño.....	70
6.2.6.- Barra superior (plataforma) .....	71
6.2.7.- Barra refuerzo (plataforma).....	71
6.2.8.- Orejetas.....	72
6.2.9.- Ensamblaje .....	72
<b>7.- Comparación de cálculos teóricos y cálculos mediante la herramienta SolidWorks Simulation .....</b>	<b>74</b>
7.1- Introducción a SolidWorks Simulation.....	74
7.2- Comparación de cálculos analíticos y cálculos en las piezas más importantes de la estructura .....	75
7.2.1.- Barra superior de la camilla hidráulica (bastidor).....	75
7.2.2.- Travesaño.....	78
7.2.3.- Barra inferior (Bastidor) .....	81
7.2.4.- Barra I –I', anclaje superior del cilindro hidráulico .....	85
7.2.5.- Barra J –J', anclaje inferior del cilindro hidráulico .....	89
<b>8.- Análisis del ensamblaje completo de la estructura mediante la herramienta SolidWorks Simulation .....</b>	<b>93</b>
8.1.- Explicación del análisis.....	93
8.2.- Análisis de los ensamblajes .....	95
8.2.1.- Ensamblaje en macizo con Acero AISI 1020.....	95
8.2.2.- Ensamblaje en macizo con Aleación de aluminio 2219 - T81 .....	100
8.2.3.- Resumen de datos obtenidos en los ensamblajes .....	103
8.2.4.- Ensamblaje en macizo con Aleación de aluminio 2219 - T81 y con una carga aplicada en el extremo izquierdo de la plataforma .....	105
8.2.5.- Ensamblaje en macizo con Aleación de aluminio 2219 - T81 y con la carga aplicada en una zona determinada .....	109
<b>9.- Conclusiones .....</b>	<b>112</b>
<b>10.- Bibliografía.....</b>	<b>113</b>
<b>11.- Anexos .....</b>	<b>114</b>

## 1.- Introducción

En este proyecto queremos ver la evolución del diseño y cálculo de máquinas, ya que queremos integrar al cálculo analítico un software informático para complementar y comprobar dicho cálculo analítico. El software informático que usaremos es un programa de diseño llamado SolidWorks.

Aun así insistiremos en que dicho software informático no es sustitutivo de los cálculos analíticos llevados a cabo, sino que el objeto de este software es complementar dichos cálculos y así obtener una ayuda durante el proceso, ya que no hay que olvidarse que la base de todo ingeniero son el conocimiento teórico del cálculo de máquinas.

## 2.- Objeto y alcance del proyecto.

El presente proyecto está basado en la integración de herramientas CAD / CAE en el proceso de diseño.

Este proyecto ha sido realizado por el alumno Francisco Gil Chico de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza.

El objeto del proyecto es el cálculo de una camilla con cilindro hidráulico, con el fin de asimilar los siguientes objetivos:

- 1) Integración de SolidWorks como herramienta de CAD / CAE
- 2) Diseño de una camilla hidráulica a partir de una camilla de similares características alojada en el edificio BIFI (Instituto de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos) situado detrás del Edificio Torres Quevedo de la cual obtendremos los planos y la información necesaria.

La integración de SolidWorks como herramienta de diseño nos permite tener una idea más visual de cómo funciona la camilla, así como las restricciones de movimientos y la manera de transmisión de fuerzas de unos elementos a otros de la citada máquina como ahora se explica.

El funcionamiento, las restricciones de movimiento y la transmisión de fuerzas entre los elementos de la máquina se pueden visualizar fácilmente a la hora de realizar los ensamblajes entre las diferentes piezas. Los ensamblajes definen de forma clara y precisa como están unidas y la manera de interactuar unas piezas con otras. Con el ensamblaje completo podemos observar de qué manera funciona toda la máquina.

El segundo objetivo del proyecto es comprobar, a través del cálculo en SolidWorks, que los cálculos analíticos realizados, las diferentes hipótesis y las condiciones del diseño que posteriormente comentaremos sean las correctas.

### 3.- Proceso de diseño y su aplicación.

#### 3.1- Proceso de diseño

##### Conceptos

- Diseño: Transformación de conceptos e ideas en maquinaria útil.
- Máquina: Combinación de mecanismos y otros componentes que transforma, transmite o emplea energía, carga o movimientos para un propósito específico.

Hay muchos procedimientos a seguir para llevar a cabo el diseño de una máquina, tanto procesos como diseñadores. En este apartado se va a explicar el proceso que se ha estudiado en la asignatura de diseño de máquinas y sus fases son:

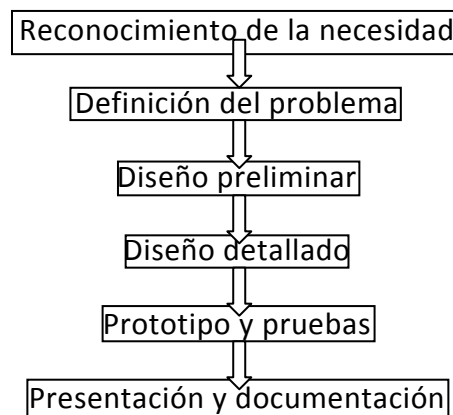
##### Diseño

- Consideraciones previas.
- Proceso iterativo.
- Reconocimiento de la necesidad.
- Definición del problema.
- Diseño preliminar y diseño detallado.
- Presentación y documentación.

A continuación explicamos brevemente cada una de las fases del proceso de diseño y el orden de acción de éstas.

En la fase de diseño se comienza con la consideraciones previas que consiste en conocer los sistemas mecánicos y elementos ya existentes y también el conocimiento y estudio de máquinas similares a la que se quiere diseñar existentes ya en el mercado. Nos puede servir de ayuda a la hora de diseñar nuestra propia máquina o simplemente, descubrir la existencia de ésta en el mercado.

Seguidamente, hay que conocer que el proceso de diseño es un proceso iterativo en el que hay varios pasos que hay que repetir en todo diseño.



En estas fases, se puede volver atrás de unas a otras según las necesidades del proceso de diseño.

Este proyecto se ha centrado en las fases de “diseño preliminar” y “diseño detallado”. A continuación se describen éstas más detalladamente.

### **Diseño preliminar**

- Análisis de variantes: cuando ya se tiene clara la necesidad que se tiene que satisfacer y está definido el problema se analizan las posibles soluciones a éste. Todas las posibles soluciones o variantes deben resolver la necesidad de la que hablamos y que sea posible llevarlas a cabo.



- Esquema: Seguidamente se realiza un croquis de la variante de encaje más el diseño de máquina que se desea realizar. Debe ser un dibujo intuitivo que tomará forma tras los cálculos.

### Diseño detallado

- Hipótesis de cálculo: Este paso consiste en establecer una serie de pautas que se tienen que seguir a la hora de calcular. Muchas veces éstas son establecidas por el cliente (una determinada velocidad del elemento principal de la máquina, una potencia que se debe transmitir, etc.). También se incluyen en este apartado las teorías de cálculo utilizadas, coeficientes de seguridad, etc.

- Elementos comerciales: Cuando se han establecido las hipótesis de cálculo y se han llevado a cabo éstos, se procura que, en la medida de lo posible, los elementos dimensionados estén normalizados para abaratar costes y facilitar futuras reparaciones. Así no se pierde tiempo y dinero en fabricar o mecanizar elementos ya existentes en el mercado.

- Ensamblaje: Una vez dimensionados todos los elementos, se deben juntar para formar la máquina. Para ello hay que mecanizar algunos de estos elementos, fabricar uniones, etc.

- Rediseño: En todos los pasos anteriores pueden surgir problemas que nos lleven a volver a diseñar algún elemento, sobre todo, en el proceso de ensamblaje ya que, todos los elementos diseñados por separado, deben formar la máquina final, y no siempre encajan bien unos con otros.

### **Definición de CAD y CAE**

CAD (Computer Aided Design): En castellano DAO (diseño asistido por ordenador): es el uso amplio rango de herramientas computacionales que asisten a ingenieros, arquitectos y a otros profesionales del diseño en sus respectivas actividades.

CAE (Computer Aided Engineering): Ingeniería asistida por computadora o por ordenador. Es el conjunto de programas informáticos que permiten analizar y simular los diseños de ingeniería realizados con el ordenador, o creados de otro modo e introducidos en el ordenador, para valorar sus características, propiedades, viabilidad y rentabilidad. Su finalidad es optimizar su desarrollo y consecuentes costos de fabricación y reducir al máximo las pruebas para la obtención del producto deseado.

### **Integración de herramientas CAD/CAE en el proceso de diseño**

Las herramientas CAD/CAE se pueden integrar en el proceso de diseño de las máquinas descrito anteriormente como vamos a explicar a continuación.

En los elementos comerciales se pueden introducir estas herramientas ya que muchos de los programas contienen bibliotecas con elementos estándar normalizados como vigas, tornillos, etc. También se pueden obtener todo tipo de piezas, normalizadas o no, mediante el dibujo ya sea en 2D o 3D.

Volviendo atrás en el proceso de diseño, en la fase de hipótesis de cálculos y los cálculos propiamente dichos, una vez diseñadas las diferentes piezas en los programas CAD, se pueden calcular mediante el Método de Elementos Finitos (MEF), lo que ya formaría parte del CAE.

Ya calculadas las piezas mediante el Métodos de Elementos Finitos, se puede integrar las herramientas CAD/CAE en el ensamblaje de las piezas. Unidas todas ellas, realizadas en 3D, se ensamblan y haciendo de manera más visual los posibles errores (colisiones y otras causas del mal funcionamiento de la máquina). Esto de halla realizando simulaciones en dichos programas.

Cuando se ven los errores, sobre todo en los ensamblajes, se vuelve atrás en las fases de diseño volviendo a realizar todo lo descrito en este apartado anteriormente, es decir, también forman estas herramientas parte del rediseño.

### **3.2.- Aplicación del proceso de diseño**

El proceso llevado a cabo ha sido el siguiente:

1.- Se han realizado los cálculos analíticos para el dimensionamiento de todas las piezas de la camilla hidráulica.

2.- Hemos diseñado dichas piezas en 3 dimensiones en SolidWorks y hemos procedido a su ensamblaje dando forma a la camilla hidráulica.

3.- Se ha cargado la herramienta de cálculo de SolidWorks, SolidWorks Simulation, con la que hemos hecho diferentes pruebas de cálculo para ver como afectaba al ensamblaje en sí y así poder comprobar si los cálculos analíticos eran correctos. Para ésta última parte hemos asignado las fuerzas a las que están sometidas las piezas estudiadas.

Primeramente, una vez reconocida nuestra necesidad, diseñar la camilla hidráulica de tal manera que pueda aguantar el peso exigido, en nuestro caso 150 kg, y definido como se va a ser el diseño, apoyándonos en los planos de la camilla similar que es nuestro punto de partida, se entra en el diseño preliminar teniendo en cuenta diferentes factores como pueden ser el coeficiente de seguridad, material de la camilla, etc.

El resto de pasos del diseño se llevan a cabo una vez realizados los cálculos estáticos de todas las piezas de la camilla hidráulica, ya que, una vez hechos y obtenidos todos los dimensionamientos, se podrán buscar todos los elementos normalizados (cilindro hidráulico, pasadores de diámetro normalizado...) que cumplan con los cálculos efectuados. En el archivo de CAD/CAE se podrán introducir, gracias a las bibliotecas que contienen dichas aplicaciones, o bien, por archivos que algunos fabricantes permiten descargar de la red.

Una vez obtenidas todas las piezas por separado, ya sean normalizadas o fabricadas (travesaños, bastidor...) se realiza el ensamblaje. Con todas las piezas unidas en la herramienta CAD/CAE se ven con facilidad las colisiones y demás errores de la camilla hidráulica. De esta fase se pasa al rediseño en caso de aparecer alguno de estos errores.

Por último, tras el ensamblaje, en la herramienta de CAD/CAE se procede a hacer los cálculos mediante el Método de Elementos Finitos y que anteriormente se han realizado mediante el cálculo estático. Las piezas pueden dar errores debido a simplificaciones en los cálculos o hipótesis erróneas. Si éstos se dan, de esta fase también pasaríamos al rediseño.

Como se puede apreciar, las herramientas CAD/CAE son muy útiles en el proceso de diseño mecánico, ya que hacen los errores más visuales y nos permiten realizar los mismos cálculos que se han realizado teóricamente por estática, por el Método de Elementos Finitos en dichas herramientas.

## 4.- Descripción de la máquina

### 4.1.- Descripción

La máquina que se va a estudiar o diseñar es una camilla hidráulica. Esta máquina se puede utilizar en diferentes ámbitos como puede ser en hospitales, en clínicas privadas o incluso en lugares particulares ya que su uso más convencional es principalmente para fisioterapia y masajes, aunque también pueden tener otros usos.

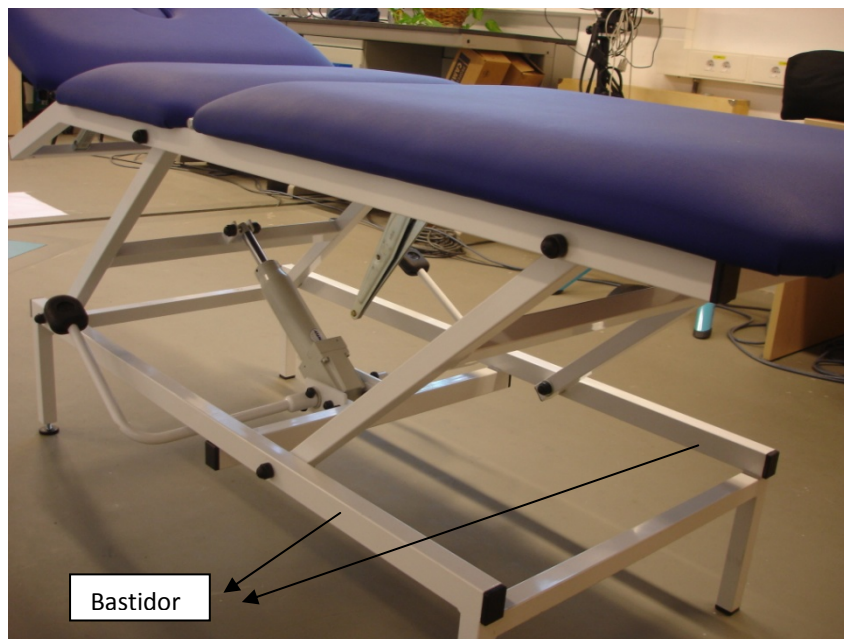


*Imagen 1: Camilla hidráulica que va a ser estudiada.*

Esta camilla hidráulica, como hemos dicho anteriormente, se encuentra en el edificio situado detrás del Edificio Torres Quevedo, el BIFI (Instituto de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos), y será la que sometamos a estudio y a partir de la cual podremos diseñar y calcular nuestra camilla.

Como se puede observar en la imagen 1 hay una serie de elementos a destacar, ya que son imprescindibles para que haya un correcto funcionamiento y vamos a proceder a describirlos a continuación:

- Bastidor o chasis: Es la parte estructural que está situada en la parte inferior de la máquina y cuya función principal es soportar todas, o bien, la mayoría de las cargas a las que está sometida la camilla hidráulica, y a su vez, es el encargado de dotar la máquina de estabilidad que impida el vuelco o la pérdida de equilibrio, se coloque la carga de la manera que fuese, en la parte superior. Cabe decir que esta parte de la camilla no va directamente apoyada sobre el suelo, sino que, van unidas cuatro patas, una en cada extremo de la estructura, las cuales van apoyadas directamente sobre el suelo.



*Imagen 2: Bastidor o chasis.*



- Plataforma: Es la parte estructural situada en la parte superior de la camilla hidráulica, con una forma rectangular y hueca, sobre la que, como se puede observar en la foto anterior, se situarán las tres almohadas de la que está compuesta nuestra camilla, ya que, su función es apoyar la carga encima de éstas.



Imagen 3: Cuadro superior o plataforma.

- Tijeras o travesaños: Son las encargadas de elevar o descender la carga, en nuestro caso puede ser una persona, mediante la acción del cilindro. Los extremos de las tijeras o travesaños están unidos mediante pasadores, al bastidor o chasis en el caso de la parte inferior, y a la plataforma en el caso de la parte superior.

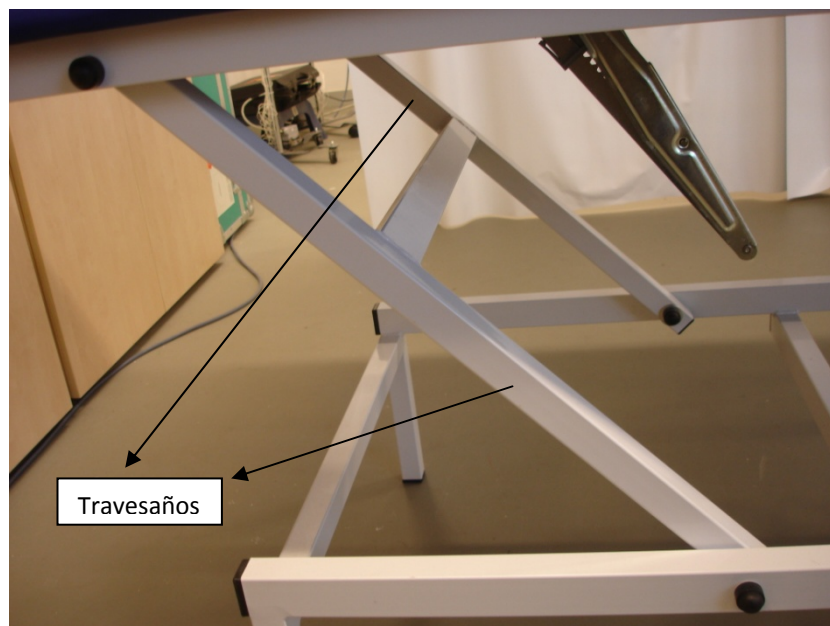
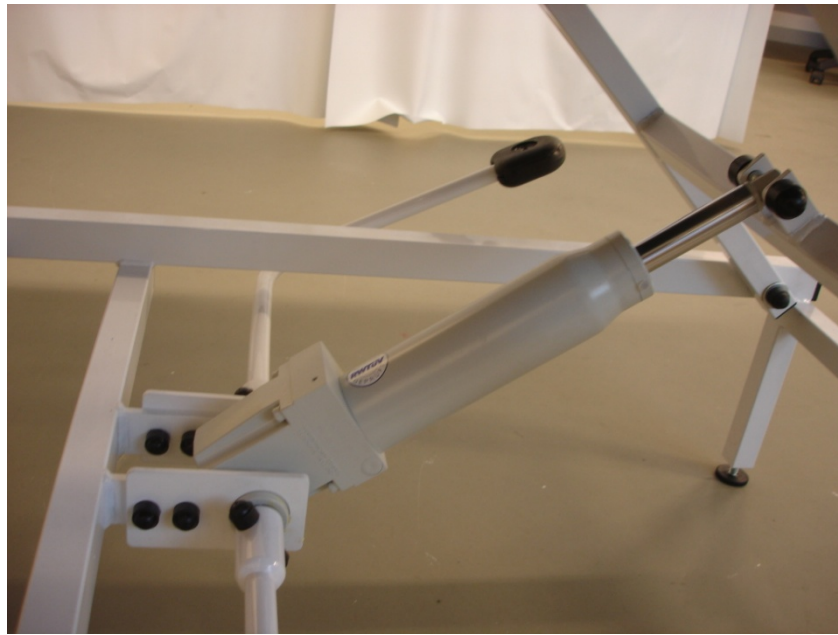


Imagen 4: Tijeras o travesaños.

- Cilindro hidráulico: Es el dispositivo que acciona las tijeras o travesaños y que tiene que proporcionar la fuerza necesaria para elevar o descender la carga. El cilindro se accionará por medio de un pedal, hacia arriba para subir o hacia abajo para bajar, disponiendo de uno a cada lado para mayor comodidad. El cilindro tiene que ser de doble efecto ya que trabaja en carga tanto al elevar la carga como al descenderla.



*Imagen 5: Cilindro hidráulico.*



Hay infinidad de tipos de camillas hidráulicas, aunque nuestra camilla a estudiar va a ser la mencionada anteriormente, a continuación mostramos otras variantes:



*Imagen 6: Tipos de camilla hidráulica.*

Como se puede observar en las dos imágenes anteriores, ambas camillas hidráulicas tienen las partes fundamentales comentadas anteriormente, aunque dispuestas de manera diferente. De esta manera se puede observar la cantidad de diseños o maneras diferentes que hay de diseñar las camillas hidráulicas. Dependiendo de esto podrán aguantar más o menos peso, la inclinación de las almohadas podrá ser una u otra, y así vemos unas de las muchas maneras que puede haber en el diseño de construcción de éstas.

## 4.2.- Características de la camilla hidráulica

A continuación se van a mostrar las características e hipótesis generales. Se detalla el funcionamiento y datos de importancia como, la capacidad de elevación, dimensiones, tipos de accionamiento, material y coeficiente de seguridad.

Capacidad de elevación	150 Kg
Dimensiones	A = 1300 mm
	B = 640 mm
	C = 250 mm (Posición más baja)
	D = 600 mm (Posición más alta)

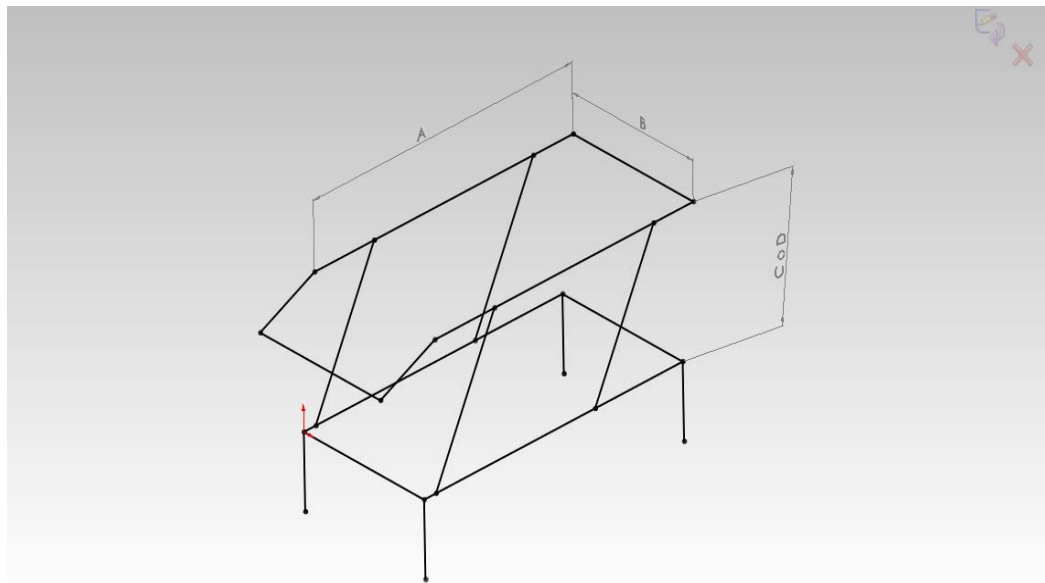


Imagen 7: Esquema 3D de la estructura.

Tipo de accionamiento	Cilindro hidráulico mediante palanca
Material	Acero E350 $\tau_f = 0,5 \cdot \sigma_f$
Coeficiente de seguridad	$C_{s,f} = 2$ , Teoría del cortante máximo

### Esquema 2D

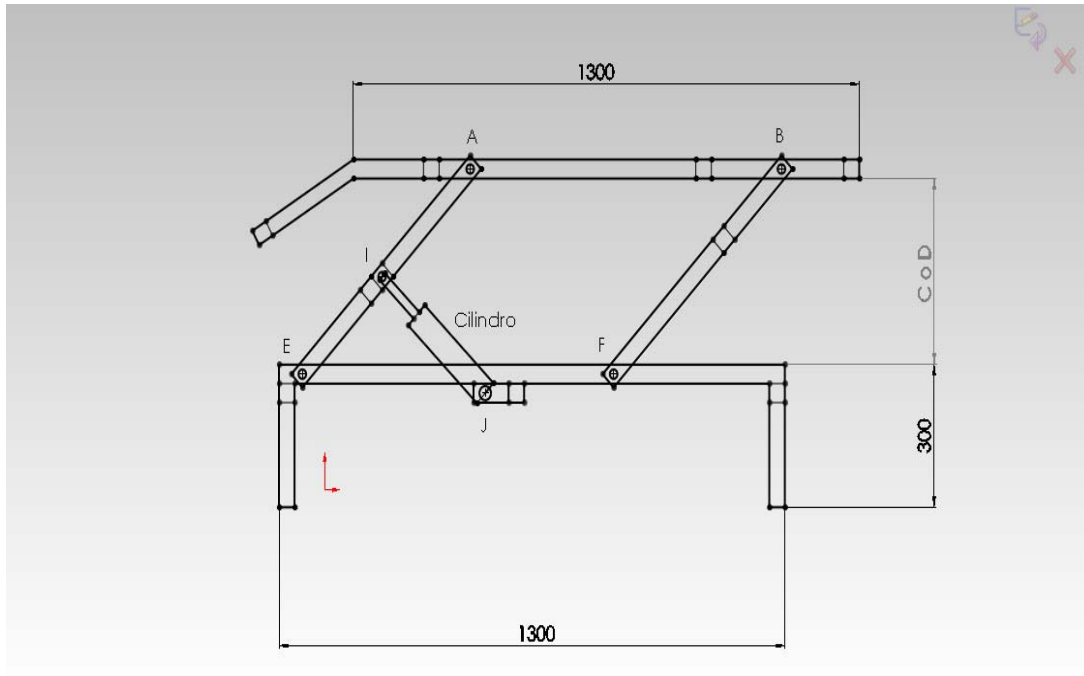


Imagen 8: Esquema 2D de la estructura.

En la foto anterior podemos observar un esquema en 2d simplificado de la que va a ser nuestra máquina a estudiar. Donde vemos la cota “C o D” significa que para la posición más baja de la camilla hidráulica el valor de esa cota será de  $C = 250$  mm, y para el caso en el que la camilla hidráulica esté en la posición más alta el valor será de  $D = 600$  mm.

### Perfil I-I' o J-J'

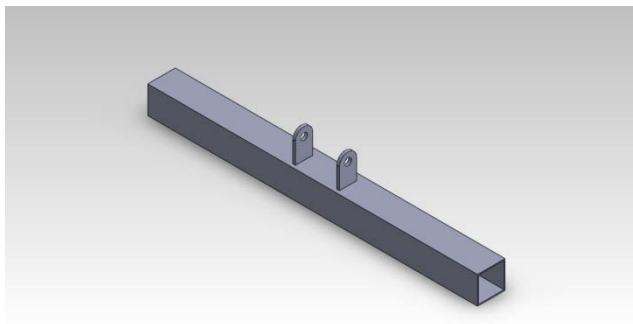


Imagen 9: Esquema de la barra del cilindro.

## 5.- Cálculos analíticos

En este apartado llevaremos a cabo los cálculos teóricos para el dimensionamiento de la máquina, aplicando la teoría de fallo de la Tensión de Cortante Máximo.

El material que vamos a utilizar para fabricar la camilla hidráulica es E-350 pero ciertas partes estarán sometidas a un desgaste mayor y usaremos otro acero que será el E-500. De aquí, la letra nos indica el tipo de acero que es, y las cifras posteriores indican el límite elástico del material expresado en megapascales (MPa).

Una vez que tenemos claro los materiales que van a formar parte en el elevador, debemos tener en cuenta el coeficiente de seguridad que en nuestro caso será siempre  $C_s = 2$ .

La metodología para llevar a cabo los cálculos teóricos consta de una serie de pasos que a continuación se detallan:

- Diagrama de sólido libre: es un croquis que muestra todas las acciones extremas (fuerzas y momentos) que actúan sobre él. El término libre implica que se han retirado todos los enlaces del cuerpo y que estos se han reemplazado por las reacciones, como pueden ser fuerzas o momentos, que éstos ejercen sobre el cuerpo. Para ello es importante tener claro las cargas que actúan y las restricciones que definen las reacciones que habrá en los apoyos.

- Plantear las ecuaciones de la estática: Consiste en incluir, en las ecuaciones de equilibrio, todas las fuerzas y pares aplicados sobre el sólido y representarlos en el diagrama de sólido libre. Se resuelve el sumatorio de fuerzas respecto a unos ejes cartesianos, de donde salen 2 ecuaciones si estamos en un diagrama de sólido libre de una dimensión. También se resuelve la ecuación de momentos flectores que es una ecuación de una dimensión.

- Resolver las ecuaciones de la estática: Las ecuaciones de la estática equivalen, en el caso más general, a seis ecuaciones escalares para cada sólido rígido en equilibrio y no permiten, por lo tanto, resolver más de seis incógnitas escalares. Si el número de incógnitas es igual al número de ecuaciones independientes el problema está resuelto, pero si es mayor no tiene solución por el método indicado y decimos que es un problema estáticamente indeterminado.

- Dimensionamiento: Una vez resueltas las ecuaciones de estática, mediante la Teoría de Cortante Máximo, con un  $C_s = 2$ , y con las hipótesis iniciales adoptadas se calculan las dimensiones de los perfiles estructurales, del cilindro...

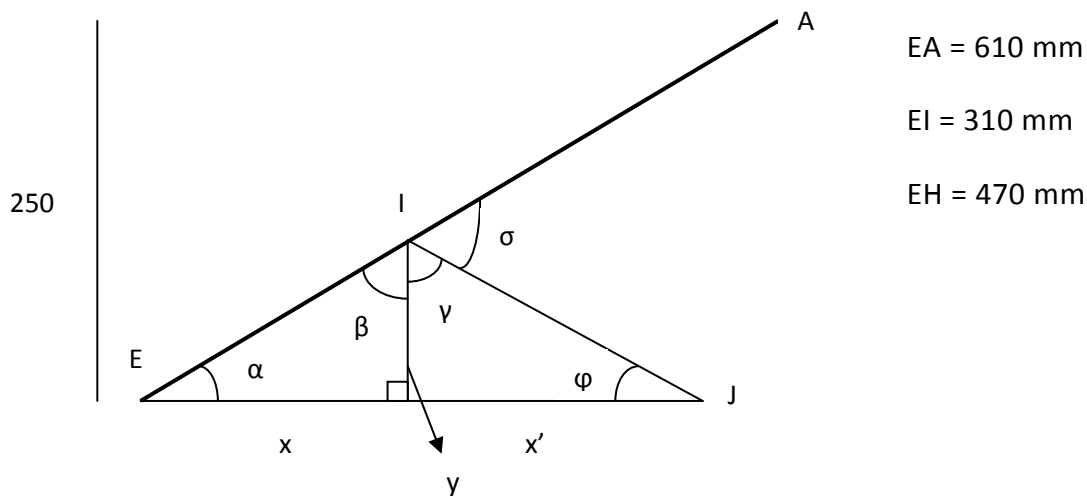
En cada uno de los siguientes apartados se ha llevado a cabo esta metodología.

### 5.1.- Cálculo de la carrera del cilindro hidráulico IJ.

Para calcular la carrera del cilindro hidráulico se tiene como dato las dimensiones de los travesaños así como las dimensiones del bastidor y de la plataforma, y además se sabe que para la altura más baja la distancia que hay entre el bastidor y la plataforma es de 250 mm y que para la altura más alta la distancia entre estos es de 600 mm.

#### Posición más baja de la camilla hidráulica

Primero se ha hallado la longitud mínima del cilindro, sabiendo que la camilla hidráulica está en la posición más baja. Para averiguar esta longitud, se ha estudiado gráficamente la posición más baja de la camilla hidráulica. Entonces:



Aclarar que la distancia EA es la correspondiente al travesaño que va del bastidor a la plataforma. Los puntos H e I son los puntos en los que va anclado el cilindro hidráulico y es la distancia que queremos hallar para así poder saber el valor en la posición más baja de la camilla hidráulica, que es, como se puede ver en el dibujo, de 250 mm entre la plataforma y el bastidor, es decir, entre los puntos E y A.

Una vez planteado el dibujo gráficamente procederemos a los cálculos:

$$\begin{aligned}\text{Sen } \alpha &= 250 / EA = 250 / 610 = 0.4098; & \rightarrow \alpha &= 24.19^\circ \\ 180 &= \alpha + \beta + 90; \quad \beta = 180 - 90 - \alpha; & \rightarrow \beta &= 65.81 \\ \text{Sen } \alpha &= y / 310; \quad y = \text{sen } \alpha * 310; & \rightarrow y &= 127.0267 \text{ mm} \\ \text{Cos } \alpha &= x / 310; \quad x = \text{cos } \alpha * 310; & \rightarrow x &= 282.7794 \text{ mm} \\ x' &= 470 - x = 470 - 282.7794; & \rightarrow x' &= 187.2206 \text{ mm} \\ \text{tg } \varphi &= y / x' = 127.0267 / 187.2206 = 0.6784; & \rightarrow \varphi &= 34.15^\circ \\ 180 &= 90 + \varphi + \gamma; \quad \gamma = 180 - 90 - \varphi; & \rightarrow \gamma &= 55.84^\circ \\ 180 &= \beta + \gamma + \sigma; \quad \sigma = 180 - \beta - \gamma; & \rightarrow \sigma &= 58.35^\circ\end{aligned}$$

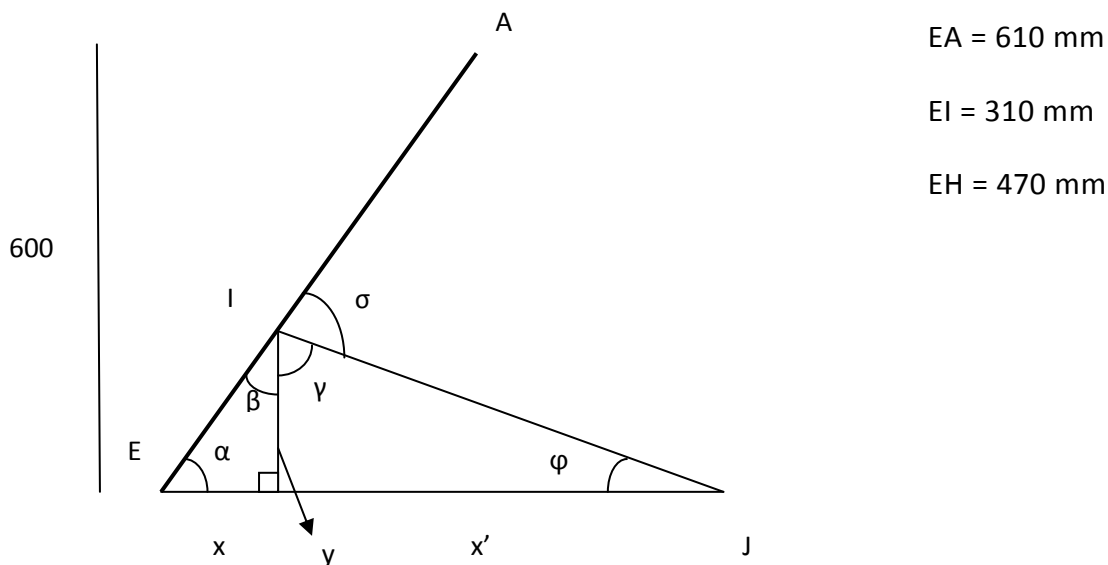
Después de haber hallado todos los términos procedemos a calcular la longitud HI que es la que nos va a interesar para posteriormente poder hallar la carrera del cilindro.

$$HI = \sqrt{x'^2 + y^2} = \sqrt{187.2206^2 + 127.0267^2} = 226.2461 \text{ mm}$$

Longitud mínima del cilindro hidráulico = 226 mm

### Posición más alta de la camilla hidráulica

Seguidamente de haber hallado la longitud mínima del cilindro hidráulico se va a hallar la longitud máxima de la misma forma, sabiendo que se da cuando la camilla hidráulica está en la posición más alta. Entonces:



A continuación procederemos a los cálculos una vez planteado el problema gráficamente:

$$\begin{aligned} \text{Sen } \alpha &= 600 / EA = 600 / 610 = 0.9836; & \rightarrow \alpha &= 79.61^\circ \\ 180 &= \alpha + \beta + 90; \quad \beta = 180 - 90 - \alpha; & \rightarrow \beta &= 10.39^\circ \\ \text{Sen } \alpha &= y / 310; \quad y = \text{sen } \alpha * 310; & \rightarrow y &= 304.9169 \text{ mm} \\ \text{Cos } \alpha &= x / 310; \quad x = \text{cos } \alpha * 310; & \rightarrow x &= 55.9077 \text{ mm} \\ x' &= 470 - x = 470 - 55.9077; & \rightarrow x' &= 414.0923 \text{ mm} \\ \text{tg } \varphi &= y / x' = 304.9169 / 414.0923 = 0.7363; & \rightarrow \varphi &= 36.36^\circ \\ 180 &= 90 + \varphi + \gamma; \quad \gamma = 180 - 90 - \varphi; & \rightarrow \gamma &= 53.64^\circ \\ 180 &= \beta + \gamma + \sigma; \quad \sigma = 180 - \beta - \gamma; & \rightarrow \sigma &= 115.97^\circ \end{aligned}$$



Después de haber hallado todos los términos procedemos a calcular la longitud HI que es la que nos va a interesar para posteriormente poder hallar la carrera del cilindro.

$$HI = \sqrt{x'^2 + y^2} = \sqrt{414.0923^2 + 304.9169^2} = 514.2438 \text{ mm}$$

Longitud máxima del cilindro hidráulico = 514 mm

Una vez obtenidas la longitud máxima y mínima del cilindro hidráulico se puede hallar la carrera de éste restando ambas longitudes.

Carrera = longitud máxima – longitud mínima;

$$\text{Carrera} = 514 - 226 = 288 \text{ mm}$$

**Así pues, tomaremos como carrera del cilindro hidráulico 300 mm.**

## 5.2.- Cálculo de la fuerza máxima necesaria en el cilindro hidráulico.

Este cálculo se ha simplificado suponiendo que la carga es distribuida en la plataforma, en una parte concreta, y despreciando la fuerza de inercia como se muestra a continuación.

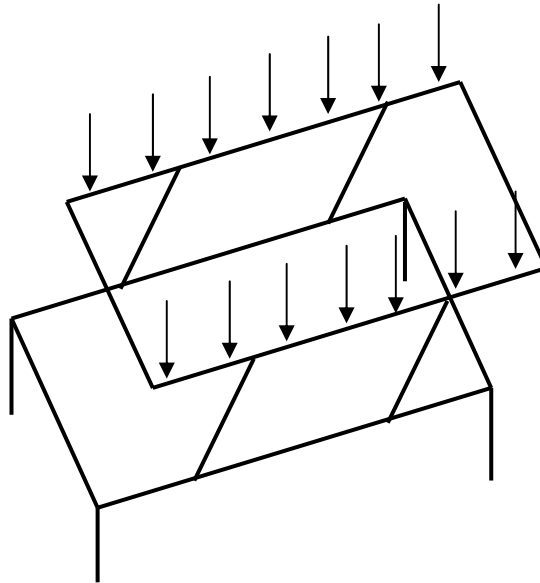


Imagen 10: Esquema 3D simplificado de la estructura.

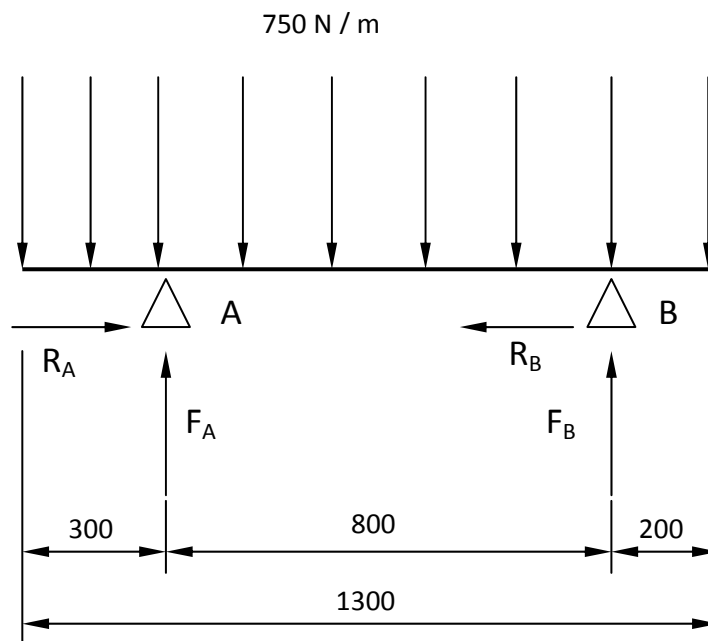
El cálculo se ha llevado a cabo mediante los diagramas de sólido libre de las diferentes partes de la camilla hidráulica y transmitiendo fuerzas y reacciones de unas partes a otras de ésta, por la ley de “acción - reacción”.

En principio no se sabe para qué altura de la camilla hidráulica se da la fuerza máxima necesaria del cilindro, así que, se han calculado varias alturas en las que se incluyen la altura máxima y mínima de la mesa, así como dos alturas intermedias con las que podremos observar cual será la fuerza mayor.

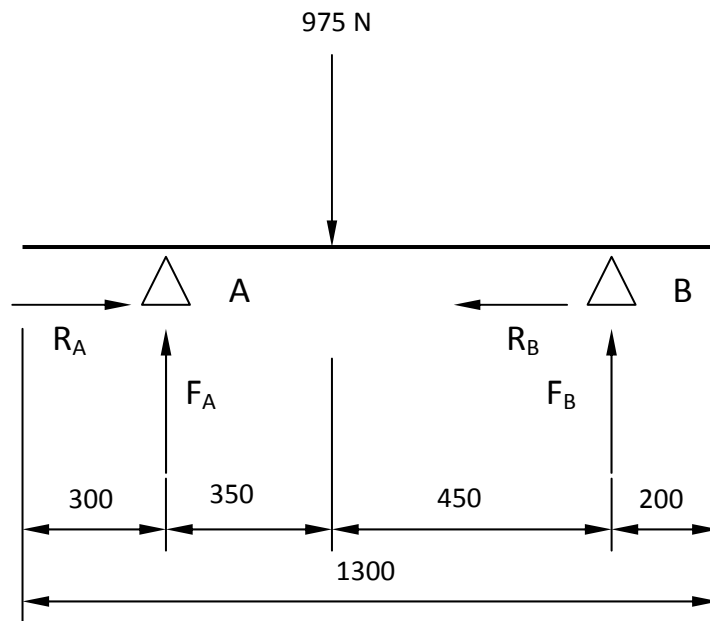
<u>Altura camilla (mm)</u>	<u><math>\alpha</math> (grados)</u>	<u>Fuerza del cilindro (N)</u>
250	24.19	4111.707
400	53.07	2026.1459
500	66.34	1348.5649
600	79.61	769.6722

Como se puede apreciar en la tabla anterior, la fuerza máxima del cilindro se da para la posición más baja de la camilla hidráulica. A continuación se reflejan, únicamente, los cálculos y diagramas de sólido libre de esta posición ya que, como se ha comprobado es la más desfavorable. Cabe destacar que, al ser la camilla hidráulica simétrica, solamente estudiaremos un lado de ésta para que el cálculo nos resulte más sencillo, así que, de ahora en adelante, para los cálculos que vengan a continuación solo nos referiremos a una parte de la camilla.

Se comienza por la parte superior de la camilla hidráulica, sabiendo que se ha tomado la carga distribuida en la plataforma y que tiene dos puntos de apoyo. En la figura se ve el diagrama de sólido libre, con la carga distribuida, situada a lo largo de toda la plataforma y de  $750 \text{ N / m}$ .



Ahora lo que haremos será simplificar el diagrama de manera que cambiaremos la carga distribuida por una carga puntual situada en el centro de la barra de esta manera.



A partir de este diagrama de sólido libre se establecen las ecuaciones de equilibrio mecánico: sumatorio de fuerzas igual a cero y sumatorio de momentos respecto al punto A que tiene que ser cero también.

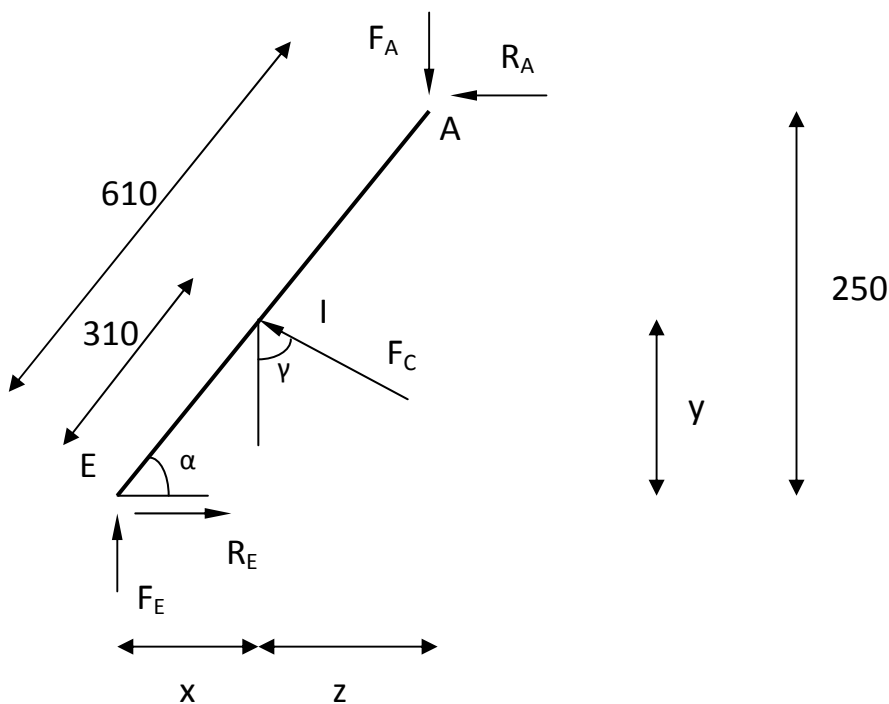
$$\begin{aligned} \Sigma F_H = 0; & \quad R_A = R_B; \\ \Sigma F_V = 0; & \quad F_A + F_B = 975; \\ \Sigma M_A = 0; & \quad -975 * 350 + 800 * F_B = 0; \end{aligned}$$

De aquí podemos obtener los valores de las reacciones verticales en los puntos A y B pero los valores de las reacciones horizontales no podemos hallarlos todavía, más adelante se verá como hallarlos.

$$F_A = 548.4375 \text{ N}; \quad F_B = 426.5625 \text{ N};$$

Una vez resuelto el diagrama de sólido libre anterior procedemos a resolver la siguiente parte, que son los travesaños que unen el bastidor con la plataforma en los cuales transmitiremos el valor de las fuerzas halladas o dejando indicado el valor de las fuerzas que no se han podido hallar.

En el travesaño de la izquierda, en el que nos aparece la fuerza del cilindro, sabemos que el ángulo que forma el travesaño con el bastidor será de  $\alpha = 24.19^\circ$  y que el ángulo que forma la fuerza del cilindro con la vertical será de  $\gamma = 55.84^\circ$



$$\cos \alpha = (x + z) / EA; \quad (x + z) = \cos 24.19^\circ * 610; \quad (x + z) = 556.4369 \text{ mm}$$

$$\text{Sen } \alpha = y / EI; \quad y = \text{sen } 24.19^\circ * 310; \quad y = 127.0267 \text{ mm}$$

$$\cos \alpha = x / EI; \quad x = \cos 24.19^\circ * 310; \quad x = 282.7794 \text{ mm}$$

$$x + z = 556.4369; \quad z = 556.4369 - 282.7794; \quad z = 273.6575 \text{ mm}$$

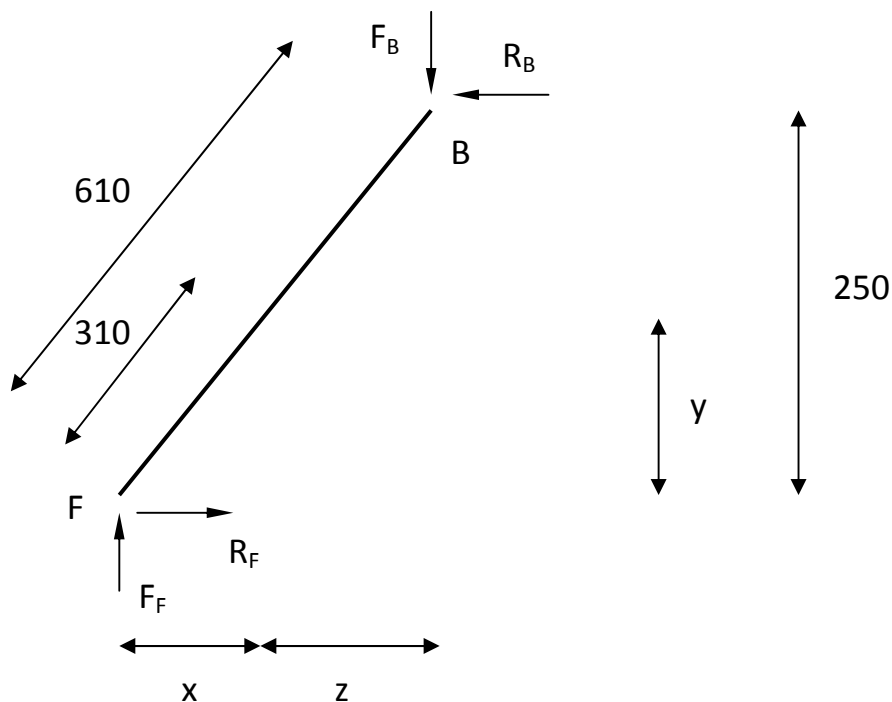
Recordamos que  $F_A = 548.4375 \text{ N}$  y procedemos a plantear las ecuaciones mecánicas correspondientes al diagrama de sólido libre anterior.

$$\Sigma F_H = 0; \quad R_A + F_C \cdot \sin \gamma = R_E;$$

$$\Sigma F_V = 0; \quad F_C \cdot \cos \gamma - F_E = F_A;$$

$$\Sigma M_E = 0; \quad F_C \cdot \sin \gamma \cdot y + F_C \cos \gamma \cdot x + R_A \cdot 250 = F_A \cdot (x + z);$$

Del sistema de ecuaciones anterior no se puede obtener ningún resultado así que procedemos a plantear el diagrama de sólido libre del otro travesaño, en este caso el derecho en el cual la principal diferencia es que no aparece la fuerza del cilindro.



Como podemos observar en el diagrama de sólido libre este travesaño es exactamente igual que el otro, por lo tanto las medidas van a ser las mismas, así que procedemos a plantear el sistema de ecuaciones correspondiente.

$$\Sigma F_H = 0; \quad R_F = R_B;$$

$$\Sigma F_V = 0; \quad F_F = F_B;$$

$$\Sigma M_F = 0; \quad - F_B * (x + z) - R_B * 250 = 0;$$

Recordando que ya teníamos el valor de  $F_B = 426.5625 \text{ N}$  y una vez obtenido el sistema de ecuaciones, procedemos a resolverlo y de aquí podemos sacar el valor tanto de  $F_F$  como de  $R_B$  y  $R_F$ .

$$R_F = R_B = - 949.4204 \text{ N};$$

$$F_F = F_B = 426.5625 \text{ N};$$

Con estos valores nos vamos a los dos sistemas de ecuaciones planteados anteriormente, uno el del primer travesaño, donde aparece la fuerza del cilindro, y otro el de la plataforma, ya que ahora sí que podremos resolverlos y hallar todas las fuerzas restantes.

Resolviendo ambos sistemas llegamos a los siguientes valores:

$$R_A = - 949.4204 \text{ N};$$

$$R_E = 750.7704 \text{ N};$$

$$F_E = 604.8963 \text{ N};$$

$$F_C = 2055.8535 \text{ N};$$

Bueno como podemos observar la fuerza del cilindro tiene un valor de  $F_C = 2055.8535 \text{ N}$ , pero verdaderamente esa no es la fuerza del cilindro ya que, como hemos dicho anteriormente, los cálculos se iban a basar solamente en la mitad de la estructura debido a su simetría, por lo tanto se repartía la mitad de la fuerza sobre cada parte de la estructura, así pues:

$$F_C = F_{\text{cilindro}} / 2;$$

$$F_{\text{cilindro}} = F_C * 2;$$

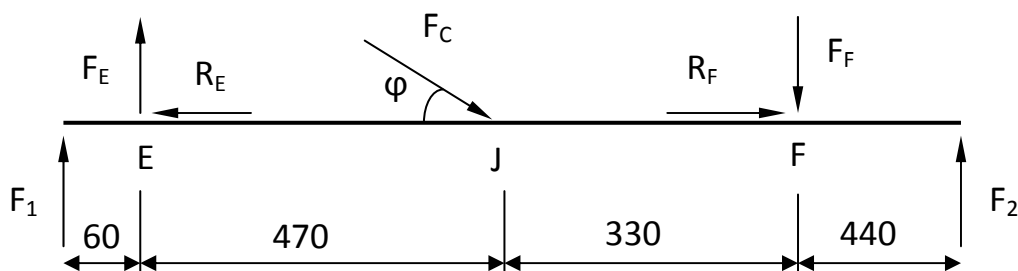
$$F_{\text{cilindro}} = 4111.707 \text{ N}$$

Por lo tanto, Fuerza máxima del cilindro hidráulico = 4111.707 N.

Aunque no sería necesario hallar las fuerzas del bastidor, plantearemos el diagrama de sólido libre de éste y hallaremos las fuerzas implicadas ya que posteriormente nos harán falta en alguna operación.

Como vemos nos aparecen dos fuerzas,  $F_1$  y  $F_2$  que son transmitidas desde las patas de la camilla, ya que serán la reacciones que haga la camilla sobre el suelo.

$$\varphi = 34.15^\circ$$



Después de haber planteado el diagrama de sólido libre procedemos a plantear el sistema de ecuaciones correspondiente sabiendo los valores de todas las reacciones menos de  $F_1$  y  $F_2$  que son nuestro objetivo en este sistema.

$$\sum F_H = 0; \quad R_E = F_C \cdot \cos \varphi + R_F;$$

$$\sum F_V = 0; \quad F_F + F_C \cdot \sin \varphi = F_1 + F_2 + F_E;$$

$$\sum M_E = 0; \quad -F_1 \cdot 60 - F_C \cdot \sin \varphi \cdot 470 - F_F \cdot 800 + F_2 \cdot 1240 = 0;$$

Resolviendo el sistema, sabiendo ya todos los valores, menos  $F_1$  y  $F_2$  como hemos dicho anteriormente, se nos queda un sistema de 2 ecuaciones y dos incógnitas tal que nos queda la siguiente solución:

$$F_1 = 250.9654 \text{ N};$$

$$F_2 = 724.7775 \text{ N};$$



Como resumen vamos a hacer una tabla con las distintas fuerzas que aparecen en la estructura y que luego usaremos para la simulación en el programa SolidWorks.

<b>F (N)</b>	<b>F<sub>eje x</sub> (N)</b>	<b>F<sub>eje y</sub> (N)</b>	<b>F<sub>resultante</sub> (N)</b>
<b>Punto A</b>	-949.4204	548.4375	1096.441
<b>Punto B</b>	949.4204	426.5625	1040.8432
<b>Punto E</b>	750.7704	-604.8963	964.1347
<b>Punto F</b>	-949.4204	-426.5625	1040.8432
<b>Punto I</b>	-1701.3642	1154.0768	2055.8535
<b>Punto J</b>	1701.3642	-1154.0768	2055.8535
<b>Punto 1</b>	0	250.9654	250.9654
<b>Punto 2</b>	0	724.7775	724.7775

Los puntos I y J, son los puntos en los que va anclado el cilindro y por lo tanto serán iguales, así que como ya habíamos dicho anteriormente.

**La fuerza máxima del cilindro hidráulico será = 4111.707 N.**

### 5.3.- Selección del diámetro normalizado del cilindro hidráulico.

Para hallar el diámetro del pistón del cilindro hay que utilizar la siguiente expresión,

$$F = \frac{P}{A},$$

empleando las unidades adecuadas. Fuerza en Newton (N), Presión en Mpa (N / mm<sup>2</sup>), Área (mm<sup>2</sup>).

$$P = 40 \text{ bar} = 40 * 10^5 \frac{N}{m^2} * \frac{1m^2}{10^6 mm^2} = 4 \text{ Mpa} = 4 \frac{N}{mm^2}$$

$$P = \frac{F}{A}; \quad A = \frac{F}{P} = \frac{4111.707}{4} = 1027.9267 \text{ mm}^2$$

Hemos calculado el área del pistón correspondiente a la fuerza correspondiente y ahora procedemos a calcular, a partir del dato obtenido, el diámetro del pistón de la siguiente forma,

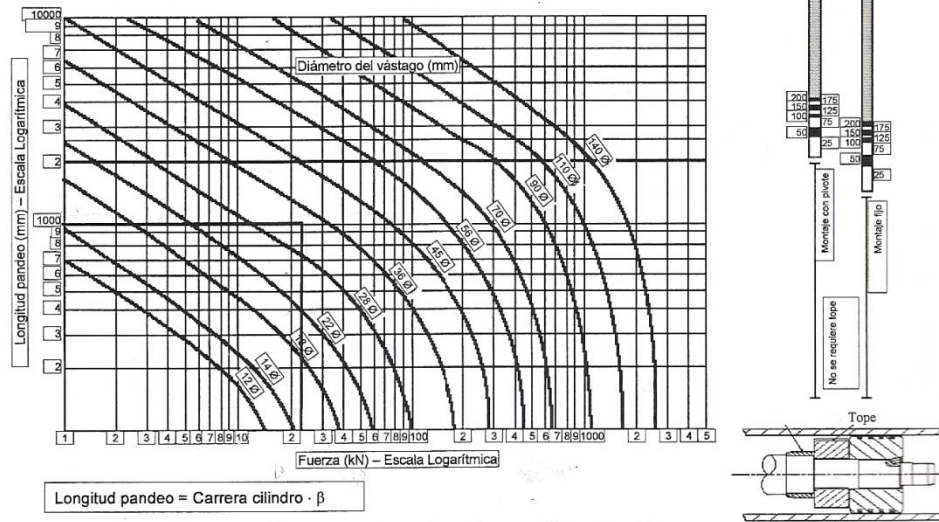
$$A = \frac{\pi * D^2}{4}; \quad D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 1027.9267}{\pi}} = 36.17 \text{ mm}$$

El diámetro del pistón debe tener un valor mínimo de 36.17 mm, por lo que hay que seleccionar el inmediato superior de los diámetros normalizados que será de 40 mm.

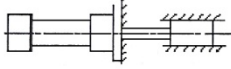
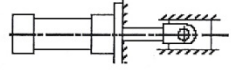
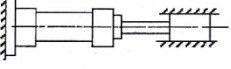
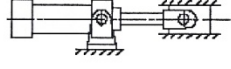
**Diámetro del pistón normalizado = 40 mm.**

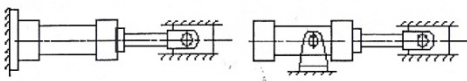
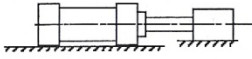
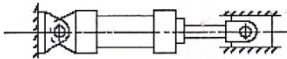
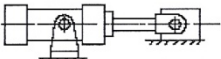
### 5.4.- Cálculo a pandeo del diámetro normalizado del vástago.

Cilindros hidráulicos y neumáticos.



La tabla anterior nos sirve para encontrar el diámetro del vástago que necesitaremos para nuestro caso. Con la fuerza máxima del pistón,  $F = 4111.707 \text{ N}$ , y la longitud equivalente,  $L_e$ , que a continuación explicaremos como se obtiene, entraremos en la tabla y elegiremos el diámetro correspondiente.

Tipo de fijación cilindro	Esquema de montaje	Factor de pandeo ( $\beta$ )
Fija y rígidamente guiada		0.5
Articulado y rígidamente guiado		0.7
Fija y rígidamente guiada		1.0
Articulado y rígidamente guiado		1.0

Tipo de fijación cilindro	Esquema de montaje	Factor de pandeo ( $\beta$ )
Articulado y rígidamente guiado		1.5
Apoyado, pero no rígidamente guiado		2.0
Articulado y rígidamente guiado		2.0
Articulado y apoyado, pero no rígidamente guiado		3.0

La longitud equivalente,  $L_e$ , se calcula de la forma  $L_e = \beta * L$ , siendo  $\beta$  el coeficiente a pandeo que depende del agarre en los extremos del cilindro y según vemos en las dos tablas anteriores le corresponde el valor de  $\beta = 2$  ya que es articulado y rígidamente guiado y siendo  $L$  la carrera del cilindro, entonces:

$$L_e = \beta * L = 2 * 300 = 600$$

Entrando con estos dos valores a la tabla, vemos que el valor del diámetro del vástago queda entre 14 y 18 mm, así que, con estos datos seleccionaremos el vástago de mayor diámetro que será el de 18 mm.

**Diámetro del vástago = 18 mm.**

### 5.5.- Cálculo del diámetro de los pasadores J e I, punto inferior y superior del cilindro hidráulico.

Para hallar el diámetro de los pasadores hay que calcularlos en la situación más desfavorable. Ésta se da cuando la fuerza del cilindro es máxima, en este caso, en la posición más baja de la camilla hidráulica.

Anteriormente, en el apartado 5.2, calculamos las reacciones en todos los pasadores y ahora con esos datos procederemos a calcular el diámetro de éstos. Así pues, vamos a explicar cómo hallar el diámetro de los pasadores y seguidamente procederemos a ello.

Con la reacción que tiene lugar en los pasadores, y con la tensión, se halla el área de la que sacaremos el diámetro del pasador.  $\tau = \frac{F}{A}$ .

$$\tau_F = 0.5 * \sigma_F$$

$$\tau_{\max,adm} = \frac{\tau_F}{C_S}$$

A continuación hallaremos el área,

$$A = \frac{F}{\tau_{\max,adm}}$$

y una vez hallada el área pasaremos a calcular el diámetro del pasador,

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

Una vez obtenido el dato correspondiente elegiremos un diámetro normalizado.

Así pues, primero cogemos el valor de las reacciones en el pasador H o I, que será la fuerza del cilindro,

$$F_{\text{cilindro}} = 4111.707 \text{ N};$$

$$\tau_F = 0.5 * \sigma_F = 0.5 * 350 = 175 \text{ N} / \text{mm}^2;$$

$$\tau_{\text{max,adm}} = \frac{\tau_F}{C_S} = \frac{175}{2} = 87.5 \text{ N} / \text{mm}^2;$$

Debido a que las orejetas están sometidas a doble cortadura, la siguiente fórmula,  $\tau = \frac{F}{A}$ , pasa a quedar así,  $\tau = \frac{F/2}{A}$ , por lo tanto:

$$A = \frac{F/2}{\tau_{\text{max,adm}}} = \frac{4111.707/2}{87.5} = 23.49 \text{ mm};$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 23.4954}{\pi}} = 5.46 \text{ mm};$$

Finalmente, los pasadores H e I como mínimo tendrán que tener un diámetro de 5.46 mm y en nuestro caso elegiremos un pasador con un diámetro de 10mm.

**Diámetro de los pasadores J e I = 10 mm.**

### 5.6.- Cálculo de los diámetros de los pasadores A, B, E, F, a simple cortadura y suponiendo que deben tener el mismo diámetro.

Para resolver esta parte procederemos de la misma manera que para calcular los pasadores del apartado anterior. Así pues, procedemos a calcular dichos pasadores de la siguiente manera.

Primero elegiremos el pasador que tenga el valor de las reacciones más alto, que será con el que haremos los cálculos, para posteriormente poder elegir un diámetro válido para los pasadores.

Así pues, buscando el valor más alto en las reacciones, halladas y resumidas en la tabla del punto 5.2, elegiremos el valor de las reacciones en el punto A, siendo su valor de:

Reacciones en el pasador A:

$$R_A = 949.4204 \text{ N} \quad \text{y} \quad F_A = 548.4375 \text{ N}$$

$$F_R = \sqrt{R_A^2 + F_A^2} = \sqrt{949.4204^2 + 548.4375^2} = 1096.44 \text{ N.}$$

Por lo tanto, procederemos a hacer los cálculos correspondientes.

$$\tau_F = 0.5 * \sigma_F = 0.5 * 350 = 175 \text{ N / mm}^2;$$

$$\tau_{\text{max,adm}} = \frac{\tau_F}{C_S} = \frac{175}{2} = 87.5 \text{ N / mm}^2;$$

$$A = \frac{F}{\tau_{\max, adm}} = \frac{1096.44}{87.5} = 12.52 \text{ mm};$$

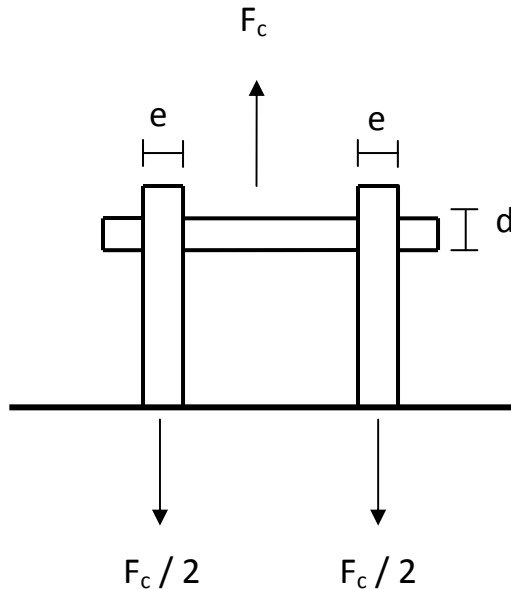
$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 12.5207}{\pi}} = 4 \text{ mm};$$

Así pues, los pasadores A, B, E y F tendrán que tener como mínimo un diámetro de 4 mm y nosotros elegiremos un diámetro de 10 mm, igual que en el caso de los pasadores H e I.

**Diámetro de los pasadores A, B, E y F = 10 mm.**



### 5.7.- Cálculo de la anchura “b” y el espesor “e” de las orejetas del amarre del cilindro hidráulico.



En la figura anterior podemos ver un dibujo en el que se representa la forma de las orejetas del cilindro en el cual irá amarrado éste. Para calcular las dimensiones de las orejetas tenemos que partir del caso más desfavorable, que será cuando la fuerza del cilindro sea máxima,  $F_{\text{cilindro}} = 4111.707 \text{ N}$ , es decir, en la posición más baja de la camilla hidráulica. También conocemos la tensión de fluencia del material,  $\sigma_F = 350 \text{ N/mm}^2$ , y el coeficiente de seguridad,  $C_s = 2$ , por lo que, la tensión máxima admisible será:

$$\sigma_{\text{max,adm}} = \frac{\sigma_F}{C_s} = \frac{350}{2} = 175 \text{ N/mm}^2.$$

Primero analizaremos el cálculo por aplastamiento de las orejetas con el pasador, sabiendo su valor hallado en el apartado anterior. Apuntar que usaremos el diámetro calculado ya que es más restrictivo que el normalizado.

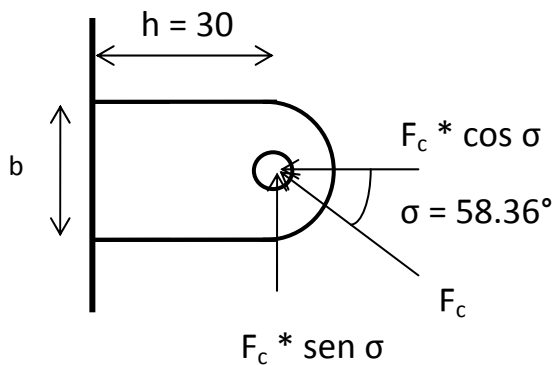
$$\sigma = \frac{F/2}{A}; \quad A = \frac{F/2}{\sigma} = \frac{4111.707/2}{175} = 11.74 \text{ mm}$$

A continuación, tomaremos como área la sección transversal del pasador, que es este caso es de  $A = e * d$ .

$$e = A / d = 11.7477 / 5.46 = 2.15 \text{ mm}$$

Por lo tanto, con este dato, elegiremos un espesor de 4 mm.

### Orejeta superior del cilindro hidráulico



Para calcular la anchura de la orejeta hay que utilizar la fuerza máxima del cilindro, teniendo en cuenta que la fuerza estará dividida por dos ya que actúa sobre una sola orejeta. Entonces:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{W_z}; \quad \sigma_{\max, adm} = \frac{\sigma_F}{C_S} = \frac{350}{2} = 175 \text{ N/mm}^2$$

Y con los datos siguientes,

$$N = F_{\text{cilindro}} / 2 * \cos 58.36^\circ = 4111.707 / 2 * \cos 58.36 = 1078.4604 \text{ N};$$

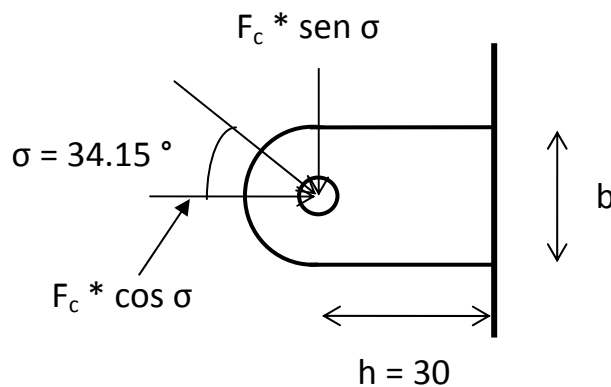
$$A = b * e = 4 * b;$$

$$M_z = h * F_{\text{cilindro}} / 2 * \sin 58.36^\circ = 30 * 4111.707 / 2 * \sin 58.36 = 52508.19 \text{ N};$$

$$W_z = 1 / 6 * e * b = 1 / 6 * 4 * b^2 = 0.6666 * b^2;$$

Procedemos a resolver la ecuación anterior planteada de la que obtenemos una anchura de orejeta  $b = 22.01 \text{ mm}$ .

#### Orejeta inferior del cilindro hidráulico



Para calcular la anchura de la orejeta procederemos igual que para la orejeta de arriba, por lo tanto, volveremos a plantear la misma ecuación con los datos ahora correspondientes y despejaremos el valor “b” de la anchura de la orejeta. Así pues:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{W_z};$$

$$\sigma_{\text{max,adm}} = \frac{\sigma_F}{C_s} = \frac{350}{2} = 175 \text{ N/mm}^2$$

$$N = F_{\text{cilindro}} / 2 * \cos 34.15^\circ = 4111.707 / 2 * \cos 34.15^\circ = 1701.3642 \text{ N};$$

$$A = b * e = 4 * b;$$

$$M_z = h * F_{\text{cilindro}}/2 * \sen 34.15^\circ = 30 * 4111.707/2 * \sen 34.15^\circ = 34622.303 \text{ N};$$

$$W_z = 1 / 6 * e * b = 1 / 6 * 4 * b^2 = 0.6666 * b^2;$$

Después de haber resuelto la ecuación obtenemos un valor de anchura de orejeta  $b = 18.48 \text{ mm}$ .

Una vez obtenido todos los datos procedemos a escoger las medidas definitivas que serán para el caso del espesor de la orejeta  $e = 4 \text{ mm}$  y la anchura de las orejetas de  $25 \text{ mm}$ .

**Espesor  $e = 4 \text{ mm}$  y Anchura  $b = 25 \text{ mm}$ .**

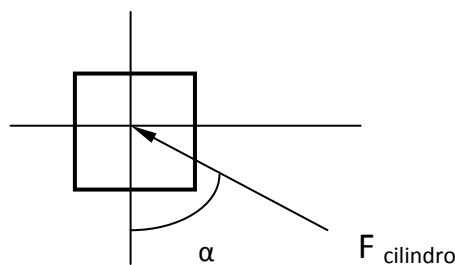
## 5.8.- Cálculo del perfil cuadrado para todas las barras de la estructura.

Para resolver este apartado vamos a proceder de la siguiente manera. Primeramente veremos que fuerzas interactúan en cada barra que vayamos a estudiar para poder hacer los diagramas de esfuerzos correspondientes, y a continuación, obtendremos el módulo resistente  $W_z$  de la siguiente ecuación,

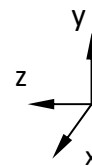
$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{W_z} = \frac{\sigma_F}{C_s},$$

para posteriormente ir a la tabla del anexo 1 y poder elegir un perfil acorde a nuestras necesidades.

### 5.8.1.- Barra I - I'



*Perfil de la barra I - I'.*

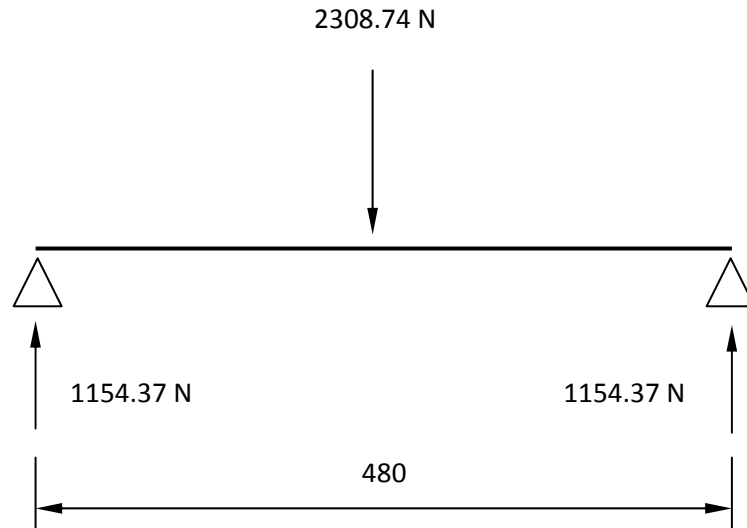


*Ejes de referencia.*

En la figura anterior se muestra un esquema de cómo incide la fuerza máxima del cilindro en el perfil, amarre superior del cilindro hidráulico. En realidad la fuerza del cilindro estaría elevada por encima del perfil, a la altura por donde pasa el pasador de las orejetas, y eso provocaría que también hubiese un esfuerzo de torsión, pero para simplificar los cálculos trasladamos la fuerza del cilindro al centro del perfil, entonces, la fuerza del cilindro nos va a provocar momento en la dirección del eje "y" y del eje "z".

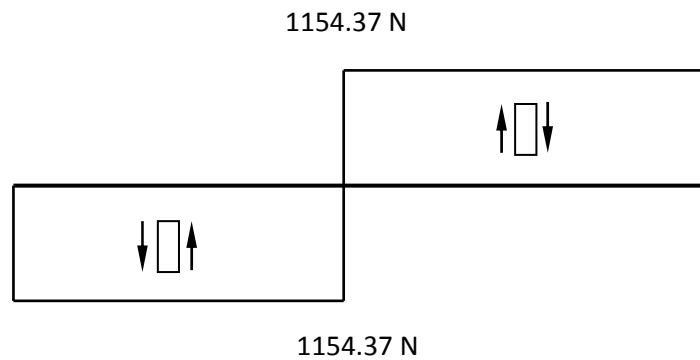
Entonces la barra queda de la siguiente manera:

Eje y

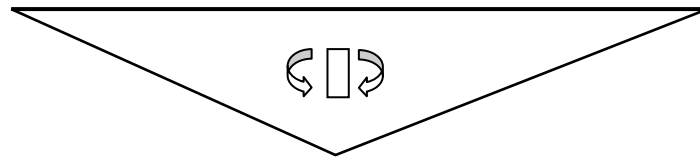


Así pues los diagramas de esfuerzos quedan de la siguiente manera.

Esfuerzo cortante:

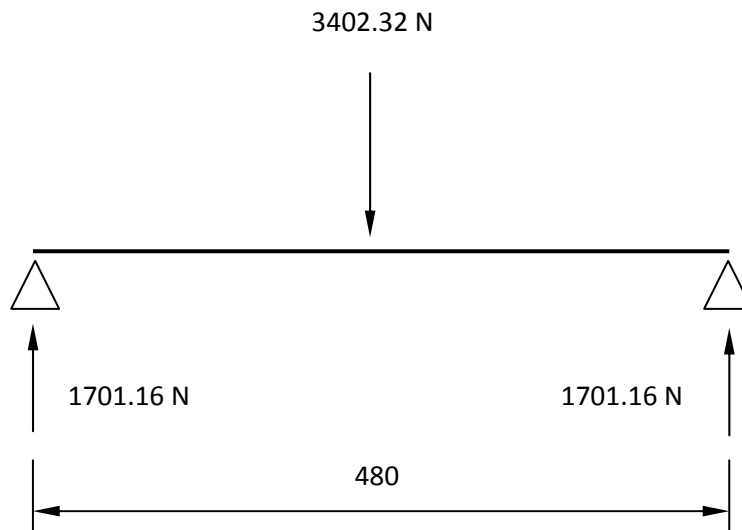


Momento flector:



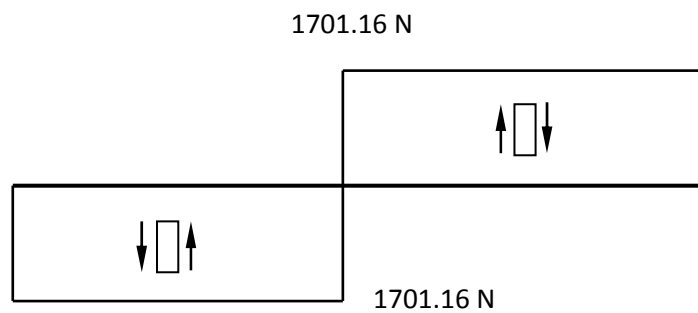
277048.8 N.mm

Eje z

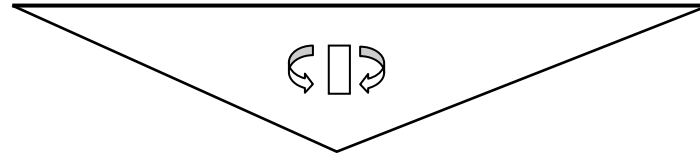


Así pues los diagramas de esfuerzos quedan de la siguiente manera.

Esfuerzo cortante:



Momento flector:



408278.4 N.mm

Ahora pasamos a hallar el módulo resistente,

$$\sigma_x = \frac{M_z}{W_z} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{\sigma_F}{C_S}$$

al ser perfil cuadrado  $W = W_z = W_y$ , entonces:

$$\sigma_x = \frac{M_z + M_y}{W} = \frac{\sigma_F}{C_S}$$

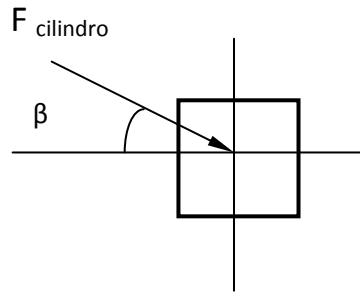
$$\frac{\sigma_F}{C_S} = \frac{350}{2} = 175 \text{ N/mm}^2$$

$$175 = \frac{277048.8 + 408278.4}{W};$$

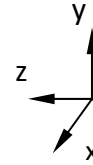
$$\underline{W = 3916.15 \text{ mm}^3 = 3.916 \text{ cm}^3}$$



### 5.8.2.- Barra J - J'



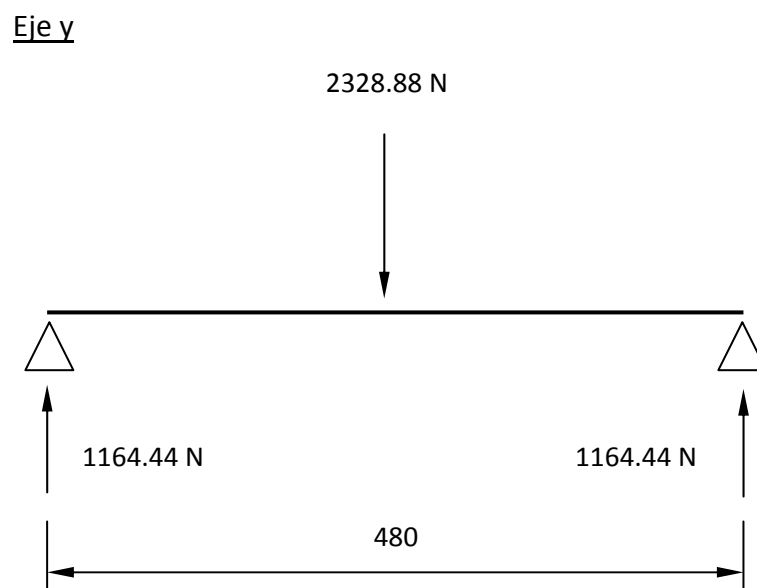
Perfil de la barra J - J'.



Ejes de referencia.

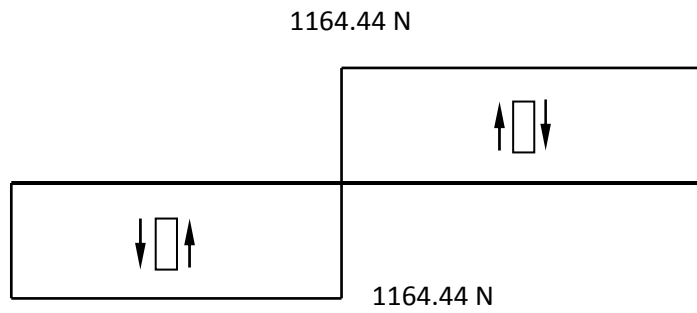
En la figura anterior, se muestra un esquema de cómo incide la fuerza máxima del cilindro en el perfil, amarre inferior del cilindro hidráulico. Similar al apartado anterior, la fuerza del cilindro estaría elevada por encima del perfil, a la altura por donde pasa el pasador de las orejetas, y eso provocaría que también hubiese un esfuerzo de torsión, pero para simplificar los cálculos trasladamos la fuerza del cilindro al centro del perfil, entonces, la fuerza del cilindro nos va a provocar momento en la dirección del eje “y” y del eje “z”.

Entonces la barra queda de la siguiente manera:

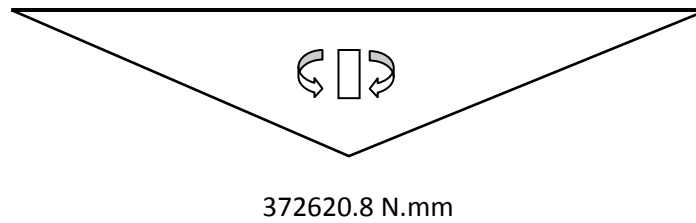


Así pues los diagramas de esfuerzos quedan de la siguiente manera.

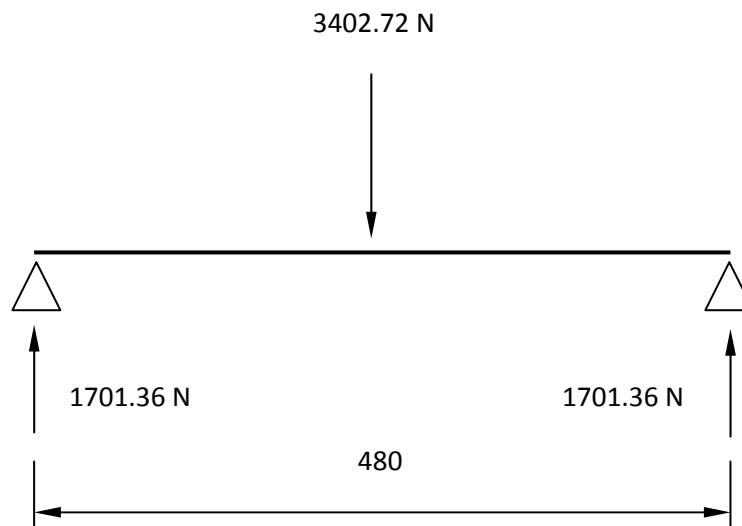
Esfuerzo cortante:



Momento flector:

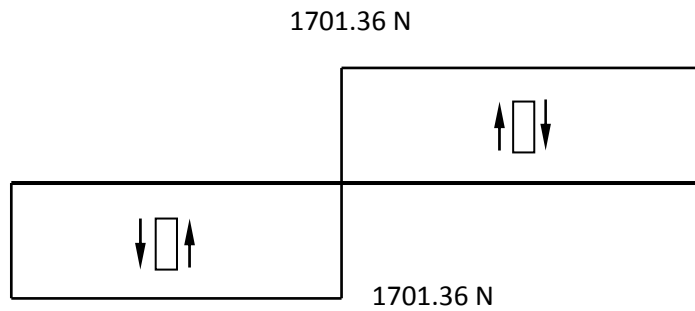


Eje z

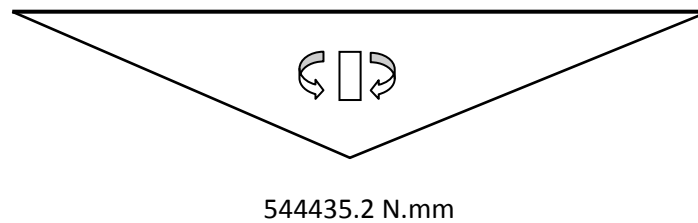


Así pues los diagramas de esfuerzos quedan de la siguiente manera.

Esfuerzo cortante:



Momento flector:



Ahora pasamos a hallar el módulo resistente,

$$\sigma_x = \frac{M_z}{W_z} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{\sigma_F}{C_S}$$

al ser perfil cuadrado  $W = W_z = W_y$ , entonces:

$$\sigma_x = \frac{M_z + M_y}{W} = \frac{\sigma_F}{C_S}$$

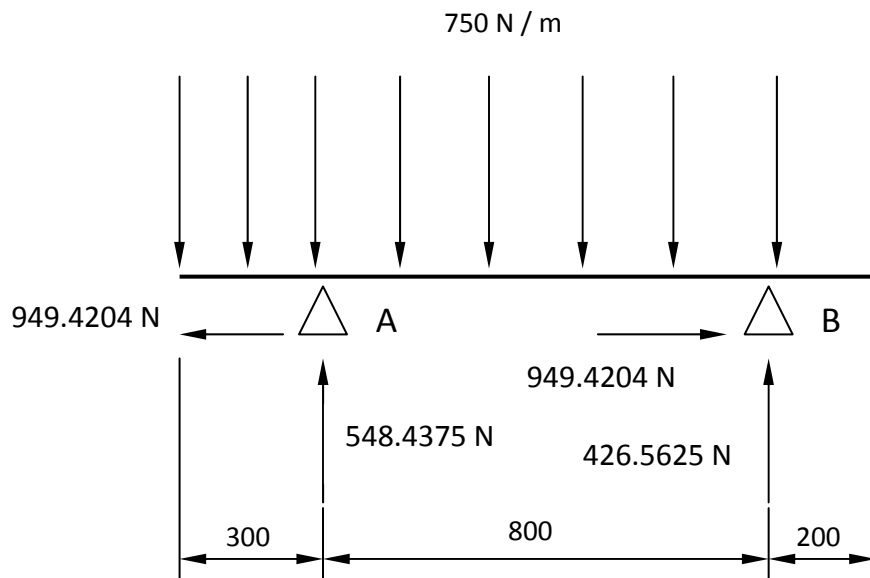
$$\frac{\sigma_F}{C_S} = \frac{350}{2} = 175 \text{ N/mm}^2$$

$$175 = \frac{372620.8 + 544435.2}{W};$$

$$\underline{W = 5240.32 \text{ mm}^3 = 5.24 \text{ cm}^3}$$

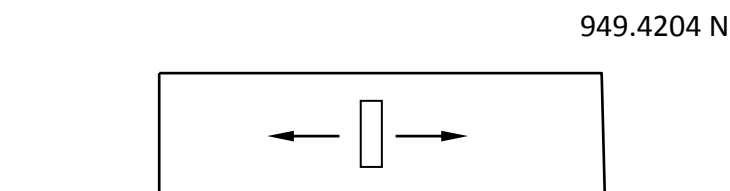
### 5.8.3.- Barra AB (plataforma)

En la barra AB actúa la fuerza ejercida por el peso máximo que tendrá que soportar la camilla hidráulica, que será una fuerza de 750 N distribuidos a lo largo de toda la barra, que en el siguiente esquema ya planteamos como tres fuerzas equivalentes en sus respectivas posiciones. Además, aparecen las reacciones en los puntos A y B calculadas anteriormente.

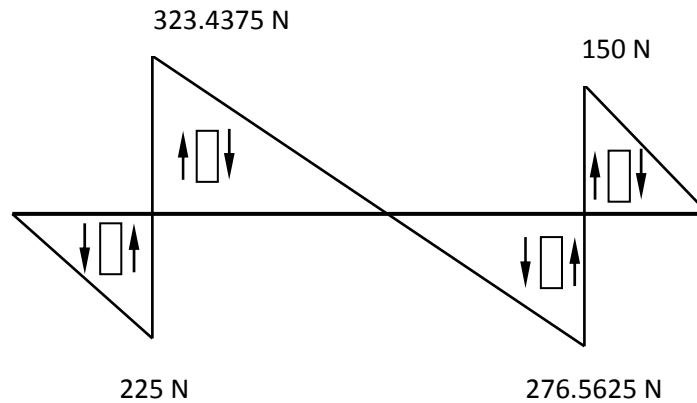


Así pues, los diagramas de esfuerzos de la barra quedan de la siguiente manera.

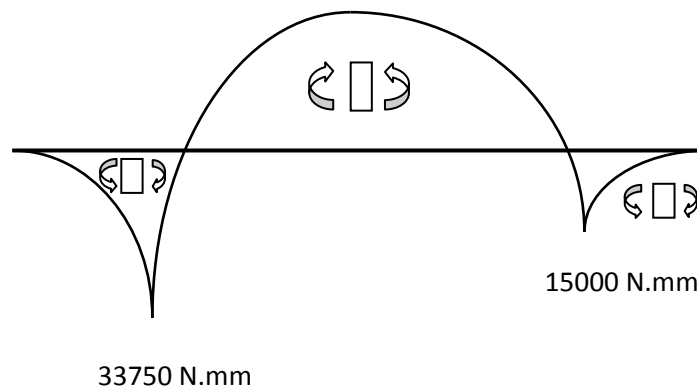
Esfuerzo axil:



Esfuerzo cortante:



Momento flector:



Una vez hallados los diagramas de esfuerzos vemos que la sección más desfavorable está en el punto A, ya que a la hora de dimensionar, el momento flector y el esfuerzo axial, son los esfuerzos que más importancia tienen. Por lo tanto esta sección será la que estudiemos para el dimensionamiento de la barra.

Sección más desfavorable, punto A:

$$N = 942.4204 \text{ N}$$

$$M_z = 33750 \text{ N.mm}$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_F}{C_S} = \frac{350}{2} = 175 \text{ MPa}$$

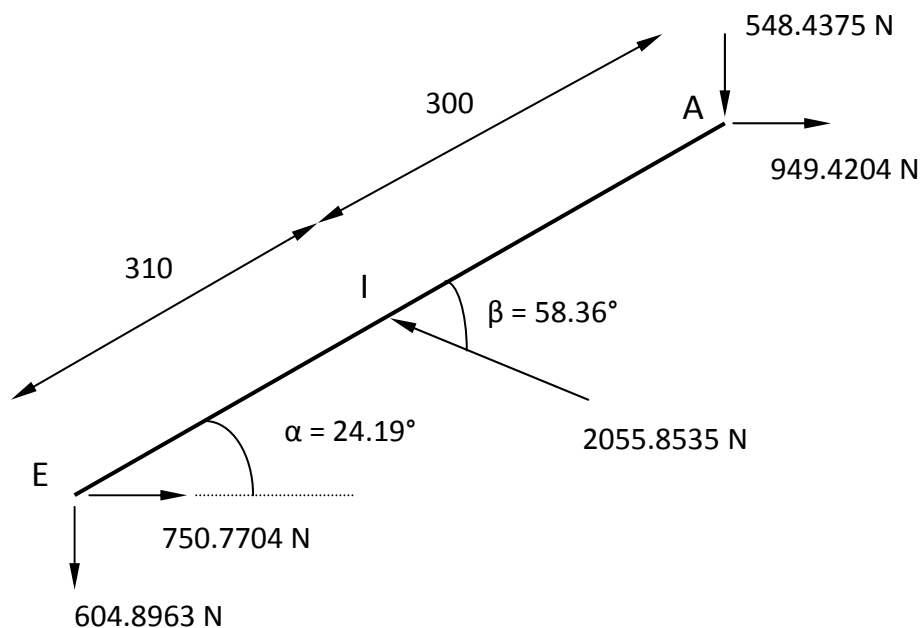
$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{W_z} = \frac{942.4204}{A} + \frac{33750}{W_z} = 175;$$

Como todavía no tenemos un perfil elegido, no podemos saber el área de dicho perfil, por lo tanto obviaremos el primer término de la ecuación y procederemos a hallar el módulo resistente para posteriormente ir a la tabla del anexo 1 y elegir el perfil requerido.

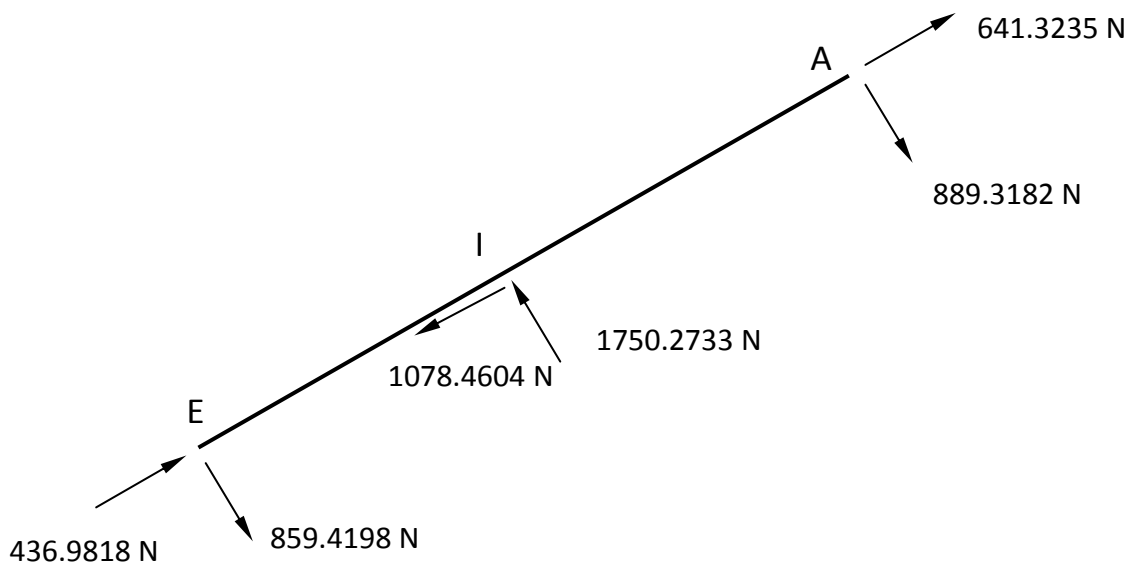
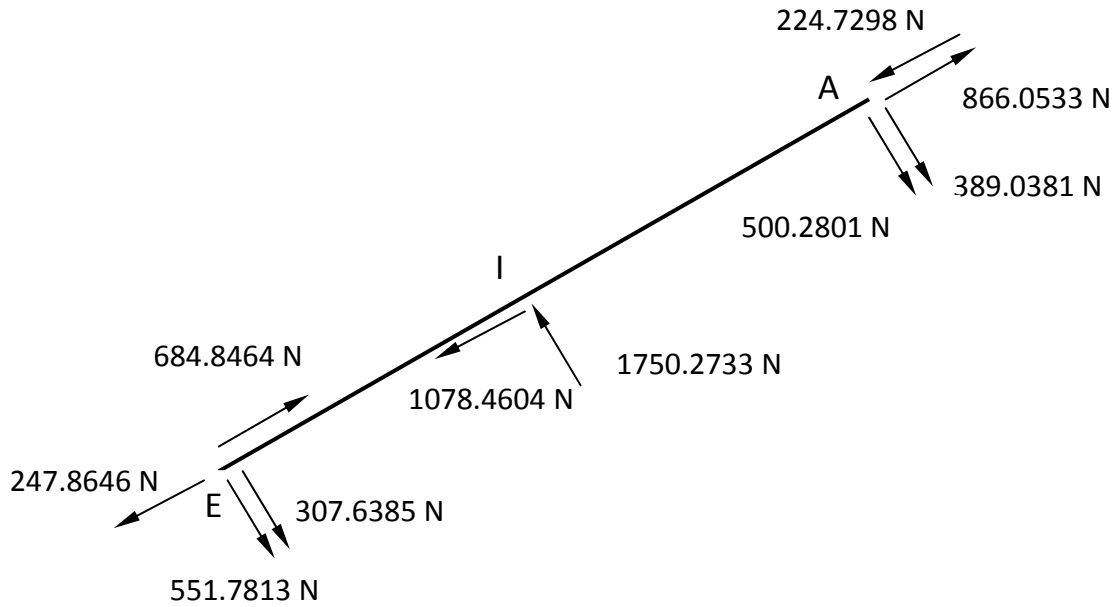
$$\sigma_x = \frac{33750}{W_z} = 175; \quad \underline{W_z = 192.8571 \text{ mm}^3 = 0.192 \text{ cm}^3}$$

#### 5.8.4.- Barra AIE (travesaño)

En la barra AIE actúa la fuerza del cilindro hidráulico y las reacciones en los puntos A y E, calculadas anteriormente y de las que tenemos los valores.



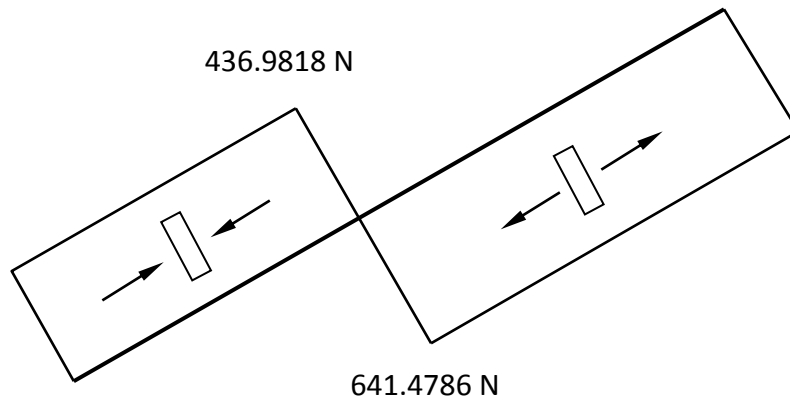
A continuación descompondremos las fuerzas en dos ejes, uno perpendicular a la barra, y otro en la dirección de la barra, para posteriormente agruparlas y poder pasar a dibujar los diagramas de esfuerzos correspondientes.



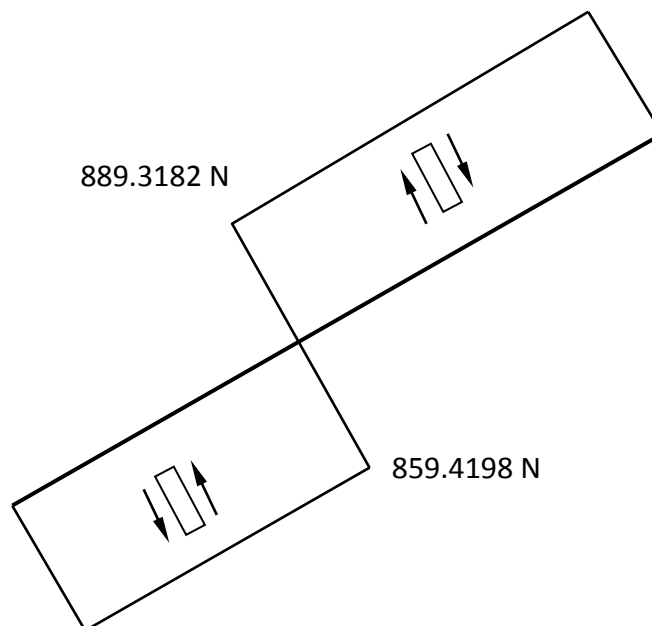


Ahora representamos los diagramas de esfuerzos.

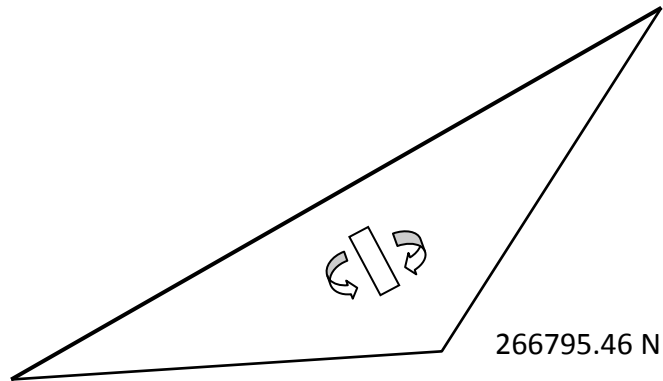
Esfuerzo axil:



Esfuerzo cortante:



Momento flector:



Una vez hallados los diagramas de esfuerzos vemos que la sección más desfavorable está en el punto I, punto de amarre del cilindro hidráulico, por lo tanto ésta sección será la que estudiemos para el dimensionamiento de la barra.

Sección más desfavorable, punto I:

$$N = 641.4786 \text{ N}$$

$$M_z = 266795.46 \text{ N.mm}$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_F}{C_S} = \frac{350}{2} = 175 \text{ MPa}$$

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{W_z} = \frac{641.4786}{A} + \frac{266795.46}{W_z} = 175;$$

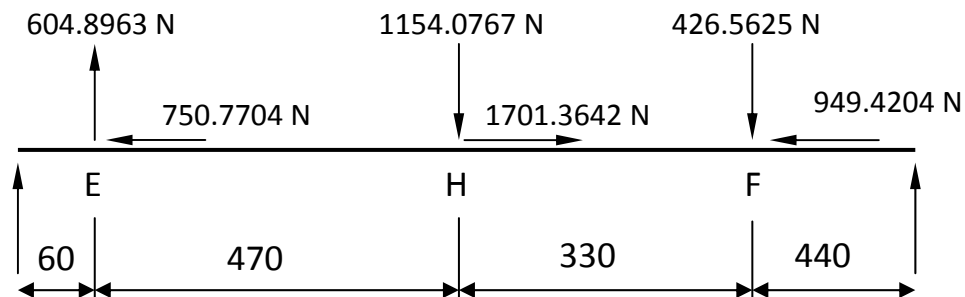
Como todavía no tenemos un perfil elegido, no podemos saber el área de dicho perfil, por lo tanto obviaremos el primer término de la ecuación y procederemos a hallar el módulo resistente para posteriormente ir a la tabla del anexo 1 y elegir el perfil requerido.

$$\sigma_x = \frac{266795 \cdot 46}{W_z} = 175;$$

$$W_z = 1524.5454 \text{ mm}^3 = 1.524 \text{ cm}^3$$

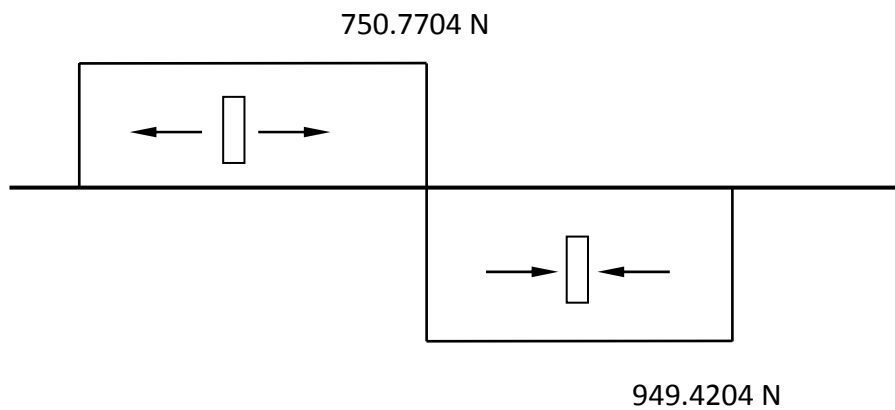
### 5.8.5.- Barra EHF (bastidor o chasis)

La barra EHF es la parte más baja de la camilla hidráulica y es la parte que más esfuerzos tendrá que aguantar, ya que es donde aparecen casi todas las fuerzas que hay en el conjunto.

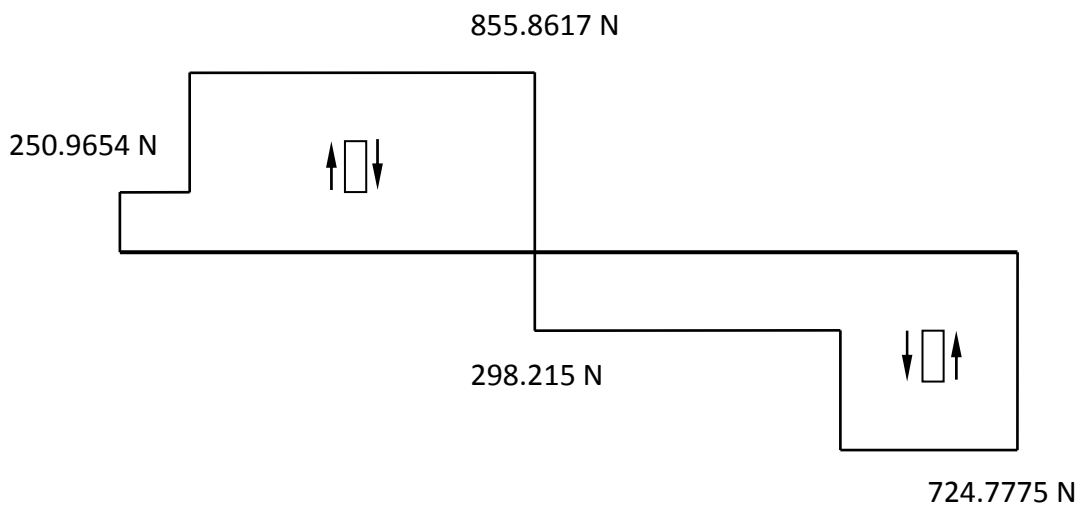


Así pues, los diagramas de esfuerzos de la barra quedan de la siguiente manera.

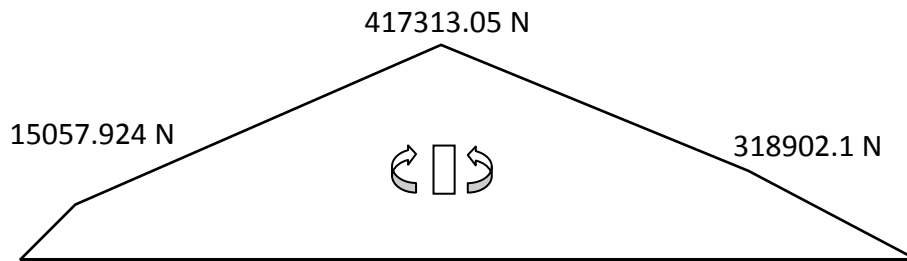
Esfuerzo axial:



Esfuerzo cortante:



Momento flector:



Una vez hallados los diagramas de esfuerzos vemos que la sección más desfavorable está en el punto H, punto de amarre del cilindro hidráulico, por lo tanto ésta sección será la que estudiemos para el dimensionamiento de la barra.

Sección más desfavorable, punto H:

$$N = 750.7704 \text{ N}$$

$$M_z = 417313.05 \text{ N.mm}$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_F}{C_s} = \frac{350}{2} = 175 \text{ MPa}$$

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{W_z} = \frac{750.7704}{A} + \frac{417313.05}{W_z} = 175;$$

Como todavía no tenemos un perfil elegido, no podemos saber el área de dicho perfil, por lo tanto obviaremos el primer término de la ecuación y procederemos a hallar el módulo resistente para posteriormente ir a la tabla del anexo 1 y elegir el perfil requerido.

$$\sigma_x = \frac{417313.05}{W_z} = 175; \quad \underline{W_z = 2384.646 \text{ mm}^3 = 2.384 \text{ cm}^3}$$

### 5.8.6.- Elección perfil

Una vez hallados todos los módulos resistentes de todas las barras,

$$\text{Barra I - I'} \quad \underline{W_z = 3916.15 \text{ mm}^3 = 3.916 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Barra J - J'} \quad \underline{W_z = 5240.32 \text{ mm}^3 = 5.24 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Barra AB} \quad \underline{W_z = 192.8571 \text{ mm}^3 = 0.192 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Barra AIE} \quad \underline{W_z = 1524.5454 \text{ mm}^3 = 1.524 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Barra EHF} \quad \underline{W_z = 2384.646 \text{ mm}^3 = 2.384 \text{ cm}^3}$$

vamos a elegir el que tenga el mayor valor y a partir de él procederemos a elegir un perfil adecuado en la tabla del anexo 1.

Como podemos observar el mayor valor se encuentra en la barra J – J', barra inferior del amarre del cilindro hidráulico. También podemos observar que entre los módulos de las barras I-I' y J-J' y los módulos de las otras barras hay gran diferencia por lo que mirando en tablas hemos considerado que las otras barras pueden elegirse con un perfil menor ya que así, entre otras cosas, podremos aligerar peso y coste, que será bueno para nuestro proyecto. Así pues procederemos de la siguiente manera.

Para las barras de amarre del cilindro hidráulico, barras I-I' y J-J', buscaremos un valor inmediatamente superior al obtenido,  $W = 5.24 \text{ cm}^3$ , que será:

$$\underline{W = 5.54 \text{ cm}^3; \quad A = 5.35 \text{ cm}^2; \quad 40 \times 40 \times 4}$$

Y para las demás barras de la estructura cogeremos el valor máximo obtenido que es el de la barra EHF,  $W = 2.384 \text{ cm}^3$ , y buscaremos un valor inmediatamente superior a éste.

$$\underline{W = 3.47 \text{ cm}^3; \quad A = 2.94 \text{ cm}^2; \quad 40 \times 40 \times 2}$$

Como podemos observar hay una gran similitud entre ambos perfiles ya que los dos tendrán la misma dimensión de  $40 \times 40$ , pero, el espesor en uno será de 2 mm y en el otro de 4 mm.

Así pues, una vez elegido el perfil, hay que comprobar si es válido o no para todas las barras, y lo haremos comprobando que se cumpla la siguiente ecuación,

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{W_z} < 175,$$

pero esta vez sin omitir la primera parte de la ecuación y cambiando los dos términos siguientes, A y  $W_z$ , por los valores normalizados, y en caso de que se cumpla dicha igualdad, podremos dar por elegido el perfil. Comenzaremos por la barra I – I' y así sucesivamente hasta haber comprobado todas las barras.

#### Barra I – I'

$$N = 0 \text{ N}$$

$$M_z = 685327.2 \text{ N.mm}$$

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{W_z} = \frac{685327.2}{5540} < 175;$$

$$\sigma_x = 123.70 < 175. \quad \underline{\text{Si cumple.}}$$

Barra J – J'

$$N = 0 \text{ N}$$

$$M_z = 917056 \text{ N.mm}$$

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{W_z} = \frac{917056}{5540} < 175;$$

$$\sigma_x = 165.53 < 175. \quad \underline{\text{Si cumple.}}$$

Barra AB

$$N = 949.4204 \text{ N}$$

$$M_z = 33750 \text{ N.mm}$$

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{W_z} = \frac{949.4204}{294} + \frac{33750}{3470} < 175;$$

$$\sigma_x = 12.9555 < 175. \quad \underline{\text{Si cumple.}}$$

Barra AIE

$$N = 641.4786 \text{ N}$$

$$M_z = 266795.46 \text{ N.mm}$$



$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{W_z} = \frac{641.4786}{294} + \frac{266795.46}{3470} < 175;$$

$$\sigma_x = 79.0682 < 175. \quad \underline{\text{Si cumple.}}$$

### Barra EHF

$$N = 750.7704 \text{ N}$$

$$M_z = 417313.05 \text{ N.mm}$$

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{W_z} = \frac{750.7704}{294} + \frac{417313.05}{3470} < 175;$$

$$\sigma_x = 122.8167 < 175. \quad \underline{\text{Si cumple.}}$$

Como podemos observar todos los perfiles cumplen las condiciones exigidas, por lo tanto, podemos concluir que los perfiles escogidos están bien elegidos.

### Perfil elegido para las barras I-I' y J-J' 40 x 40 x 4.

### Perfil elegido para las demás barras de la estructura 40 x 40 x 2.

## 6.- Diseño en SolidWorks

### 6.1- Introducción

SolidWorks es una solución de diseño tridimensional completa que integra un gran número de funciones avanzadas para facilitar el modelado de piezas, crear grandes ensamblajes, generar planos y otras funcionalidades que le permiten validar, gestionar y comunicar proyectos de forma rápida, precisa y fiable.

SolidWorks posee tres módulos muy útiles como son diseño de pieza, ensamblajes y dibujo, y cada una dispone de muchas herramientas de productividad, comunicación y análisis y simulación. En la siguiente figura podemos observar un ejemplo.

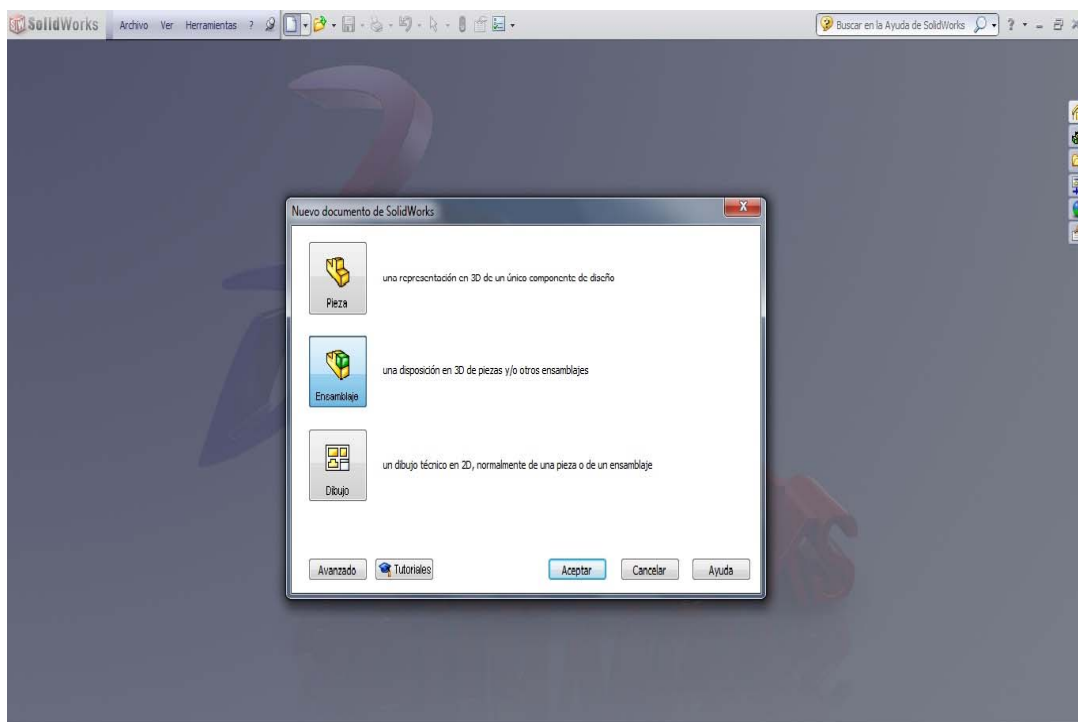


Imagen 11: Menú de creación de nuevo documento en SolidWorks.

Las principales características que hace que SolidWorks sea una herramienta versátil y precisa es su capacidad de ser asociativo y paramétrico de forma bidireccional con todas sus aplicaciones. Refiriéndonos al significado de asociativo, queremos decir que todos los módulos están vinculados y que la modificación de un fichero pieza, modifica el ensamblaje y los planos asociados de forma automática, sin tener que nosotros modificar nada.

A continuación procedemos a describir cada una de las tres partes más significativas dentro de SolidWorks.

### Módulo pieza

Éste módulo constituye un entorno de trabajo donde se pueden diseñar modelos mediante el empleo de herramientas de diseño de operaciones ágiles e intuitivas. El conjunto de funciones e iconos permiten crear modelos tridimensionales partiendo de geometrías de croquis y obtener sólidos, superficies, estructuras metálicas, etc.

Los modelos creados se gestionan mediante el gestor de diseño donde se incluyen todas las operaciones 2D y 3D utilizadas en la obtención de la pieza.

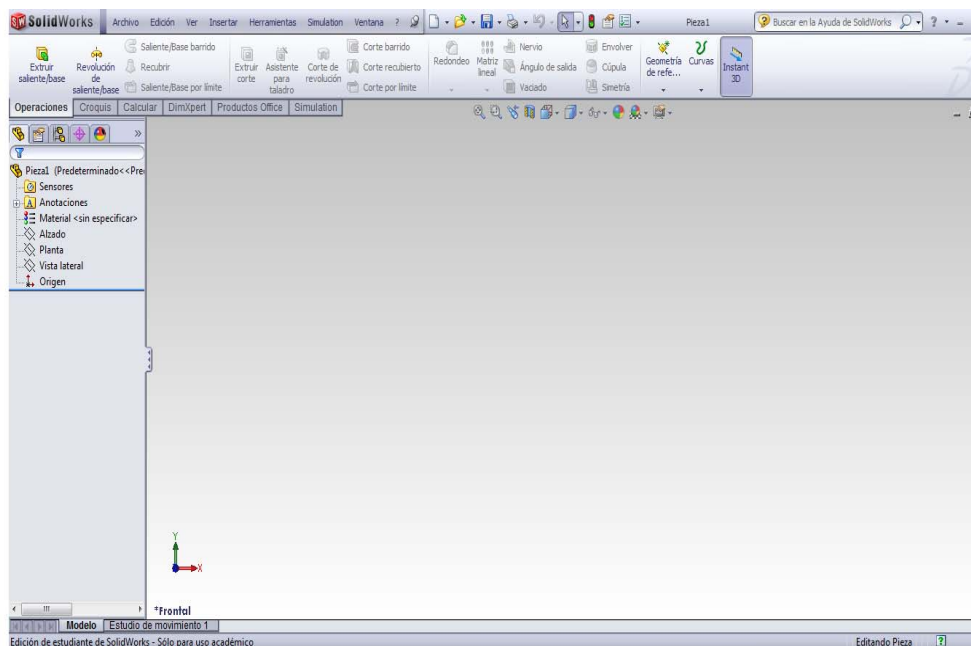


Imagen 12: Menú del módulo pieza.

## Ensamblaje

Éste módulo está formado por un entorno de trabajo preparado para crear conjuntos mediante la inserción de los modelos 3D creados en el módulo pieza. Los ensamblajes se definen por el establecimiento de relaciones geométricas entre las piezas integrantes.

La creación de los ensamblajes permite analizar las posibles interferencias o choques entre los componentes móviles insertados así como simular el conjunto mediante motores lineales, rotativos, resortes y gravedad para poder evaluar la correcta cinemática del conjunto.

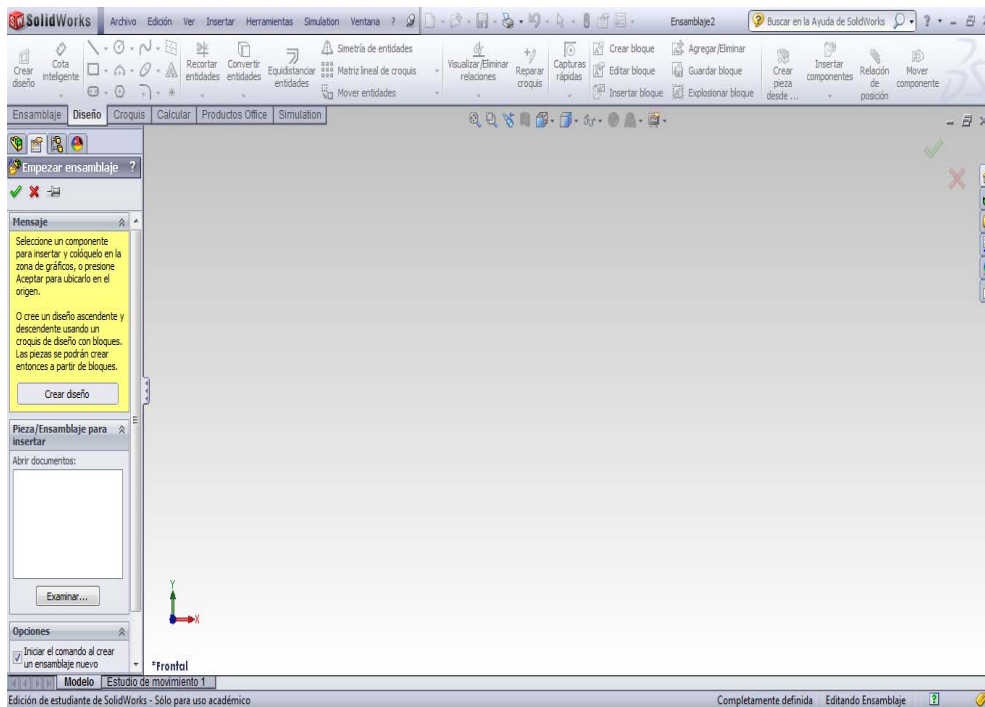


Imagen 13: Menú del módulo ensamblaje.

## Dibujo

Éste último módulo permite crear planos con las vistas de los modelos o ensamblajes de forma automática y de una manera muy sencilla. La obtención de las vistas, alzado, planta y perfil, requiere únicamente pulsar sobre un icono o arrastrar la pieza 3D desde su ventana correspondiente hasta la ventana del dibujo.

El módulo de dibujo también permite obtener proyecciones ortogonales, secciones, cortes, perspectivas, acotación, entre otras muchas funciones. Estos documentos están totalmente asociados a las piezas y ensamblajes de forma que cualquier cambio en ellas se actualiza en tiempo real en sus planos correspondientes, sin tener que modificarlo de forma manual.

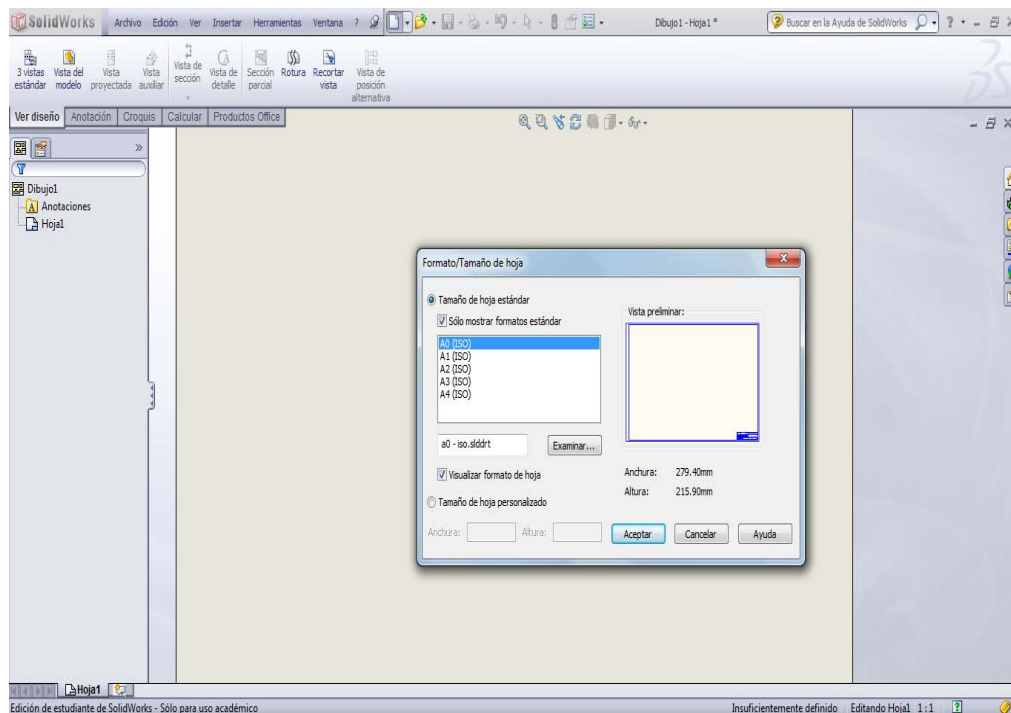


Imagen 11: Menú del módulo dibujo.

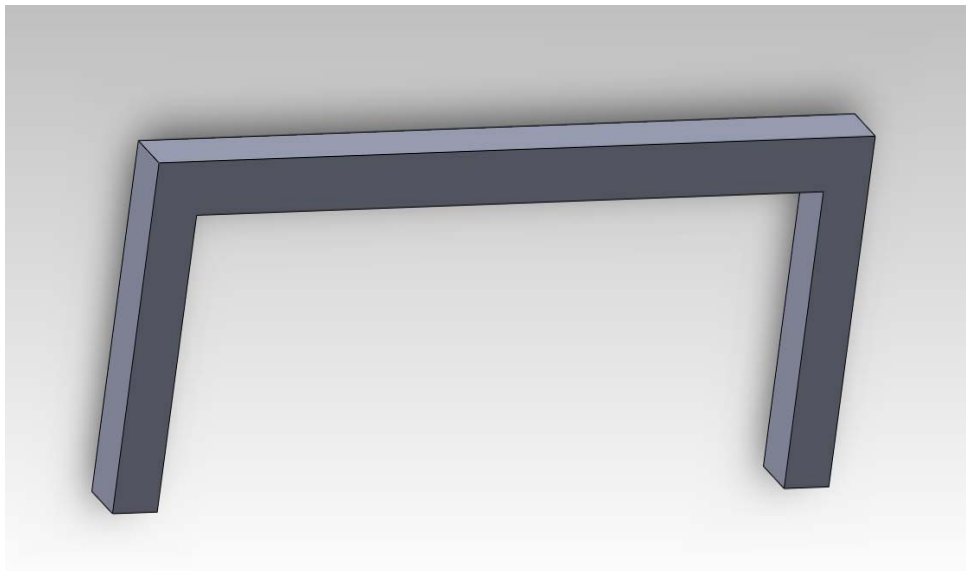
## 6.2- Diseño de piezas en SolidWorks

El diseño de las piezas necesarias para conformar la camilla hidráulica se realiza teniendo en cuenta las medidas obtenidas de los planos hechos sobre una camilla hidráulica de similares características situada en el edificio BIFI (Instituto de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos) situado detrás del Edificio Torres Quevedo.

A continuación mostraremos las piezas diseñadas a través de SolidWorks.

### 6.2.1.- Patas

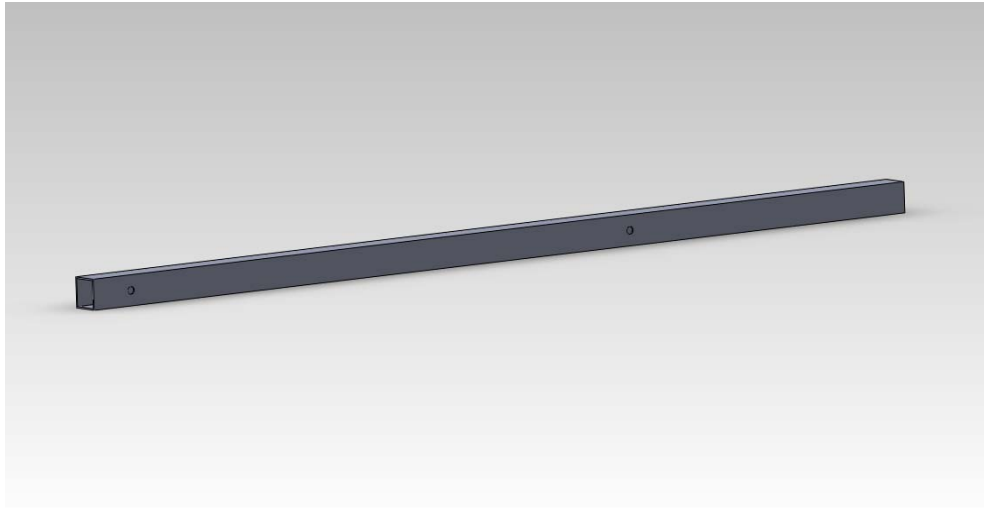
Habrán dos piezas en total, sobre éstas irán las dos barras que conforman el bastidor, y lo que harán será soportar todo el peso de la estructura.



*Imagen 12: Patas.*

### **6.2.2.- Barra abajo (bastidor)**

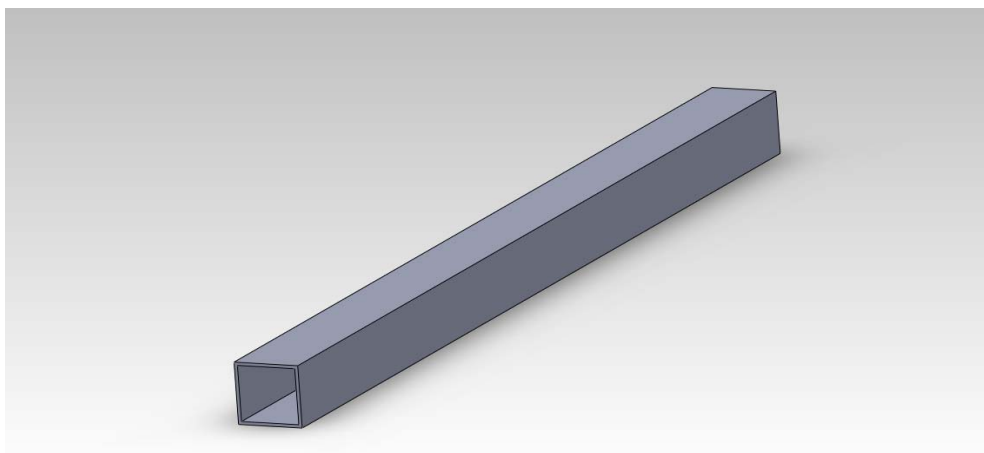
Habrán dos piezas como éstas en la estructura y a éstas irán los dos travesaños unidos mediante pasadores.



*Imagen 13: Bastidor.*

### **6.2.3.- Barra sujeción pistón (abajo)**

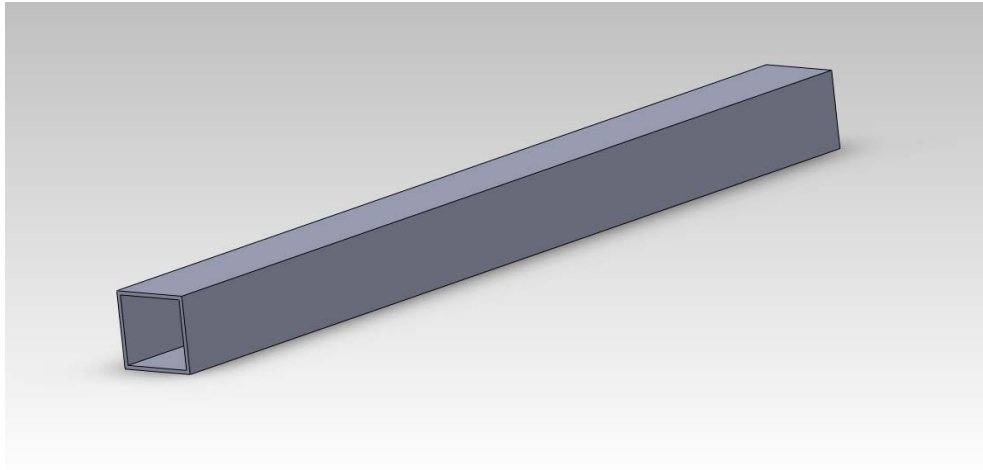
Sobre ésta barra se colocarán dos orejetas, las cuales, sujetarán el cilindro hidráulico en su parte inferior.



*Imagen 14: Barra inferior del pistón hidráulico.*

#### **6.2.4.- Barra sujeción pistón (arriba)**

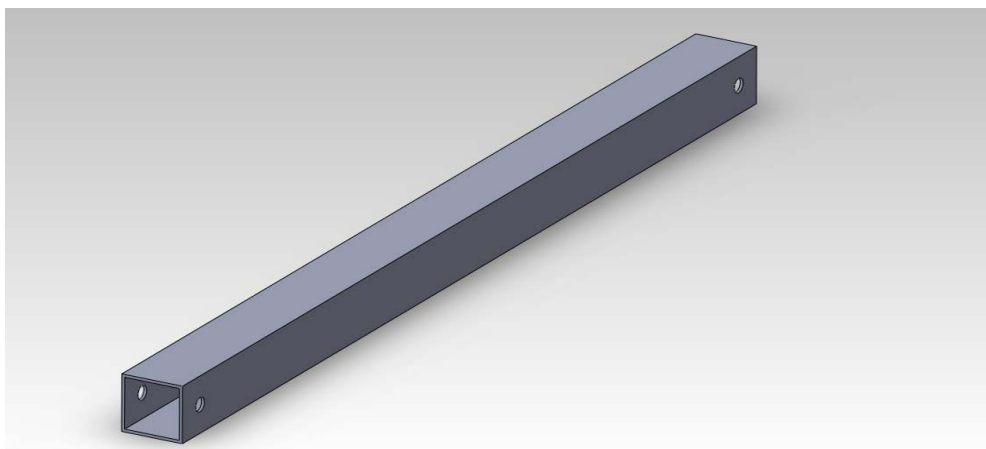
Sobre ésta barra se colocarán dos orejetas, las cuales, sujetarán el cilindro hidráulico en su parte superior.



*Imagen 15: Barra superior del pistón hidráulico.*

#### **6.2.5.- Travesaño**

Habrán cuatro en total y unirán la parte superior e inferior, bastidor y plataforma, de la estructura. También irán a parar entre dos travesaños la barra superior de la sujeción del cilindro hidráulico como veremos en el ensamblaje.

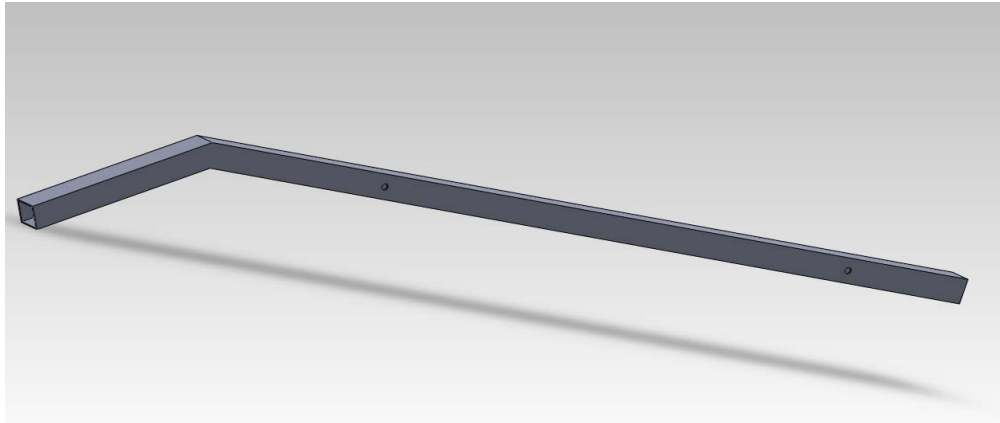


*Imagen 16: Travesaño.*



### **6.2.6.- Barra superior (plataforma)**

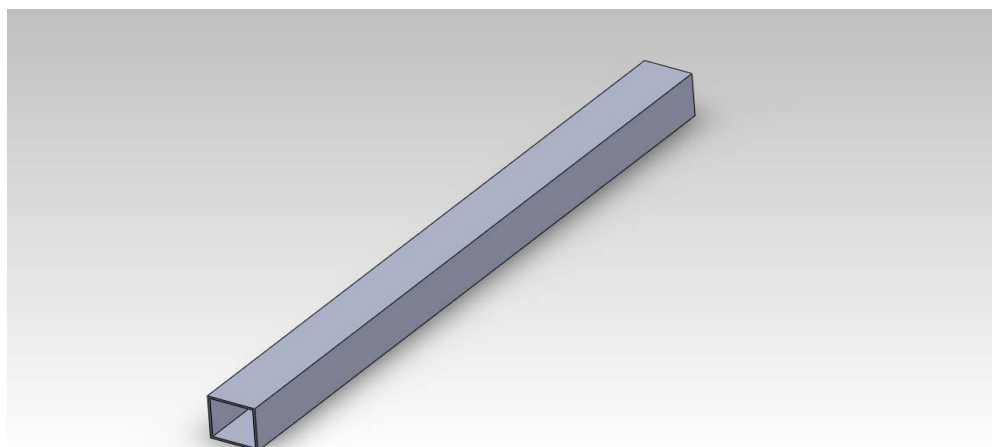
Habrán dos en la estructura y conformarán la parte superior, plataforma, a las cuales irán los travesaños y las barras de refuerzo de la plataforma que veremos en la siguiente pieza.



*Imagen 17: Barra superior (plataforma).*

### **6.2.7.- Barra refuerzo (plataforma)**

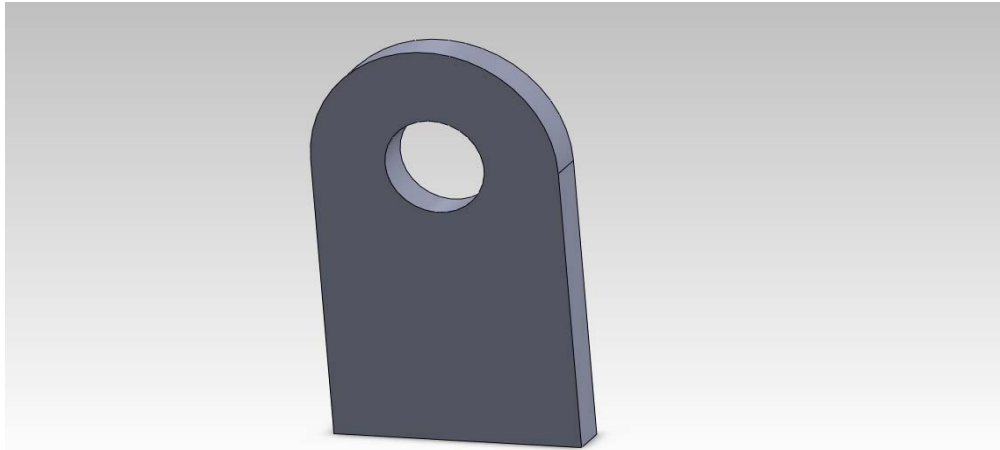
Estas barras son parte de la plataforma, son cuatro en total, y su función es reforzarla. Más tarde las podremos ver en el ensamblaje.



*Imagen 18: Barra de refuerzo en la plataforma.*

### **6.2.8.- Orejetas**

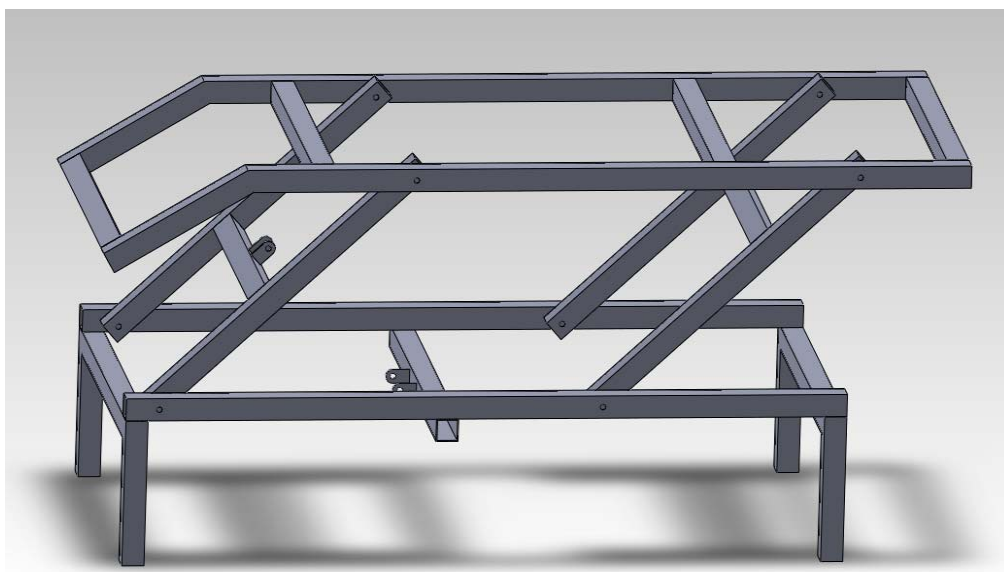
Habrán cuatro en total en toda la estructura, serán donde vayan los pasadores del cilindro hidráulico en su parte superior e inferior.



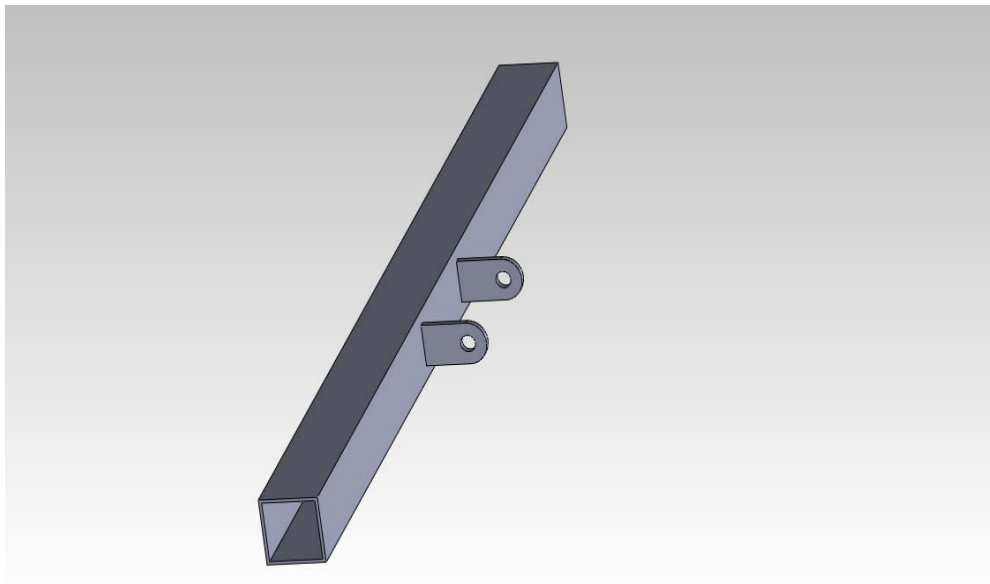
*Imagen 19: Orejetas.*

### **6.2.9.- Ensamblaje**

Una vez obtenidas todas las piezas necesarias se obtiene el resultado final.



*Imagen 20: Ensamblaje de la estructura.*



*Imagen 21: Detalle del amarre del cilindro hidráulico con orejetas.*

## 7.- Comparación de cálculos teóricos y cálculos mediante la herramienta SolidWorks Simulation

### 7.1- Introducción a SolidWorks Simulation

SolidWorks Simulation se trata de una herramienta de diseño integrada en SolidWorks que permite simular el comportamiento de piezas y ensamblajes mediante la aplicación del método de los elementos finitos (MEF).

El proceso a seguir en la utilización de SolidWorks simulation es el siguiente:

#### 1.- Preproceso

- Creación del modelo que permita la generación de la malla.
  
- Creación del modelo matemático
  - Tipo de análisis
  - Materiales
  - Conexiones
  - Cargas y condiciones de apoyo
  
- Construcción del modelo de elementos finitos
  - Creación del mallado de la pieza a analizar

## **2.- Solución**

Resolución del modelo de elementos finitos

## **3.- Post-proceso**

Análisis de los resultados obtenidos

## **7.2- Comparación de cálculos analíticos y cálculos en las piezas más importantes de la estructura**

Una vez hechos los cálculos analíticos y diseñada la camilla hidráulica en base a dichos cálculos, se han realizado los cálculos con la herramienta SolidWorks Simulation. En este apartado se va a realizar una comparación entre los cálculos anteriormente citados de las piezas más importantes de la camilla hidráulica.

Las piezas que hemos sometido a estudio son: barra superior de la camilla hidráulica (bastidor), travesaños, barra inferior de la camilla hidráulica (plataforma) y ambas barras donde está anclado el cilindro hidráulico.

### **7.2.1.- Barra superior de la camilla hidráulica (bastidor)**

La barra superior la hemos sometido a un estudio con las siguientes condiciones:

- Está sometida a una carga de  $750 \text{ N / m}$  en una zona concreta.
- En los puntos A y B, donde se encuentran los pasadores, solamente permitimos el giro, no traslación ni movimiento.

Esta barra se ha simulado exactamente igual que la manera de dimensionarla en los cálculos analíticos por lo tanto ahora veremos una imagen de las condiciones impuestas y a continuación compararemos los resultados obtenidos con los cálculos analíticos.

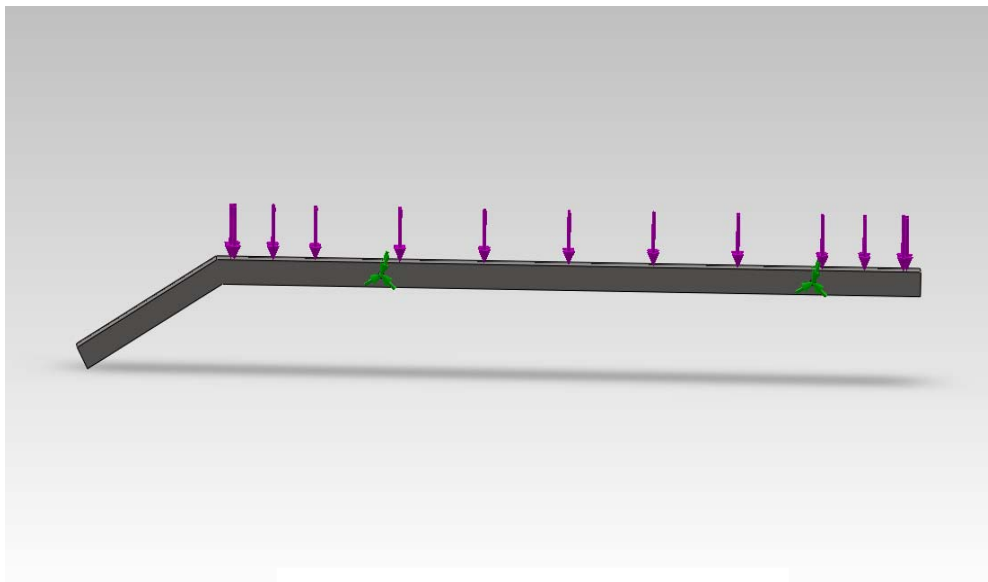


Imagen 22: Condiciones de apoyo y cargas.

A continuación mostramos la imagen del estudio de tensiones.

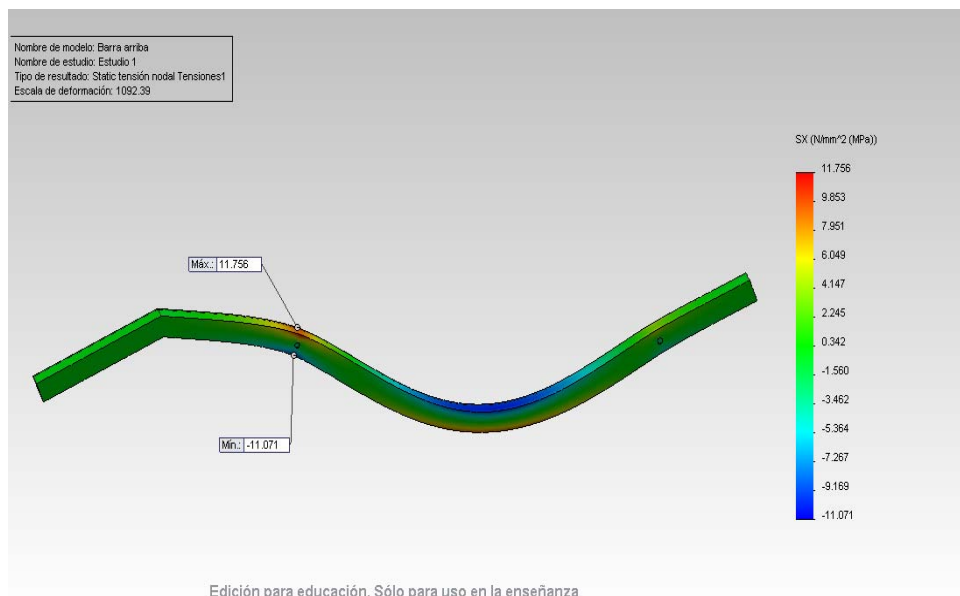


Imagen 23: Diagrama de tensiones.

Como podemos ver, la barra superior (plataforma) está bien dimensionada, ya que la tensión máxima alcanzada es de 11.75 MPa, y comparado con lo que nos salía analíticamente, 13 Mpa, podemos observar que los valores son bastante parecidos. Además, sabiendo que la tensión de fluencia del material era de 350 MPa, podemos decir que con este dimensionamiento no habrá deformaciones permanentes en toda la barra.

También podemos observar que el punto donde hay mayor tensión se encuentra en el pasador del punto A, por la parte superior de la barra, que es el punto con mayor tracción, así como justo en la parte contraria, parte inferior, tenemos el punto con mayor compresión, ambos con valores muy parecidos.

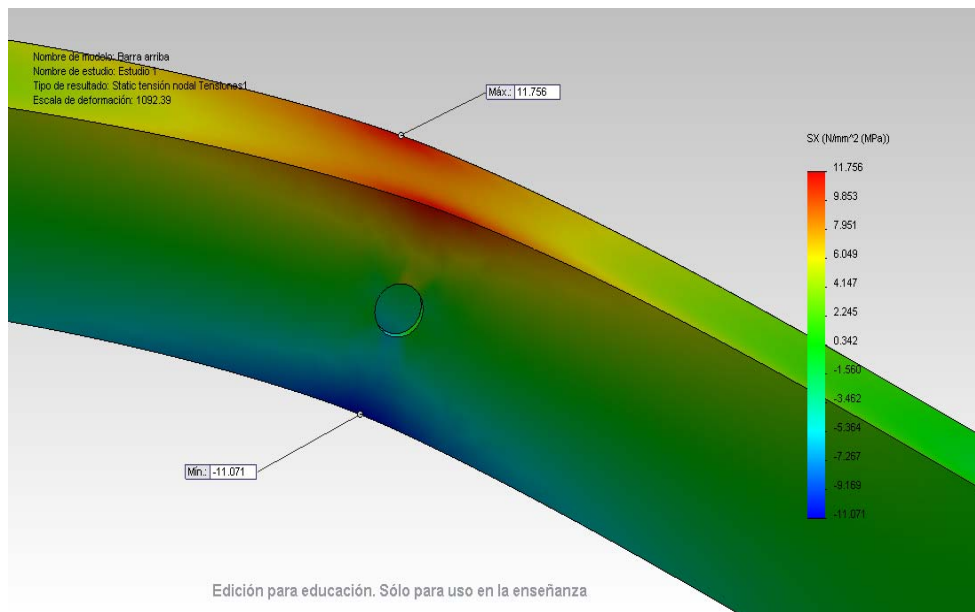


Imagen 24: Detalle del punto con mayor tensión.

Ahora vamos a pasar a ver los desplazamientos con las mismas condiciones definidas anteriormente.

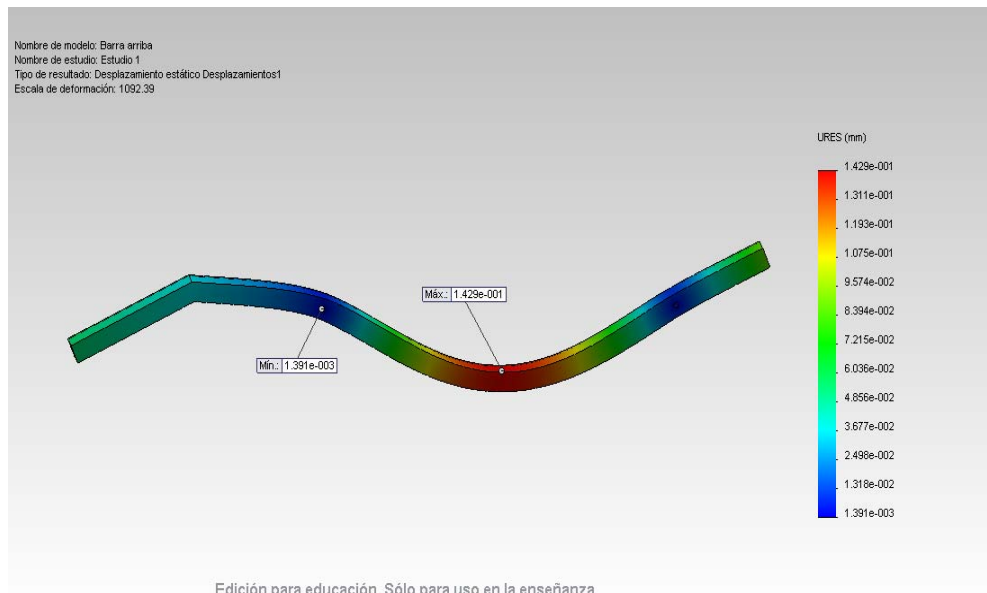


Imagen 25: Desplazamientos en la barra superior.

El mayor desplazamiento es de 0.14 mm y, como era de esperar, se da en la parte central, que es, la parte más alejada de los apoyos donde hemos impuesto las condiciones de apoyo, puntos A y B.

### **7.2.2.- Travesaño**

Seguidamente estudiaremos uno de los cuatro travesaños que hay en la estructura y que une la barra superior (plataforma) con la barra inferior (chasis).

Para esta parte de la estructura restringiremos el movimiento y la traslación donde se encuentran los pasadores, es decir, en los puntos A y E, y solamente permitiremos el giro. Además, trasladaremos la fuerza del cilindro que ejerce sobre esta barra como ahora veremos en la siguiente imagen.



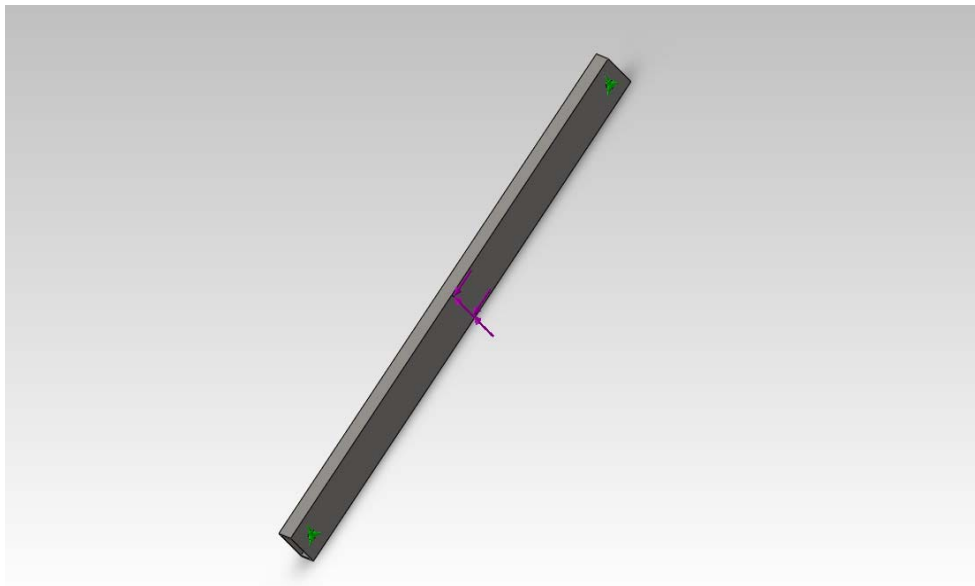


Imagen 26: Condiciones de apoyo y cargas.

Explicando las diferencias que hay entre la simulación hecha en SolidWorks y los cálculos analíticos podemos decir que la principal diferencia es la manera de trasladar la fuerza del cilindro a esta barra, ya que en los cálculos analíticos está trasladada de manera que se encuentra en mitad de la barra y aquí como podemos observar en la imagen está trasladada únicamente a una pared de la barra, lo que nos va a generar una serie de diferencias que ahora veremos y comentaremos gracias al diagrama de tensiones.

Así pues, vemos a continuación la distribución de tensiones en el travesaño.

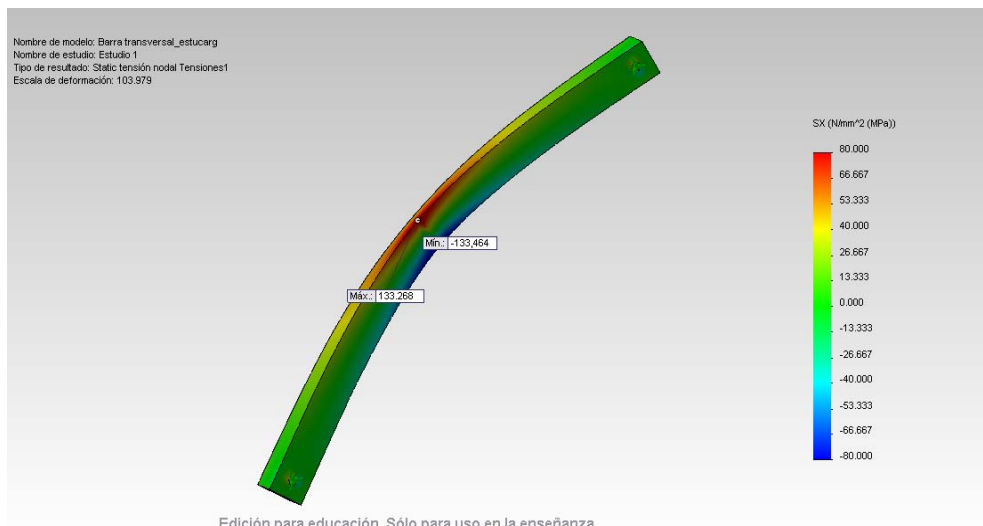


Imagen 27: Diagrama de tensiones.

Como podemos ver en la imagen 27 podemos apreciar que nos sale un punto de mayor tensión de 133.26 MPa y a nosotros en los cálculos analíticos nos salía un valor máximo de 80 MPa aproximadamente. Eso se debe a que en los cálculos analíticos no tenemos exactamente el mismo modelo que se analiza aquí, como hemos explicado anteriormente. Al trasladar la fuerza del cilindro a una pared de la barra y no al centro como hemos hecho en los cálculos analíticos, vemos que esta fuerza provoca que en el punto de aplicación la barra se retuerza y haya un pico de tensión más alto, como vamos a ver en la siguiente imagen.

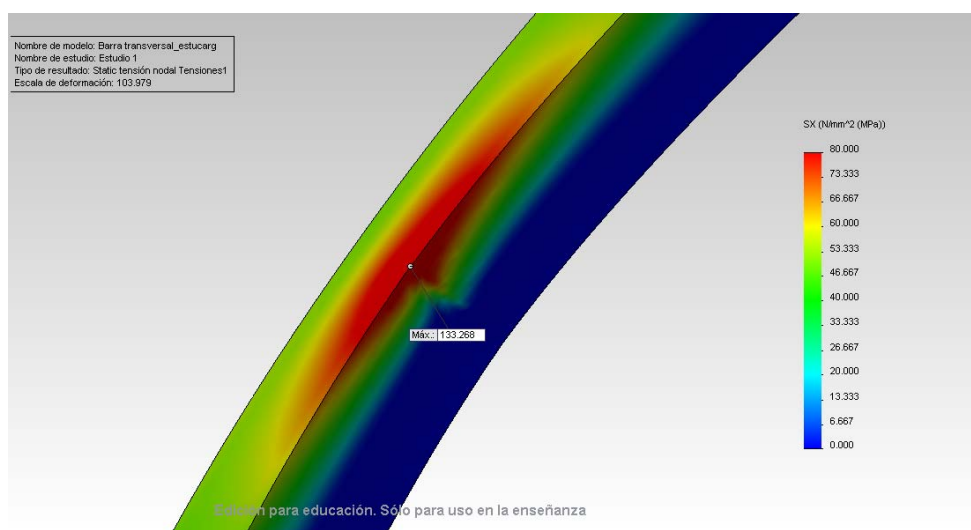


Imagen 28: Detalle de la zona con más tensión.

Aún así podemos concluir que la barra está bien dimensionada ya que como podemos observar en las demás zonas de las barras se puede observar que hay poca tensión y por lo tanto nuestra barra aguantará bien las cargas.

En cuanto a desplazamientos podemos observar en la imagen 27 que el máximo desplazamiento es 0.62 mm y se da en la zona en la que transmitimos la fuerza del cilindro como es lógico y es la zona más alejada de los apoyos.

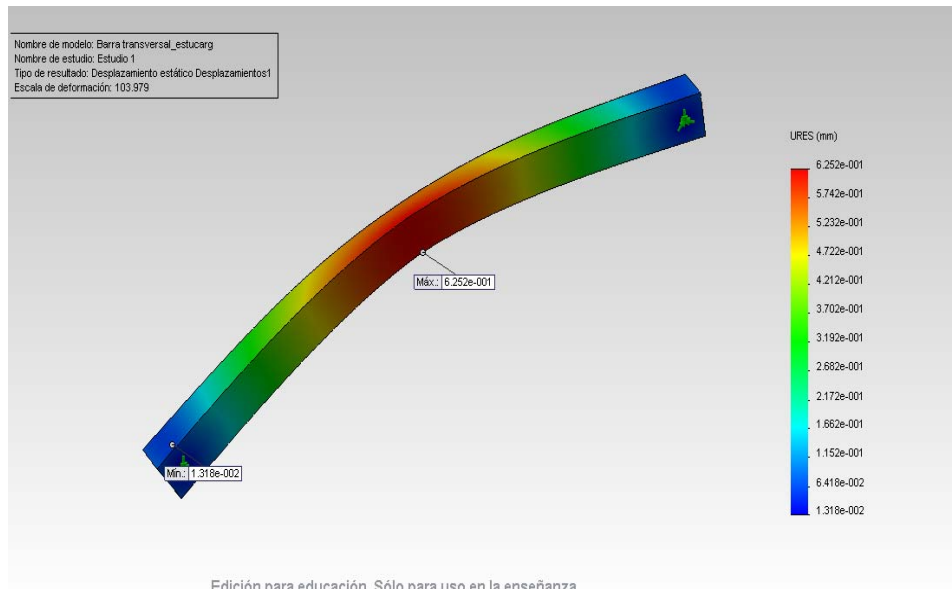


Imagen 29: Desplazamientos en el travesaño.

### **7.2.3.- Barra inferior (Bastidor)**

Ahora vamos a estudiar la barra inferior, donde más cargas aparecen, y veremos qué resultados obtenemos.

Para esta parte de la estructura traspasaremos todas las fuerzas que provengan de las barras conectadas con ésta, como son las fuerzas provenientes de las patas y también la fuerza del cilindro que ejerce sobre esta barra. Además, como en el apartado anterior, a los pasadores E y F, les restringiremos el movimiento y traslación y sólo permitiremos el giro.

A continuación veremos una imagen con las condiciones impuestas sobre la barra.

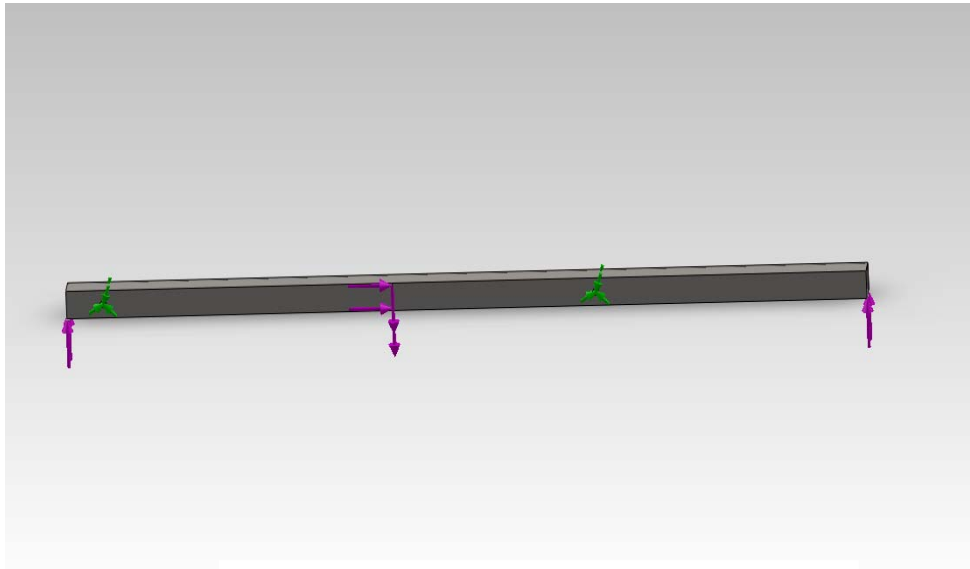


Imagen 30: Condiciones de apoyo en la barra inferior.

En esta barra pasa algo muy parecido a la del apartado anterior, a la hora de trasladar la fuerza del cilindro, la trasladamos a la pared y no al centro de la barra como se ha hecho en los cálculos analíticos, lo que va a provocar algún cambio que ahora comentaremos observando el diagrama de tensiones.

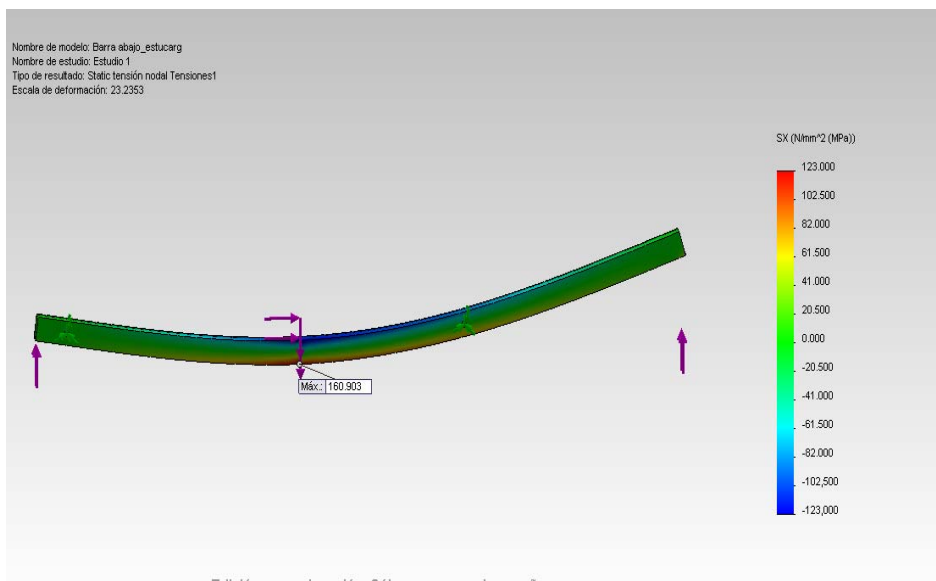


Imagen 31: Diagrama de tensiones.

Como podemos ver en la imagen 31 podemos apreciar que nos sale un punto de mayor tensión de 160 MPa y a nosotros en los cálculos analíticos nos salía un valor máximo de 123 MPa aproximadamente. Eso se debe a que en los cálculos analíticos no tenemos exactamente el mismo modelo que se analiza aquí, como hemos explicado anteriormente. Al trasladar la fuerza del cilindro a una pared de la barra y no al centro como hemos hecho en los cálculos analíticos, vemos que esta fuerza provoca que en el punto de aplicación la barra se retuerza y haya un pico de tensión más alto, como vamos a ver en la siguiente imagen.

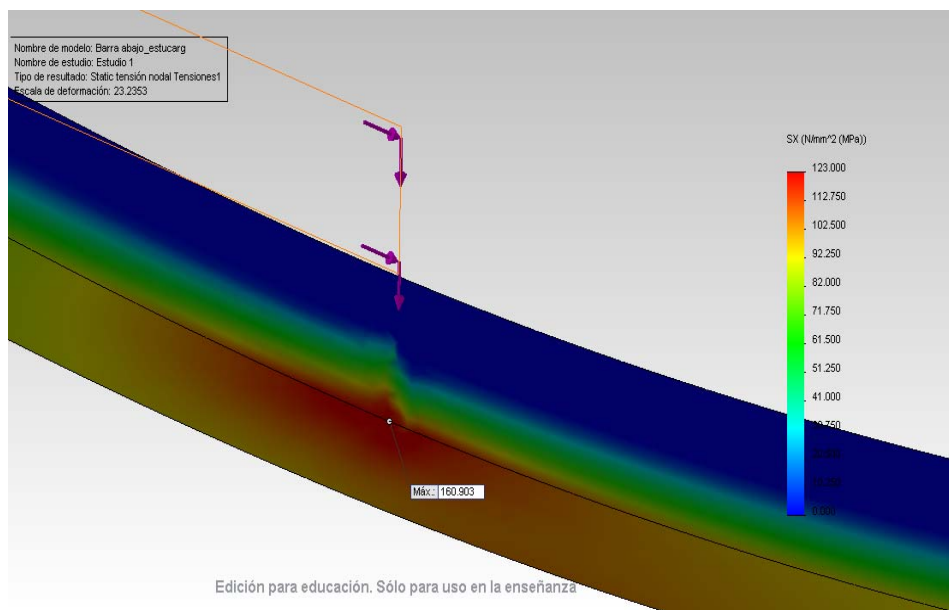


Imagen 32: Detalle punto más desfavorable.

Aún así podemos decir que la barra está bien dimensionada ya que en las demás zonas de la barra tenemos poca tensión por lo que no tendremos problema en que nuestra barra aguante de una manera correcta las cargas halladas en ella.

En cuanto a desplazamientos podemos observar en la imagen 27 que el máximo desplazamiento es 5.6 mm y se da en la zona más alejada de los apoyos.

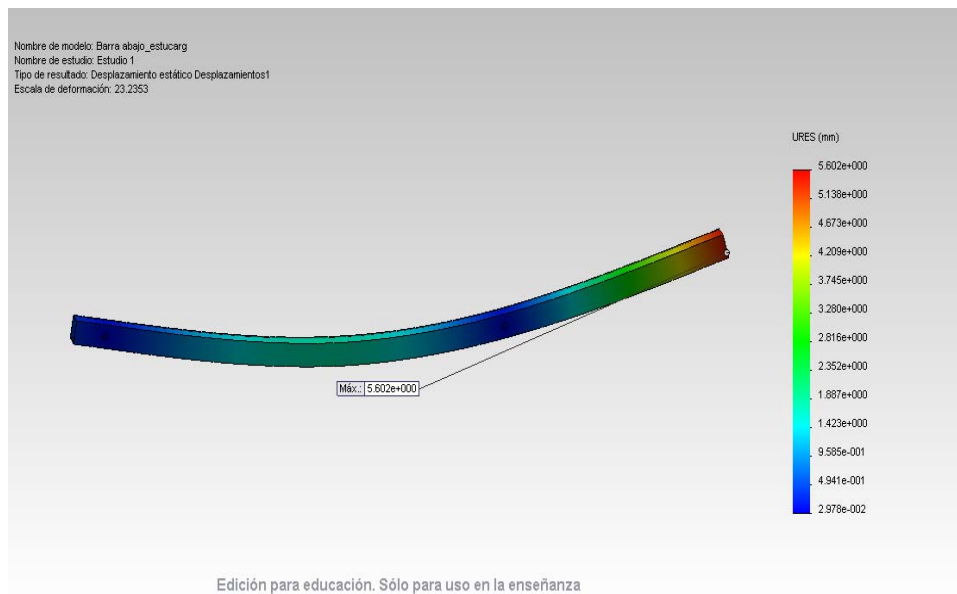


Imagen 33: Desplazamientos en la barra inferior de la estructura.

En esta barra vamos a comentar un dato sobre el factor de seguridad que se puede apreciar en la siguiente imagen. Nosotros hemos calculado toda la barra con un coeficiente de seguridad de dos y en la imagen podemos ver como hay unas pequeñas zonas en las que es un poco inferior,  $C_s = 1.82$ , esto se debe a la manera de aplicar la carga, ya que la hemos aplicado directamente en la arista inferior y no en la zona cuadrada inferior, similar a las patas.

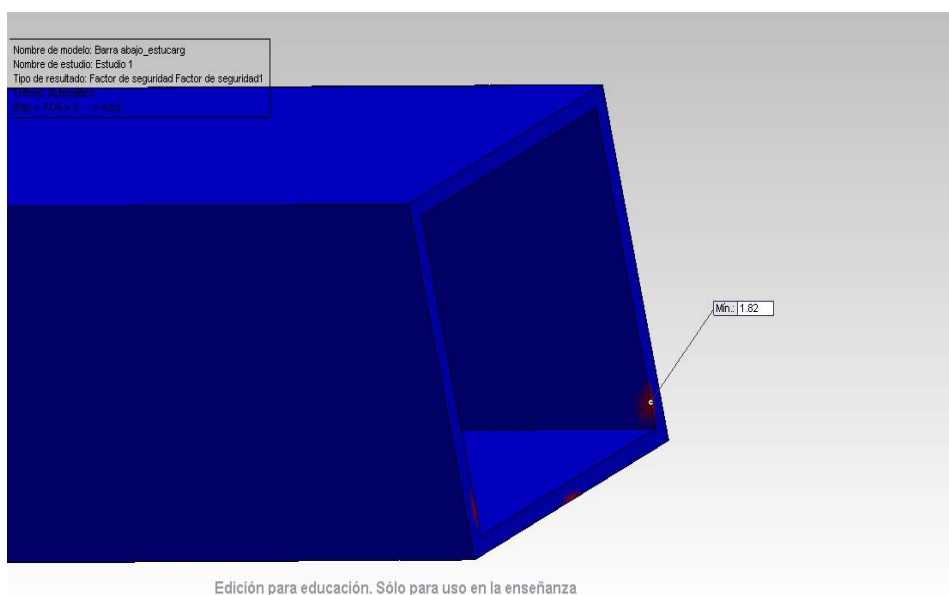
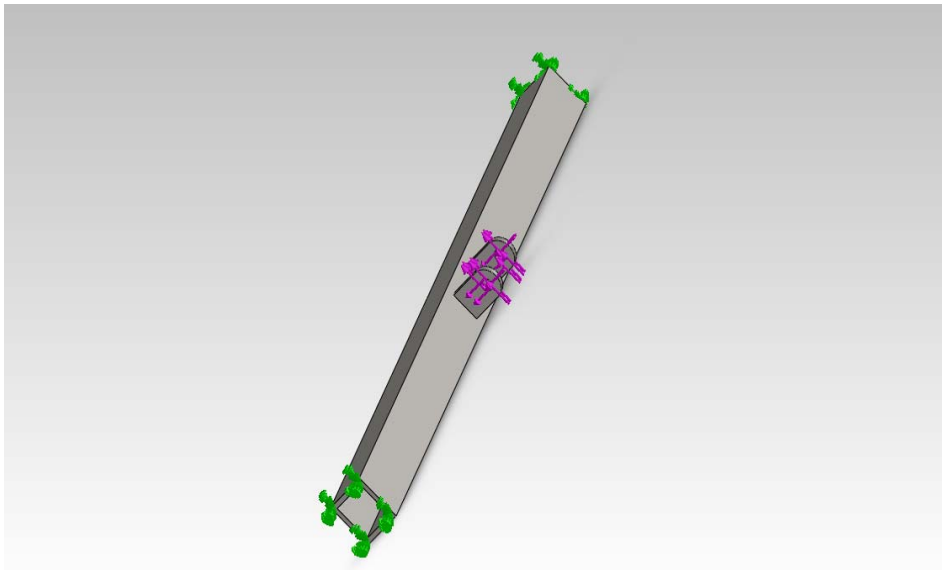


Imagen 34: Detalle del coeficiente de seguridad.

#### **7.2.4.- Barra I-I', anclaje superior del cilindro hidráulico**

En este apartado veremos los esfuerzos a los que está sometida la barra en la que está anclado el cilindro hidráulico en su parte superior.

Para el estudio, esta barra la vamos a empotrar en sus extremos y le aplicaremos la fuerza del cilindro en las orejetas en las que va anclado como vemos a continuación.



*Imagen 35: Condiciones de estudio en la barra I-I'.*

Las diferencias que podemos encontrar entre esta simulación y los cálculos analíticos son dos principalmente. La primera es que aquí supondremos que la barra está empotrada en sus extremos y analíticamente hemos supuesto que los extremos estaban apoyados. Y la segunda diferencia es que la fuerza del cilindro aquí la aplicamos en las orejetas y analíticamente la hemos supuesto en el centro de la barra. Estas dos diferencias nos provocarán una serie de reacciones que ahora comentaremos observando el diagrama de tensiones.

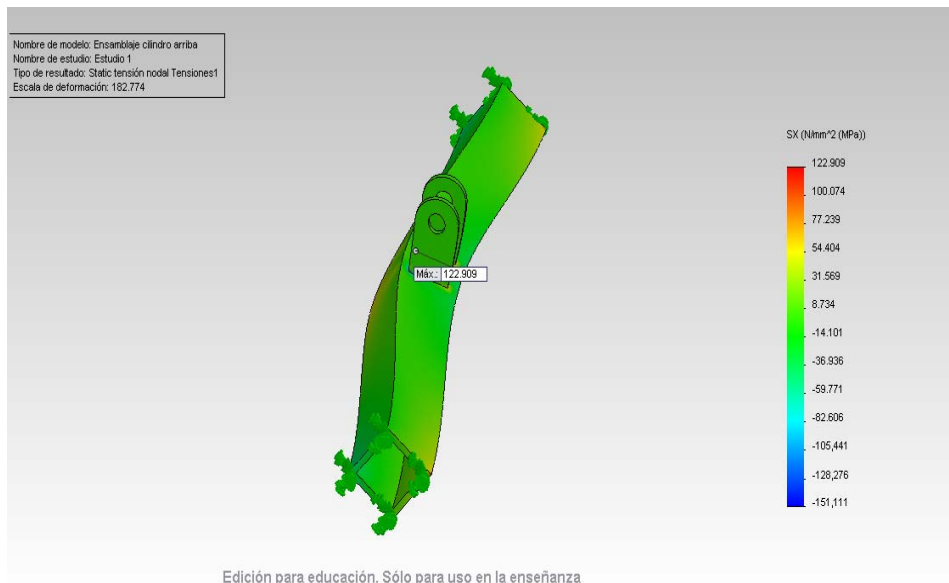


Imagen 36: Diagrama de tensiones.

Como podemos observar hay tres zonas en las que nos encontramos más tensión y son en el punto donde están las orejetas y en los extremos, eso se debe a que al estar empotrada la barra nos provoca un punto de mayor tensión, cosa que no se ha tenido en cuenta en los cálculos analíticos como ya habíamos dicho anteriormente. Además, podemos observar también que hay otro punto donde se encuentra el punto máximo que es la unión de las orejetas con la barra, ya que es un punto de concentrador de tensiones, que aunque no se había calculado, gracias a la simulación en SolidWorks, podemos identificar claramente.

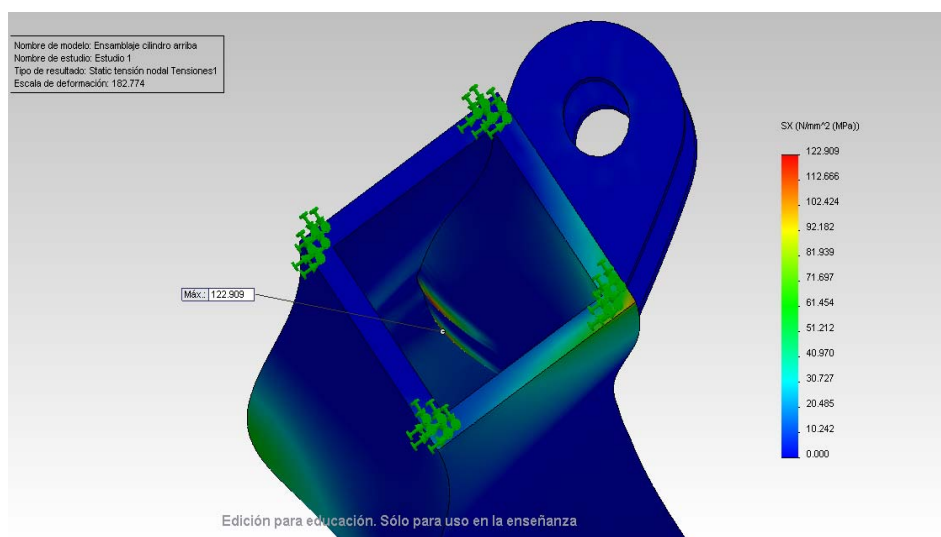


Imagen 37: Detalle del concentrador de tensiones entre orejeta y barra.



En cuanto a los desplazamientos como podemos observar en la siguiente imagen vemos que se da un valor máximo de 0.27 mm y se da en las orejetas, un dato muy normal ya que es donde está aplicada la fuerza del cilindro hidráulico.

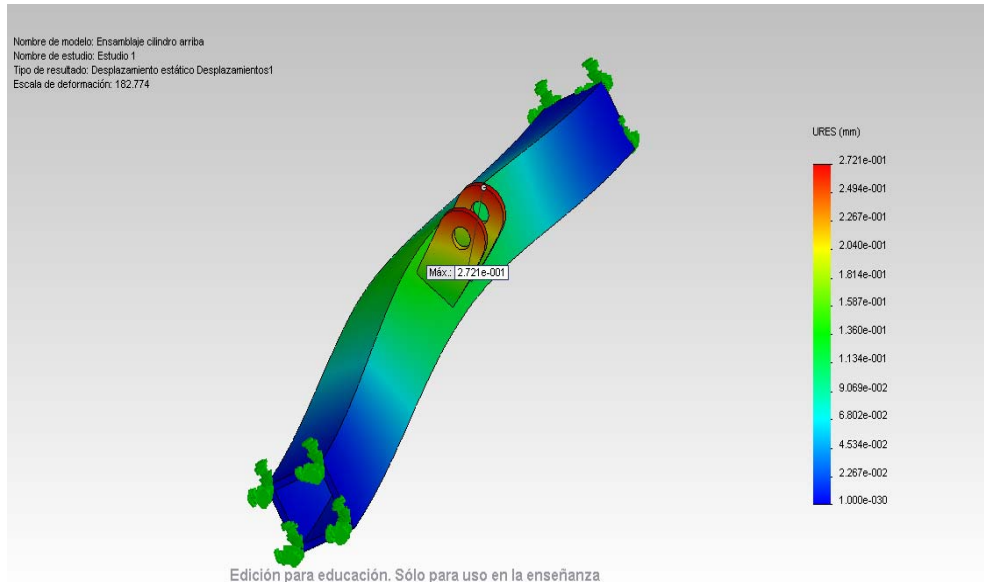


Imagen 38: Desplazamientos en la barra I-I'.

Vamos a comentar el factor de seguridad en esta barra a través de una captura en la simulación de SolidWorks que vemos a continuación. Podemos ver que en la zona de las orejetas aparece un coeficiente de seguridad que no cumple con nuestro requisito de que,  $C_s = 2$ , siendo éste un valor muy pequeño,  $C_s = 0.78$ .

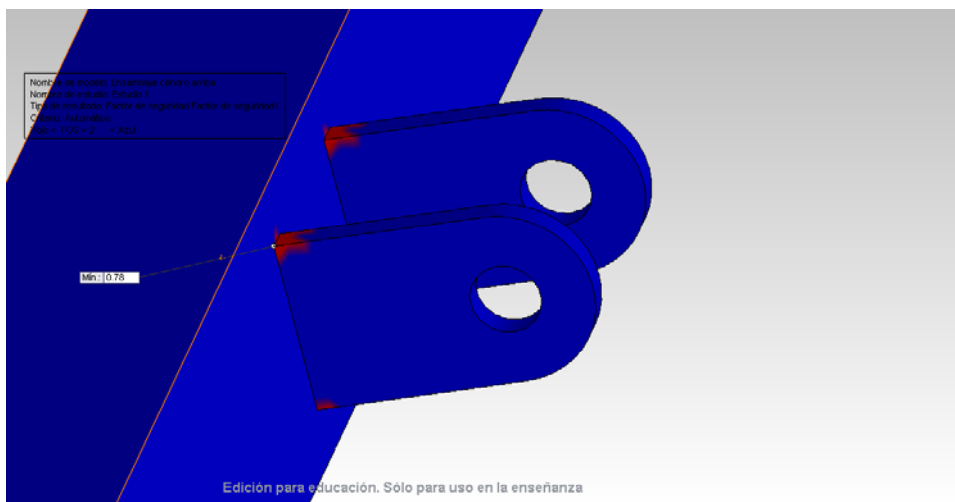


Imagen 39: Coeficiente de seguridad en las orejetas.

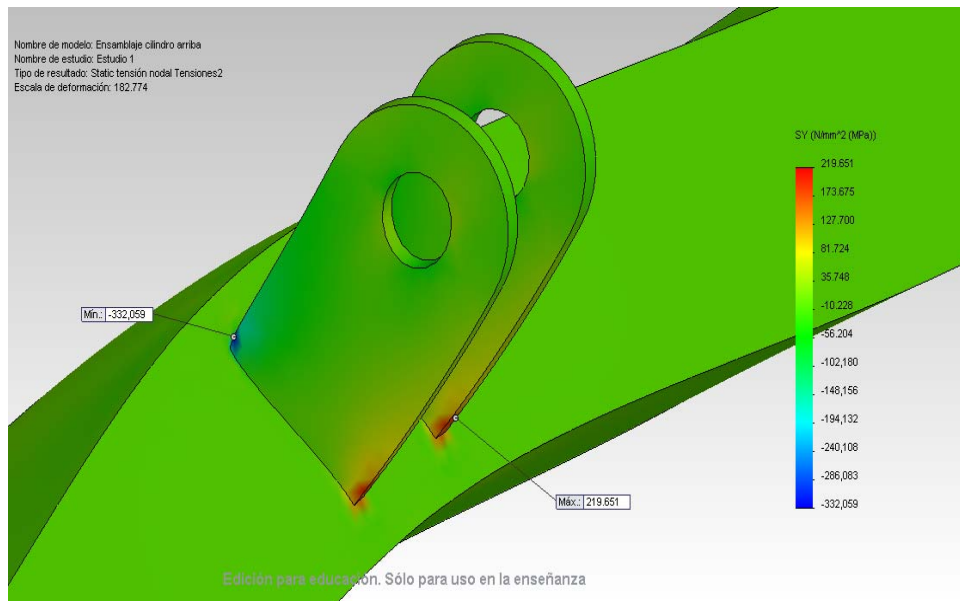
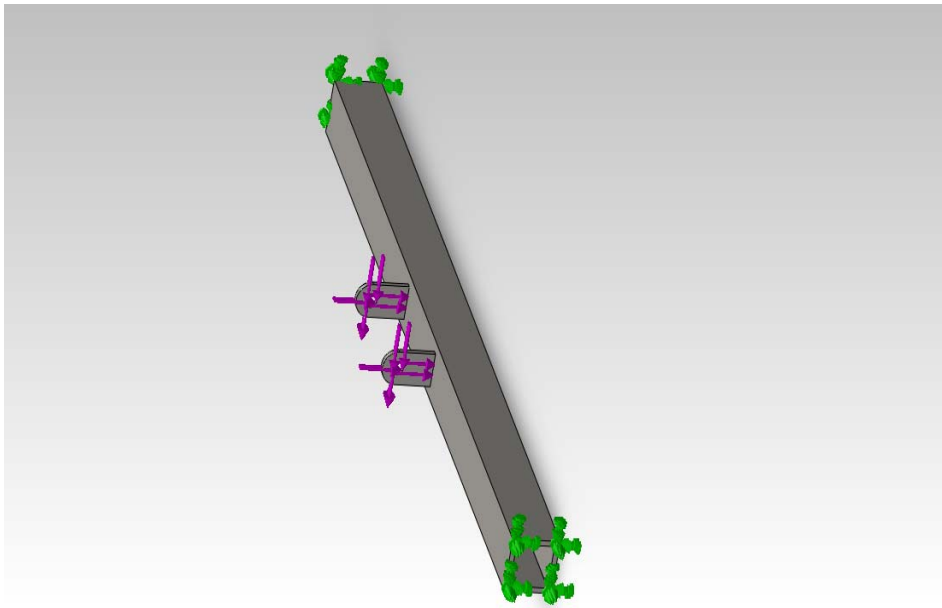


Imagen 40: Detalle del diagrama de tensiones en el eje y en la

Como podemos observar en la imagen anterior, vemos que las tensiones a lo largo del eje “y” salen muy altas, valor de tracción 220 MPa y valor de compresión 332 Mpa, esto puede ser debido al cambio de sección que hay con la barra, o al momento torsor proveniente de empotrar la barra por los dos extremos, ya que analíticamente no lo habíamos hecho así. Así pues para intentar solucionar éste suceso podríamos aumentar el espesor de la orejeta, aumentar la longitud de la orejeta, o intentar redondear la junta de la barra con la orejeta entre otros.

### **7.2.5.- Barra J –J', anclaje inferior del cilindro hidráulico**

Este apartado es muy similar al anterior ya que vamos a tener las mismas condiciones anteriores, así que, también empotraremos la barra en sus extremos y le aplicaremos la fuerza del cilindro en las orejetas en las que va anclado como vemos a continuación.



*Imagen 41: Condiciones de apoyo en la barra J –J'.*

Las diferencias que podemos encontrar entre esta simulación y los cálculos analíticos son dos principalmente. La primera es que aquí supondremos que la barra está empotrada en sus extremos y analíticamente hemos supuesto que los extremos estaban apoyados. Y la segunda diferencia es que la fuerza del cilindro aquí la aplicamos en las orejetas y analíticamente la hemos supuesto en el centro de la barra. Estas dos diferencias nos provocarán una serie de reacciones que ahora comentaremos observando el diagrama de tensiones.

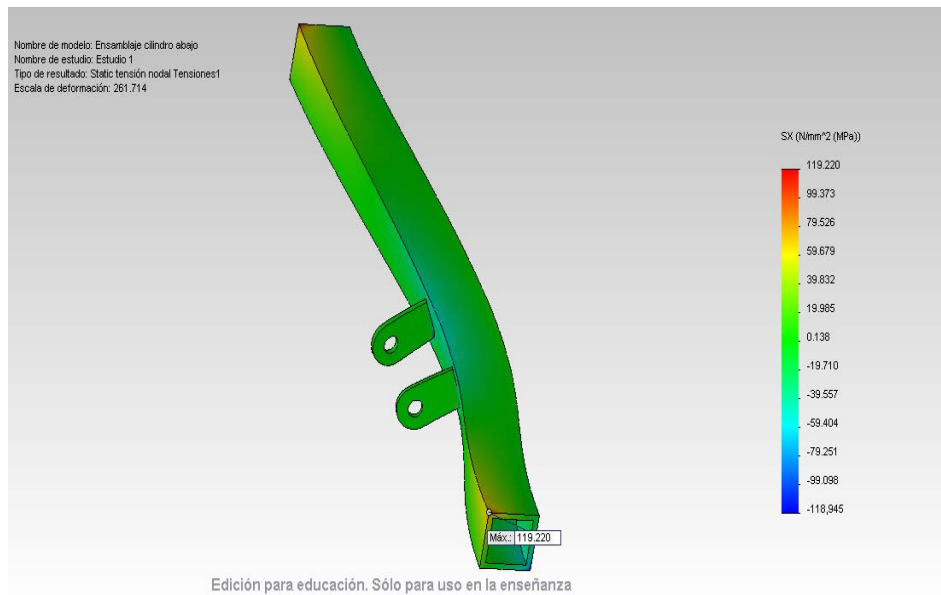


Imagen 42: Diagrama de tensiones en la barra J – J’.

Como se puede observar en la imagen hay dos zonas más destacadas en las que la tensión es mayor, y es en los extremos. Se da en estos puntos principalmente porque, a diferencia de los cálculos analíticos que teníamos apoyos y no había momento, aquí estamos empotrando la barra por ambos extremos y eso es lo que nos provoca que sea una zona de mayor tensión. En cuanto a resultados, analíticamente nos salía una tensión máxima de 165 MPa y aquí vemos que es de 120 MPa, mucho menor, y eso es debido a lo explicado anteriormente, al simular la barra con los extremos empotrados y no como si fueran apoyos.

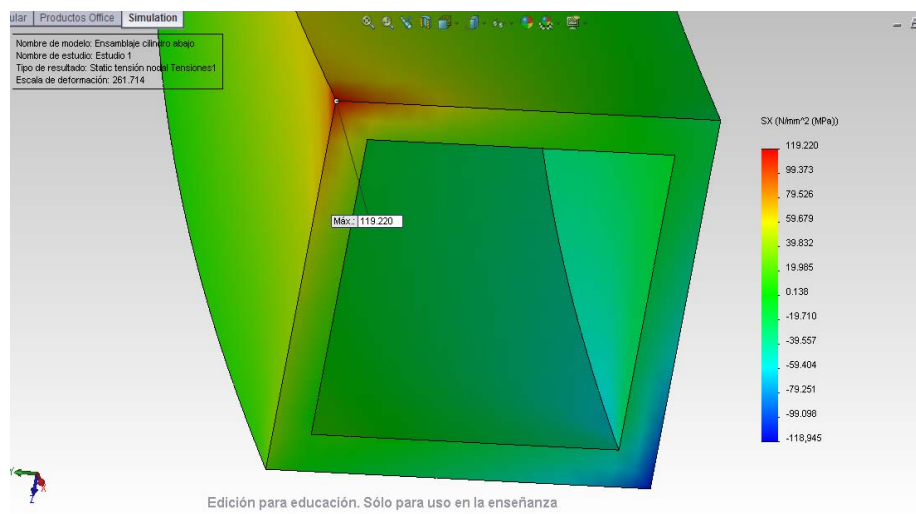


Imagen 43: Detalle del punto con mayor tensión.

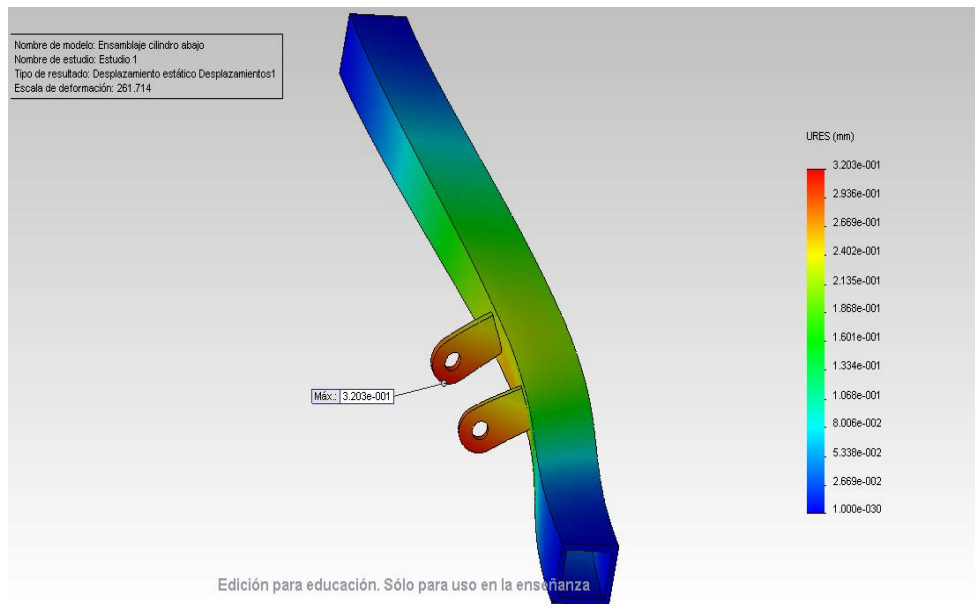


Imagen 44: Diagrama de desplazamientos.

En cuanto a los desplazamientos podemos ver que el máximo valor es de 0.32 mm y es un valor muy pequeño que se da en la zona de las orejetas.

Y comprobando el factor de seguridad de la barra podemos ver que nos cumple de una manera correcta,  $C_s = 2$ , aunque en la zona inferior de la orejeta podemos observar que es un poco inferior,  $C_s = 1.15$ .

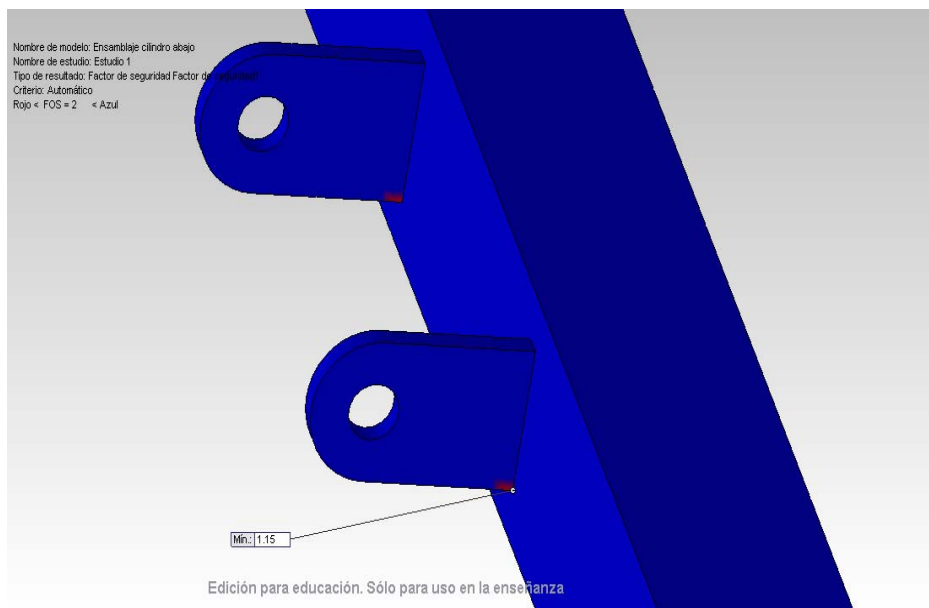


Imagen 45: Coeficiente de seguridad en las orejetas.

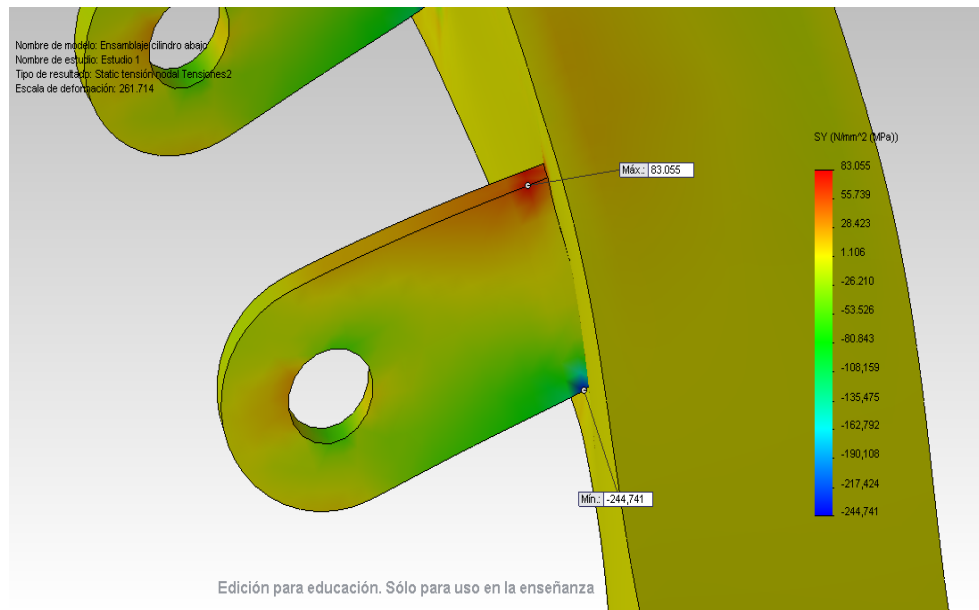


Imagen 46: Detalle del diagrama de tensiones en el eje y en la orejeta.

En esta barra nos sucede prácticamente lo mismo que en la estudiada en el apartado anterior, no cumplimos que la zona de las orejetas tengo un coeficiente de seguridad mayor o igual que dos, aunque en este caso el valor mínimo es mayor,  $C_s = 1.15$ . Entonces, podemos observar en la imagen que tenemos unos valores de tracción y compresión bastante altos, valor de tracción 83 MPa y valor de compresión 244 MPa, así que para intentar solucionar nuestro problema se podría, como en el caso anterior, aumentar el espesor de la orejeta, aumentar la longitud de la orejeta, o intentar redondear la junta de la barra con la orejeta entre otros.

## 8.- Análisis del ensamblaje completo de la estructura mediante la herramienta SolidWorks Simulation

### 8.1.- Explicación del análisis

En este apartado vamos a analizar el ensamblaje completo de la estructura a través de la herramienta SolidWorks Simulation.

Vamos a tomar varias hipótesis y en cada una vamos a sacar las conclusiones adecuadas a cada uno de los siguientes apartados:

Peso de la estructura

Diagrama de tensiones

Diagrama de desplazamientos

Comprobación de pasadores

Coefficiente de seguridad

Así pues, haremos cuatro simulaciones diferentes. Primero, haremos una simulación con la estructura construida en macizo y en la posición más desfavorable, que será cuando la fuerza del cilindro sea máxima, y con dos materiales diferentes. Segundo, haremos otras dos simulaciones, también en la posición más desfavorable, pero esta vez con dos hipótesis de carga diferentes, en una repartiremos la carga de otra forma, y en la segunda además de la carga que ya teníamos, añadiremos más carga en otra zona distinta de la que ya teníamos.

Una vez hecho esto, veremos y comentaremos las diferencias que puede haber entre las distintas simulaciones hechas atendiendo a los cinco puntos anteriormente citados.

Los materiales con los que vamos a simular el ensamblaje de la estructura van a ser los dos siguientes.

Acero AISI 1020

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	200000	N / mm <sup>2</sup>
Densidad de masa	7900	Kg / m <sup>3</sup>
Límite elástico	351.57	N / mm <sup>2</sup>

Aleación de aluminio 2219 - T81

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	72000	N / mm <sup>2</sup>
Densidad de masa	2840	Kg / m <sup>3</sup>
Límite elástico	350	N / mm <sup>2</sup>



## 8.2.- Análisis de los ensamblajes

### 8.2.1.- Ensamblaje en macizo con Acero AISI 1020

#### Peso de la estructura

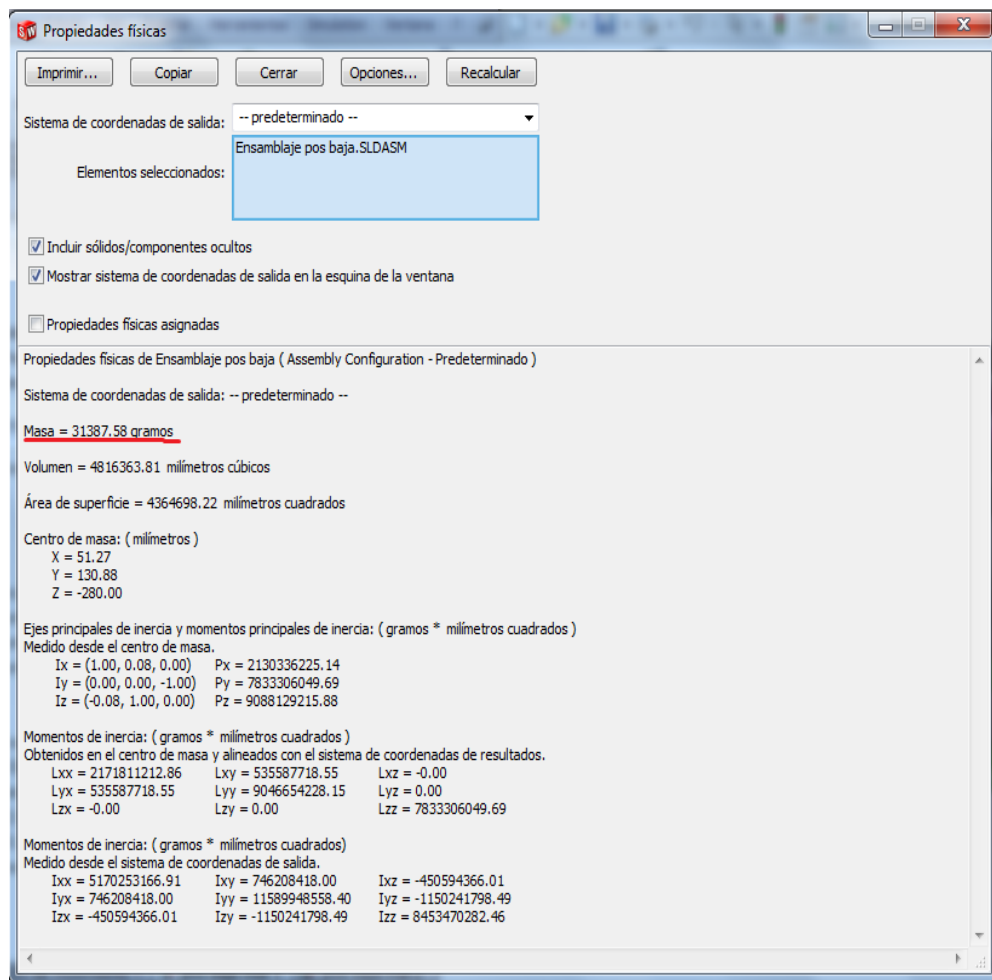


Imagen 47: Tabla de propiedades del ensamblaje.

Empezando con el peso de la estructura como ya habíamos dicho, podemos observar en la imagen que nos sale un peso total de la estructura 31.5 kg aproximadamente, dato que está muy bien ya que en principio teníamos pensado que una estructura de este tipo podía llegar a pesar entre 40 y 50 kg.

## Tensiones

Primeramente vamos a ver una captura de cómo han sido aplicadas las cargas en este ensamblaje y luego procederemos a analizar los diferentes diagramas anteriormente citados. Apuntar que en el siguiente ensamblajes la disposición de cargas y restricciones va a ser la misma por lo tanto sólo lo mostraremos una vez.

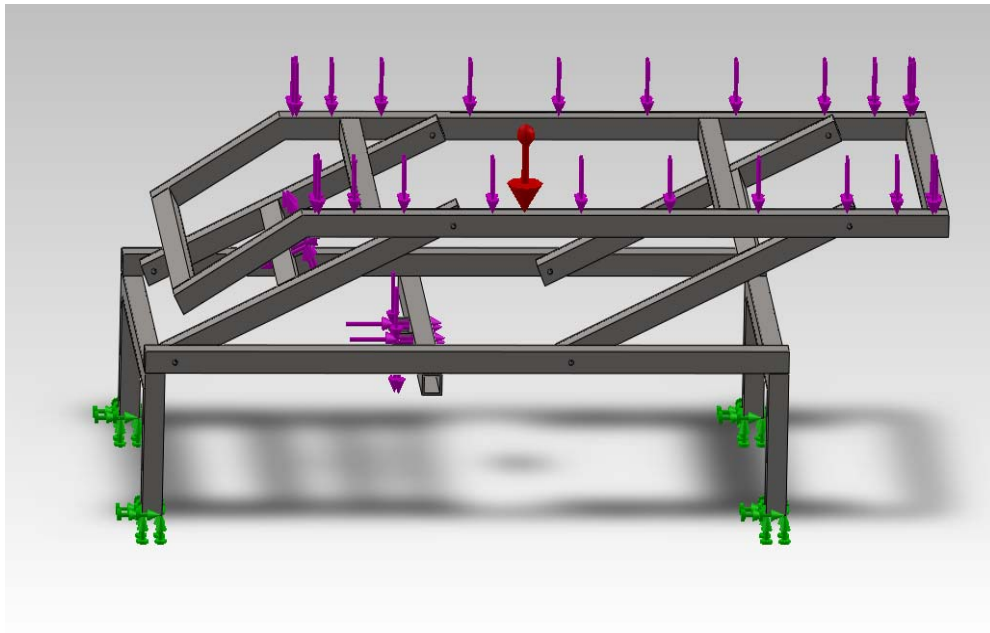
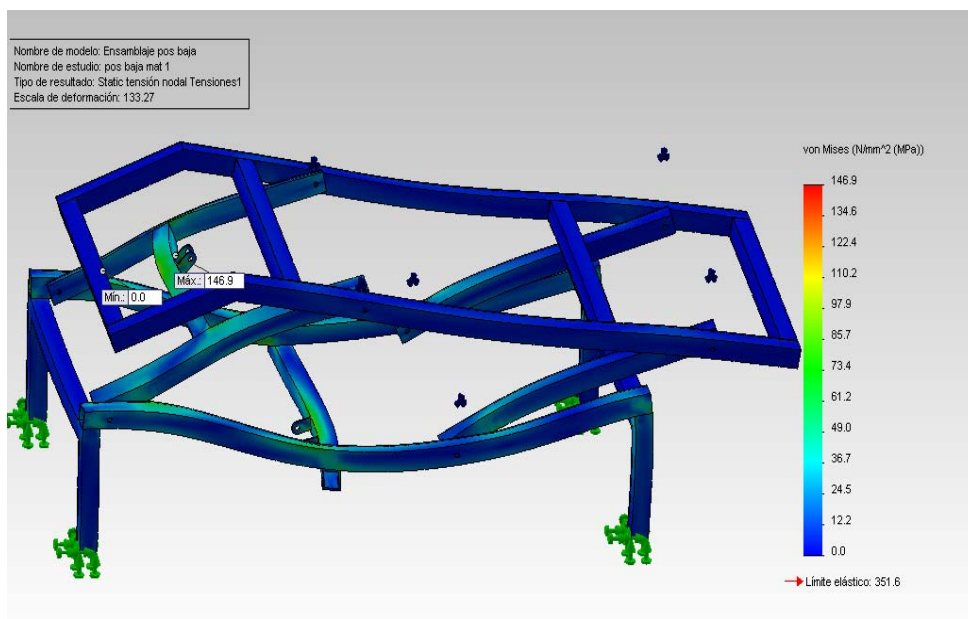


Imagen 48: Ensamblaje con las condiciones de apoyo y cargas.

Ahora vamos a ver el diagrama de tensiones.



Edición para educación. Sólo para uso en la enseñanza

Imagen 49: Diagrama de tensiones del ensamblaje.

Las tensiones en la camilla hidráulica vemos que son en su mayor parte muy bajas, de ahí su mayoría de tonalidad azul. En la zona donde está aplicada la fuerza del cilindro, barra anclaje inferior y superior de éste, observamos la mayor tensión de un valor de 146.9 MPa. A continuación veremos en la siguiente imagen este detalle.

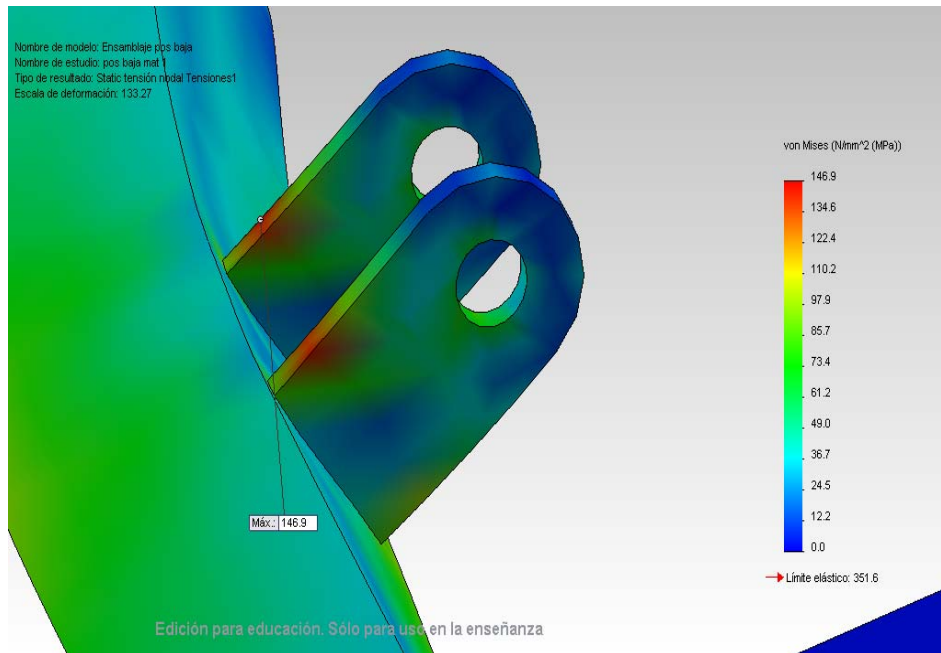


Imagen 50: Detalle de la zona con más tensión en el ensamblaje.

## Desplazamientos

Los desplazamientos de la camilla hidráulica son muy bajos en todo el ensamblaje, siendo la zona con mayores desplazamientos la barra inferior del anclaje del cilindro hidráulico y donde alcanzamos un valor máximo de 1.22 mm.

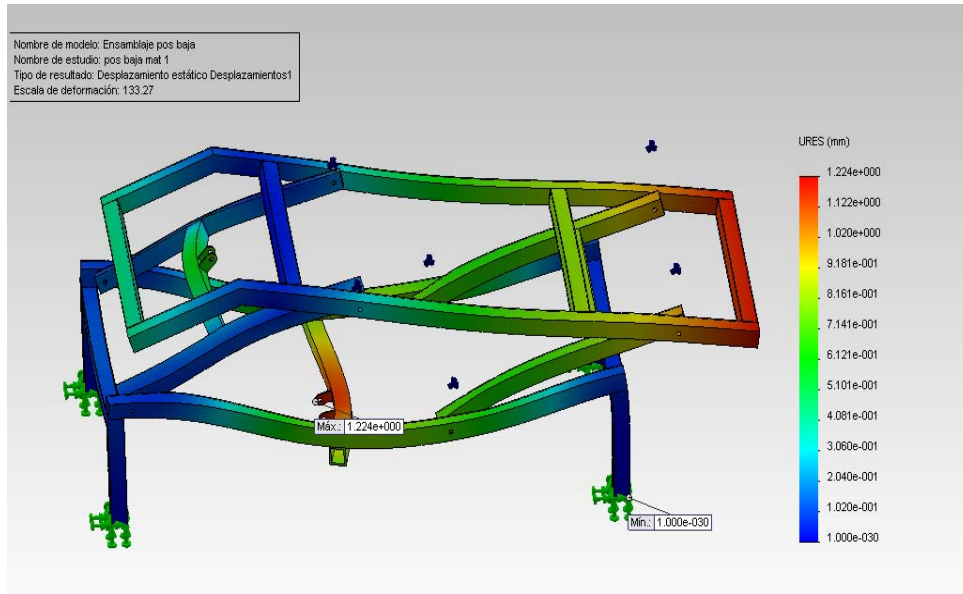
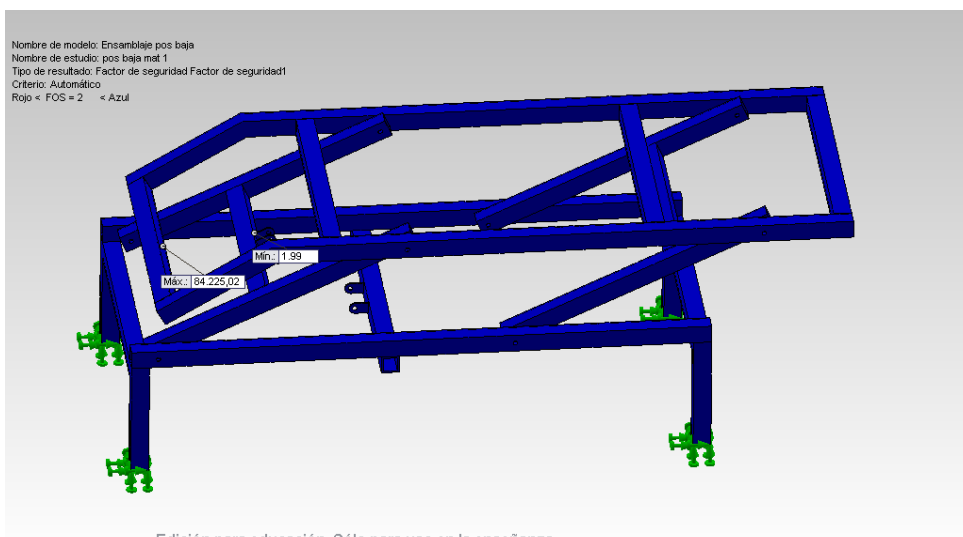


Imagen 51: Diagrama de desplazamientos en el ensamblaje.

## Coeficiente de seguridad

El coeficiente de seguridad de toda la estructura es muy elevado en todo el diagrama, aunque justo en la zona donde aplicamos la fuerza del cilindro hidráulico podemos ver que es un poco inferior,  $C_s = 1.99$ , y esto ocurre por lo explicado en el apartado 7.2.4 refiriéndonos a la parte de las orejetas.



Edición para educación. Sólo para uso en la enseñanza

Imagen 52: Coeficiente de seguridad del ensamblaje.

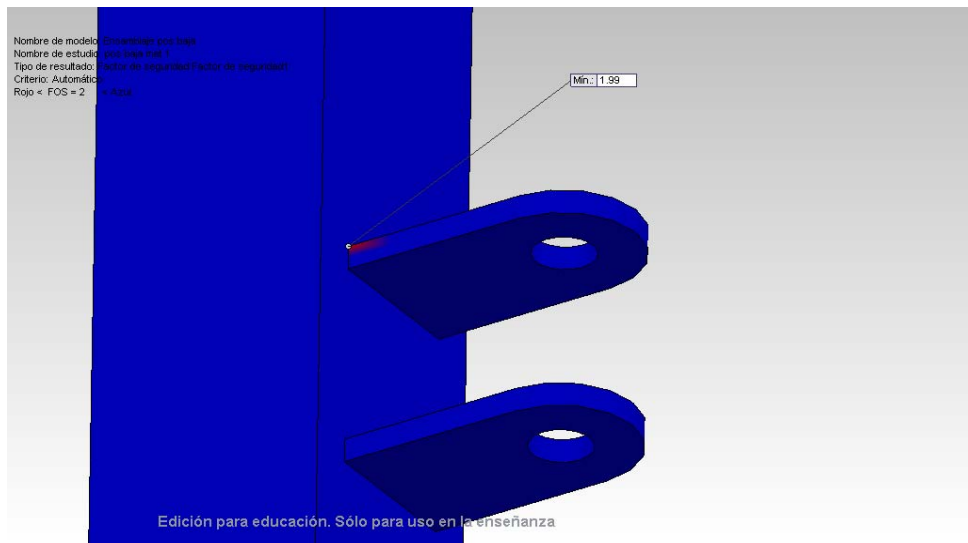


Imagen 53: Detalle coeficiente seguridad.

### Comprobación de pasadores

La comprobación de los pasadores que hemos utilizado en el ensamblaje de la estructura determina que todos los pasadores han sido dimensionados correctamente.

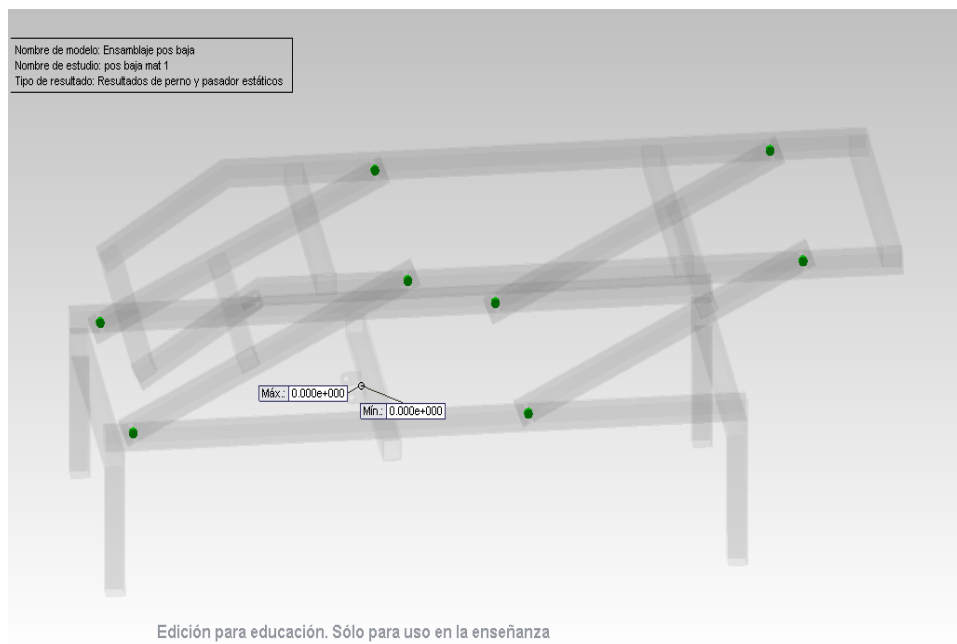


Imagen 54: Pasadores.

## 8.2.2.- Ensamblaje en macizo con Aleación de aluminio 2219 - T81

### Peso de la estructura

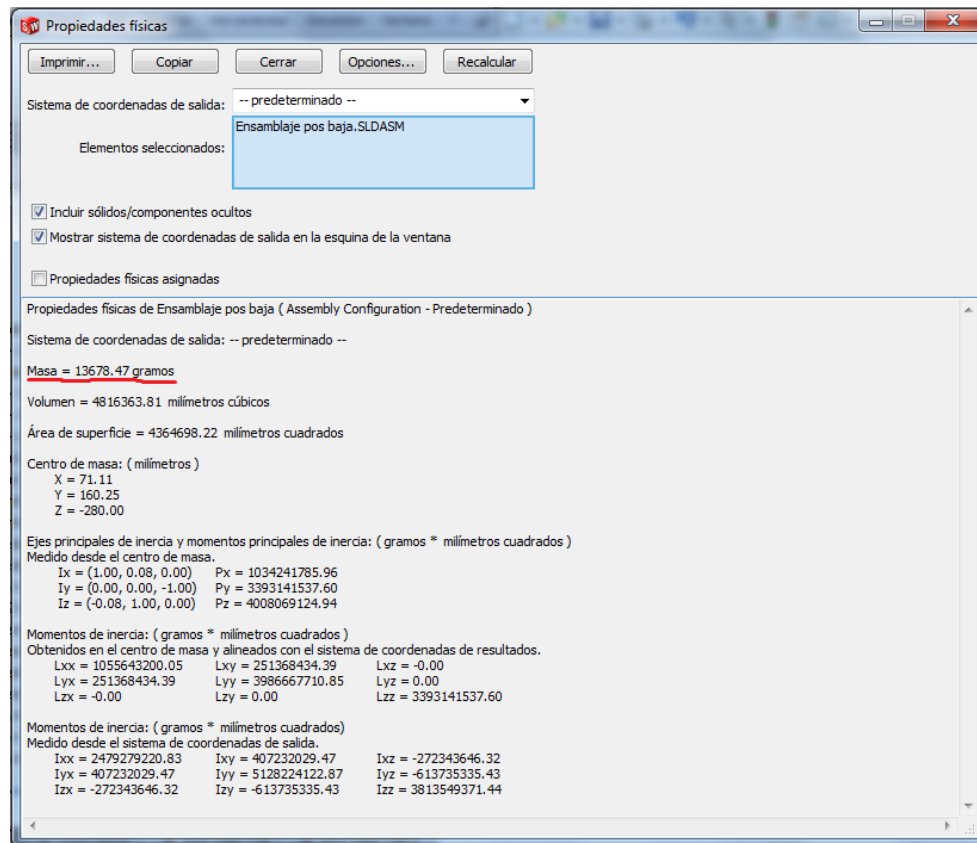


Imagen 55: Tabla de propiedades del ensamblaje.

Podemos observar en la imagen anterior que nos sale un peso total de la estructura 13.6 kg aproximadamente, dato que aparentemente es muy bajo y no sabemos cómo va a reaccionar la estructura cuando le apliquemos las cargas.

### Tensiones

Las tensiones en la camilla hidráulica vemos que son en su mayor parte muy bajas, de ahí su mayoría de tonalidad azul. En la zona donde está aplicada la fuerza del cilindro, barra de anclaje superior de éste, observamos la mayor tensión de un valor de 145.1 MPa. A continuación veremos dos imágenes para poder apreciar lo dicho.

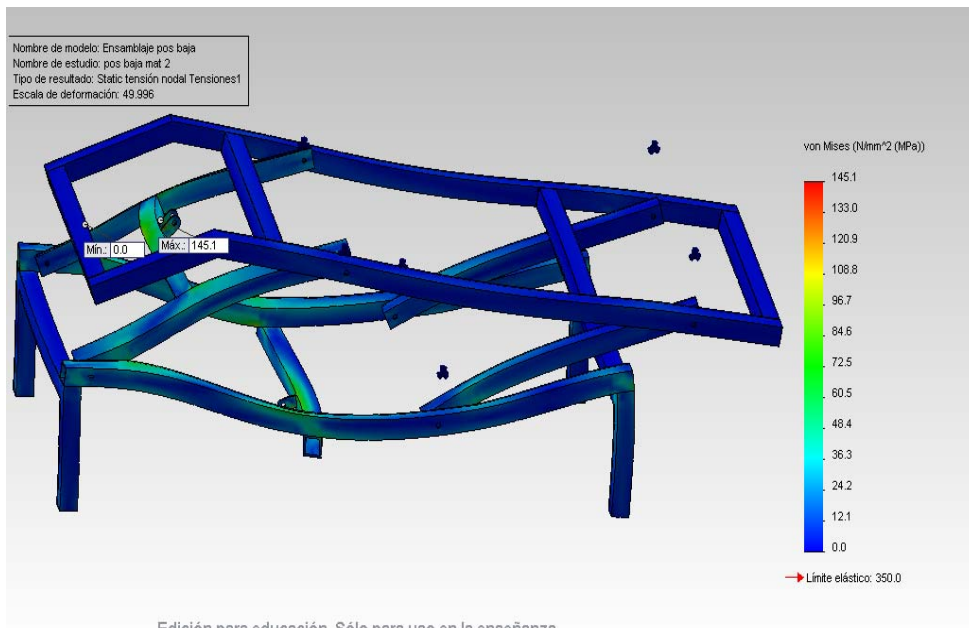


Imagen 56: Diagrama de tensiones del ensamblaje.

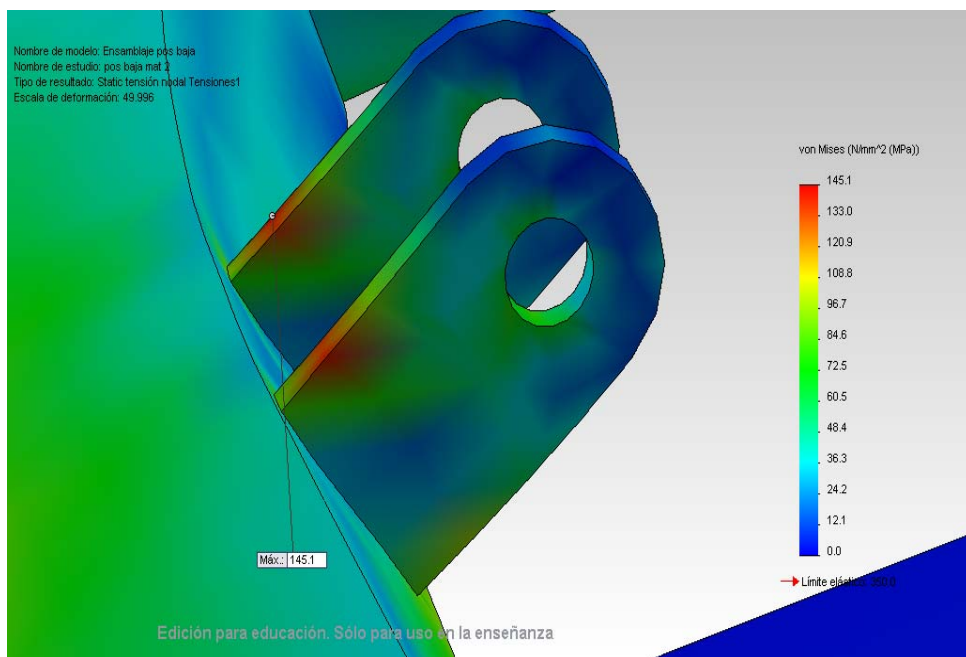


Imagen 57: Detalle de la zona con más tensión.



## Desplazamientos

Los desplazamientos de la camilla hidráulica son muy bajos en todo el ensamblaje, siendo la zona con mayores desplazamientos la barra inferior del anclaje del cilindro hidráulico y donde alcanzamos un valor máximo de 3.31 mm.

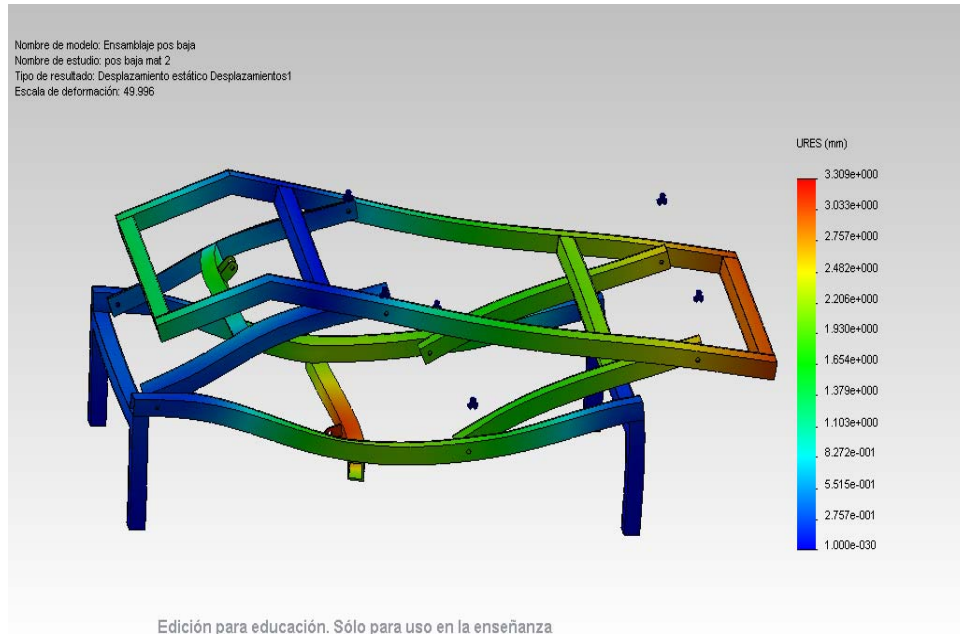


Imagen 58: Diagrama de desplazamientos.

## Coeficiente de seguridad

El coeficiente de seguridad de toda la estructura es muy elevado en todo el diagrama y no apreciamos ninguna zona en la que haya un coeficiente menor a 2.

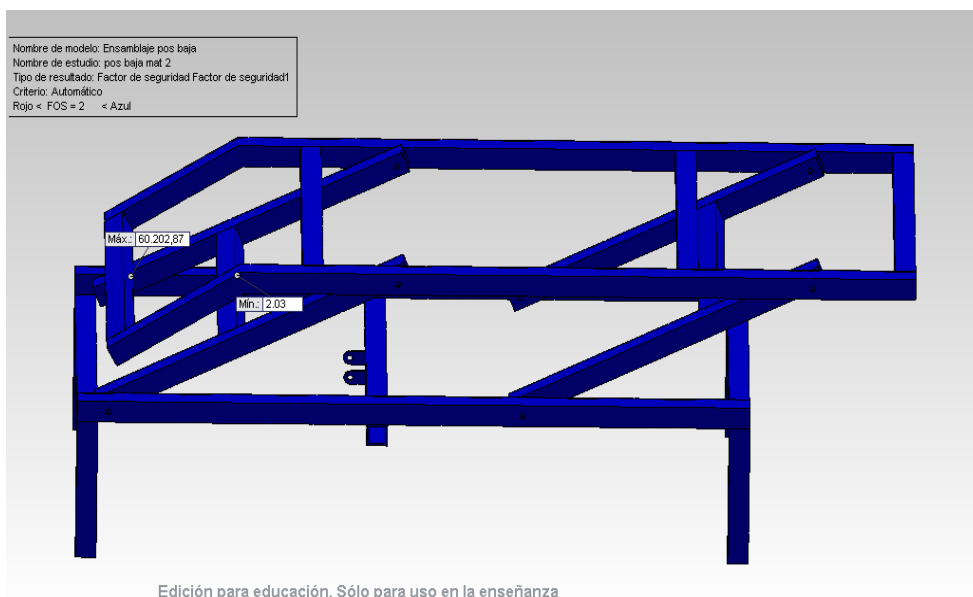


Imagen 59: Coeficiente de seguridad.



### Comprobación de pasadores

La comprobación de los pasadores que hemos utilizado en el ensamblaje de la estructura determina que todos los pasadores han sido dimensionados correctamente.

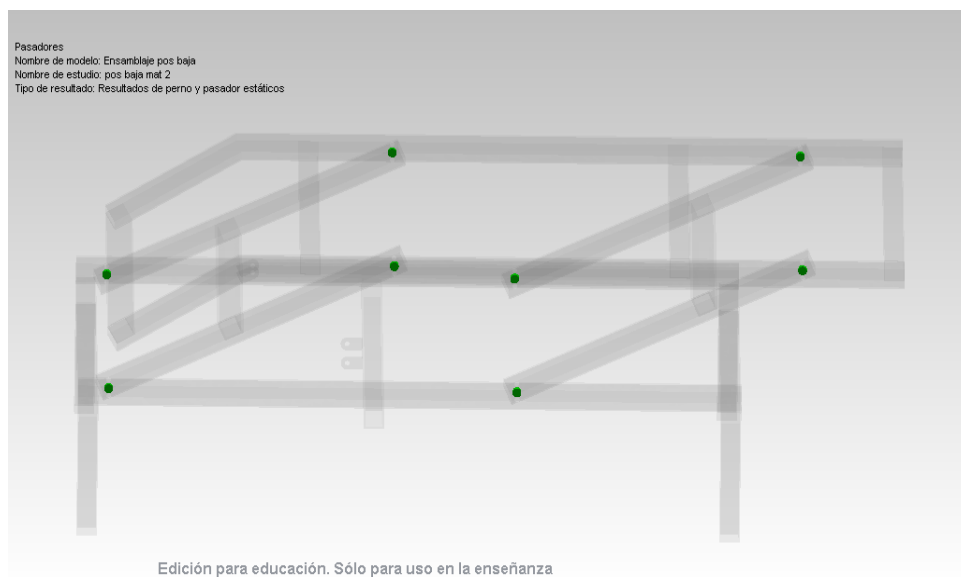


Imagen 60: Pasadores.

### 8.2.3.- Resumen de datos obtenidos en los ensamblajes

Tipo	Material	Tensiones (MPa)	Desplazamientos (mm)	Coef. Seg.	Peso (Kg)
Macizo	Acero AISI 1020	146.9	1.22	1.99	31.5
	Aluminio 2219 - T81	145.1	3.31	2.03	13.6

Comentando los resultados obtenidos para el estudio de los ensamblajes con distintos materiales podemos observar que la tensión más alta en la estructura es muy parecida, de un valor aproximadamente de 145 MPa, y esto se debe a que ambos tienen el límite elástico similar. Pasa lo mismo con el coeficiente de seguridad, son muy similares, alrededor de 2, ya que como acabamos de decir el límite elástico y la tensión son muy parecidos.

Además, podemos observar que el desplazamiento en el aluminio es un poco más del doble que en el acero, aunque estamos hablando de valores muy pequeños, en torno a 2 mm. Esto se debe a que el módulo elástico es mucho menor, más de la mitad, y por eso ocurre este hecho, aunque ya decimos que son valores muy pequeños para los desplazamientos.

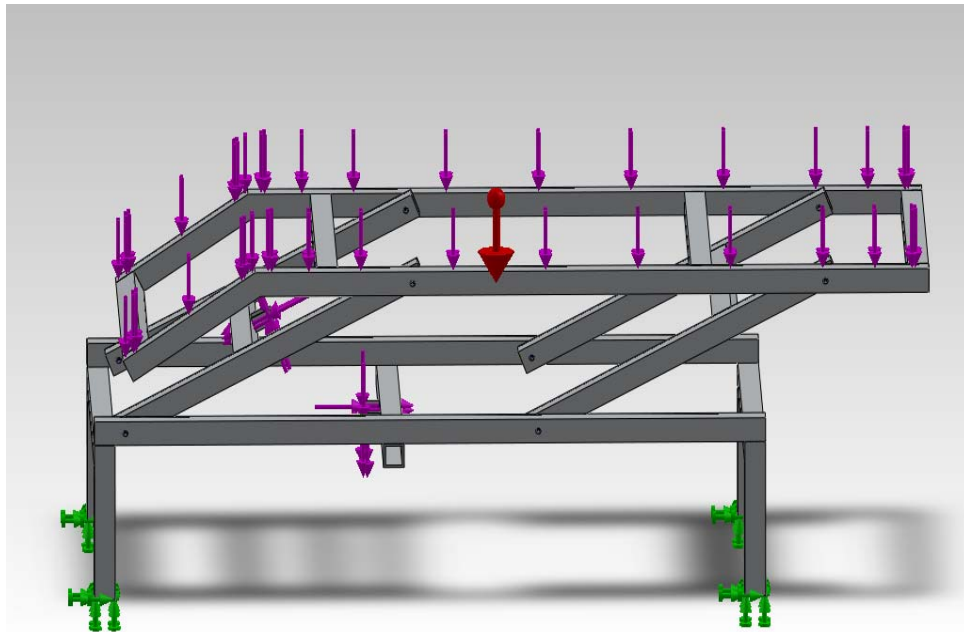
Por último, comparando los pesos de ambas estructuras, podemos observar que la estructura de acero pesa el doble que la de aluminio, 31.5 Kg frente a los 13.6 del aluminio, y esto se debe, a que, la densidad de masa del aluminio es mucho menor que la del acero.

Finalmente, para elegir de qué material construiríamos nuestra estructura, basándonos en lo expuesto anteriormente, podríamos elegir el aluminio ya que el peso de la estructura es mucho menor porque los otros datos son similares. Aunque si atendiéramos a otras cosas, como pueden ser el precio de la materia prima, etc. habría que estudiarlo más a fondo para poder decantarnos por uno u por otro.

#### **8.2.4.- Ensamblaje en macizo con Aleación de aluminio 2219 - T81 y con una carga aplicada en el extremo izquierdo de la plataforma**

En este apartado vamos a simular una estructura igual que la anterior, con la aleación de aluminio 2219 – T81 y en la posición más desfavorable, pero en la que añadiremos una carga de 400 N en la parte superior izquierda de la plataforma, parte inclinada de la barra superior.

A continuación podemos ver una captura de cómo han sido aplicadas las cargas citadas anteriormente.



*Imagen 61: Aplicación de cargas en la estructura.*

Así pues procederemos a analizar los cuatro aspectos más importantes de la estructura: tensiones, desplazamientos, coeficiente de seguridad y comprobación de pasadores; y siempre comparándolos con los datos del apartado anterior 8.2.3, ya que es nuestro punto de partida. Además el peso es el mismo al ser la misma estructura y tener el mismo material que en el apartado anterior, por lo tanto, en este aspecto no comentaremos nada más.

## Tensiones

Las tensiones en la camilla hidráulica vemos que son en su mayor parte muy bajas. En la zona donde está aplicada la fuerza del cilindro, barra de anclaje superior de éste, observamos la mayor tensión de un valor de 145.1 MPa. A continuación veremos dos imágenes para poder apreciarlo.

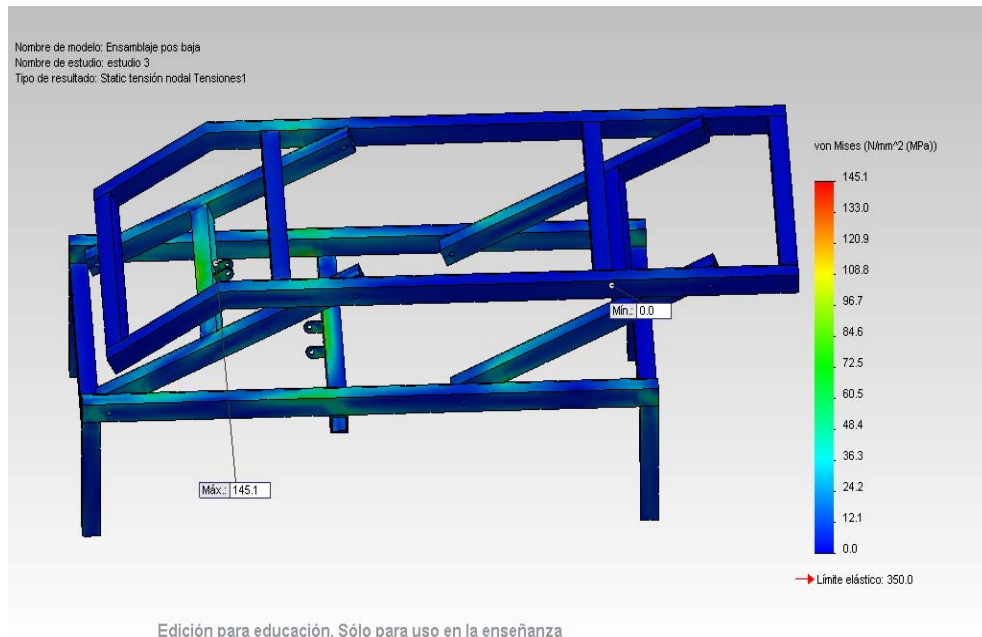


Imagen 62: Diagrama de tensiones.

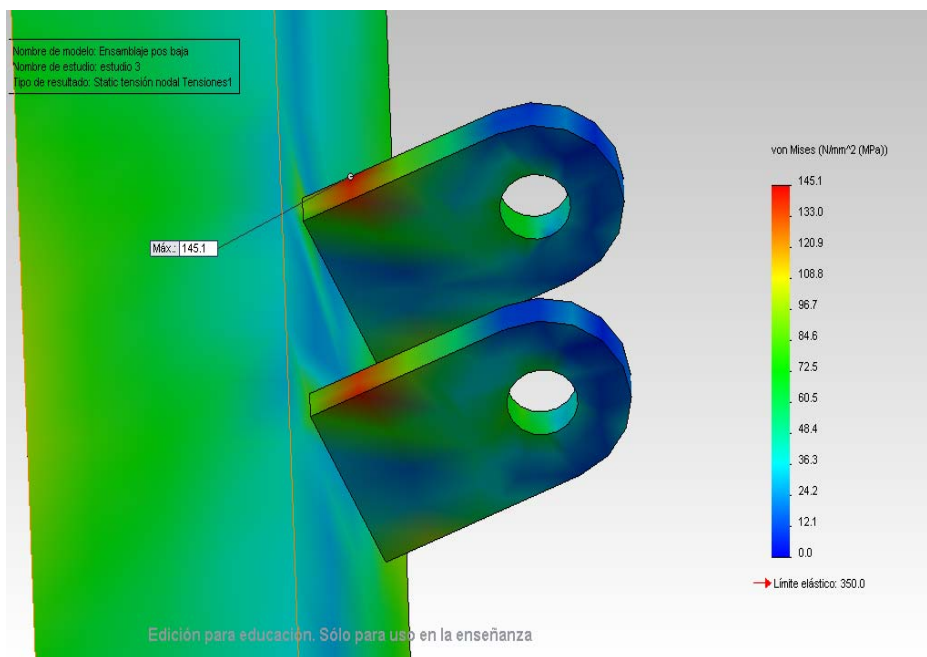


Imagen 63: Detalle de la tensión máxima.

Analizando la estructura, nos damos cuenta que los valores para la tensión no cambian absolutamente para nada con el modelo anterior. Esto ocurre porque en la zona donde hemos aplicado la carga de 400 N, no aparecen tensiones superiores a otras partes más solicitadas de la estructura, como son, por ejemplo, la barra del anclaje superior del cilindro hidráulico, que es donde tenemos la mayor tensión. Así pues, aunque en esa zona nos haya aumentado la tensión, para que se viera afectada la estructura y nos aparecieran otros puntos de mayor tensión habría que haber aplicado cargas mucho más altas.

### Desplazamientos

Los desplazamientos de la camilla hidráulica son muy bajos en todo el ensamblaje, siendo la zona con mayores desplazamientos la barra inferior del anclaje del cilindro hidráulico y donde alcanzamos un valor máximo de 3.62 mm.

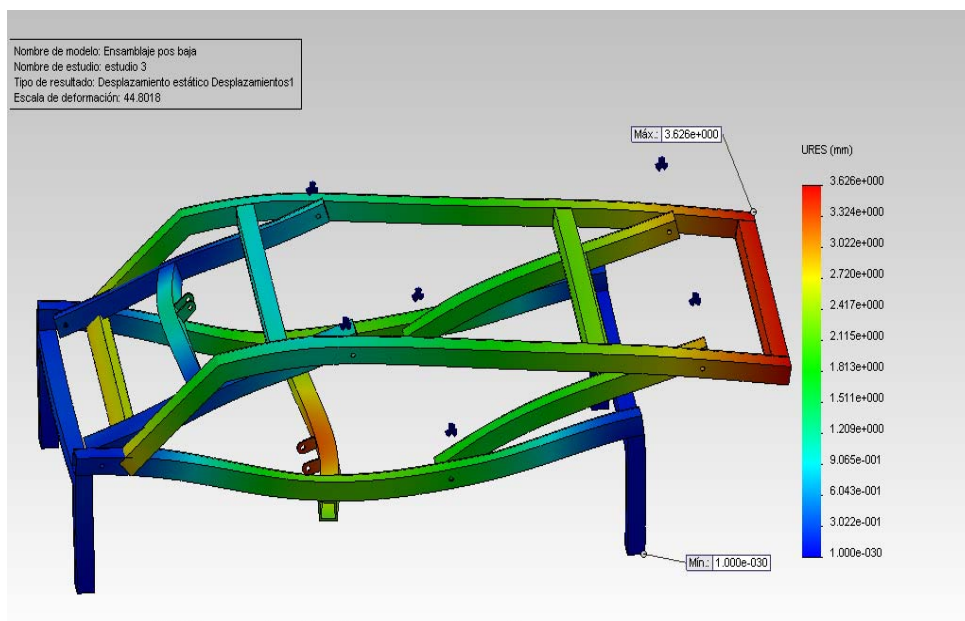


Imagen 64: Diagrama de desplazamientos.

Comparando estos datos con los del estudio anterior, podemos observar que el desplazamiento máximo ha aumentado muy poco, pero sí vemos que en la zona donde hemos aplicado la nueva carga, hay mucho más desplazamiento, cosa muy lógica al pasar de no tener nada a tener una carga aplicada en esa zona.

### Coeficiente de seguridad

El coeficiente de seguridad de toda la estructura es muy elevado y no apreciamos ninguna zona que nos de problemas, ya que el menor coeficiente de seguridad que vemos tiene un valor de 2.03. Y comparando esta imagen con la del estudio anterior podemos ver que en este aspecto no hay muchas diferencias, lo único que se puede decir es que el valor máximo ha pasado de ser 60.2 a 21.7.

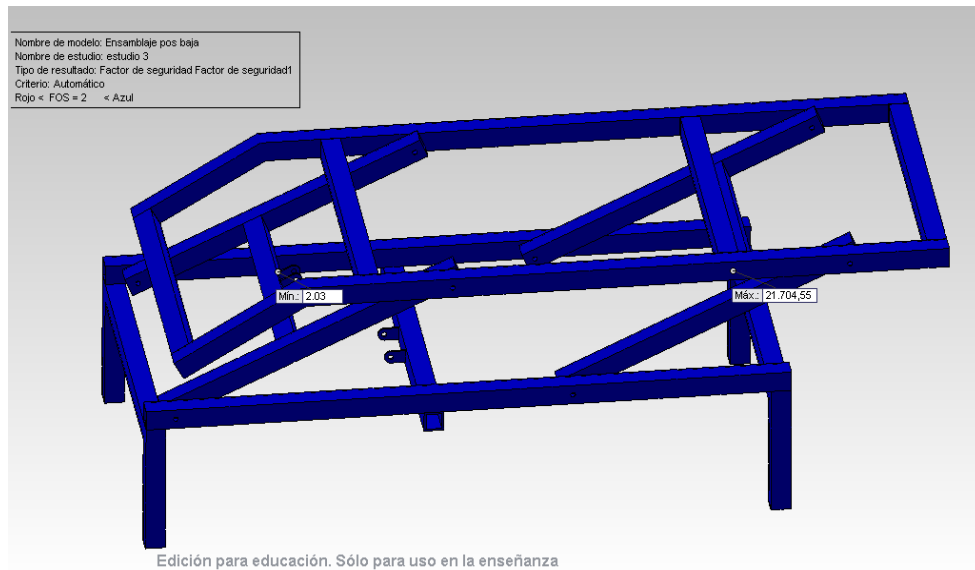


Imagen 65: Coeficiente de seguridad.

### Comprobación de pasadores

La comprobación de pasadores que hemos utilizado en el ensamblaje de la estructura determina que todos los pasadores han sido dimensionados correctamente a pesar de haber aumentado la carga en una parte concreta de la estructura.

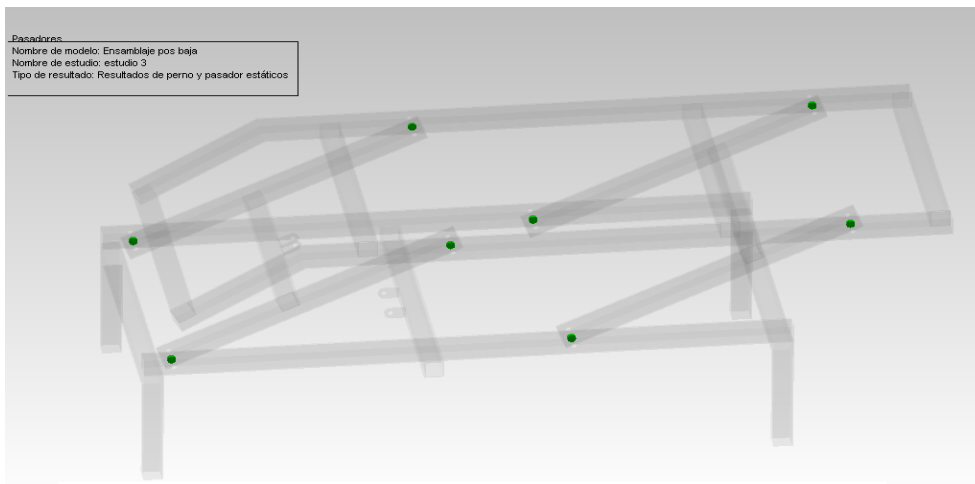


Imagen 66: Comprobación de pasadores.

### 8.2.5.- Ensamblaje en macizo con Aleación de aluminio 2219 - T81 y con la carga aplicada en una zona determinada

En este apartado vamos a simular una estructura igual que la del apartado 8.2.2, con la aleación de aluminio 2219 – T81 y en la posición más desfavorable, pero ahora la carga de 975 N estará aplicada solamente en la parte derecha de la plataforma como veremos a continuación.

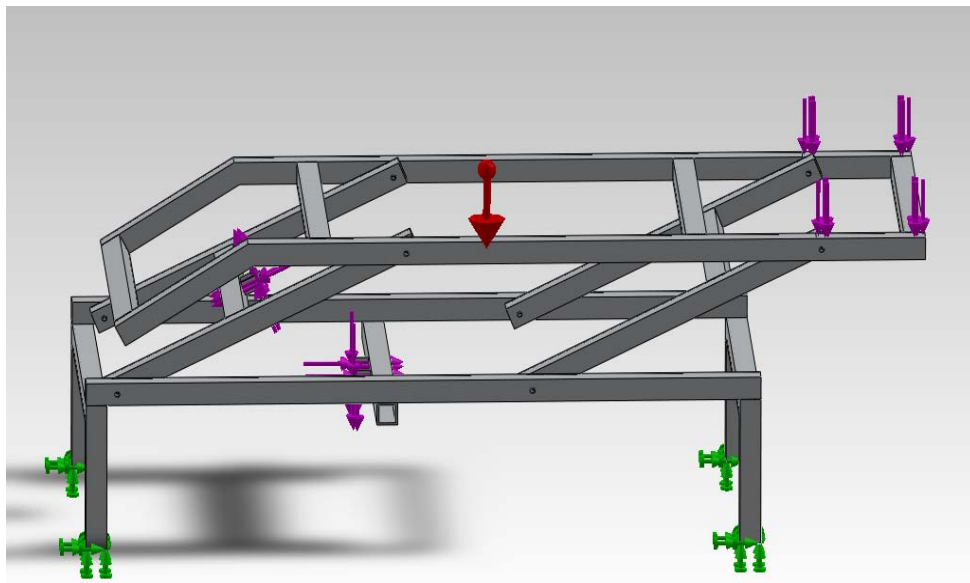
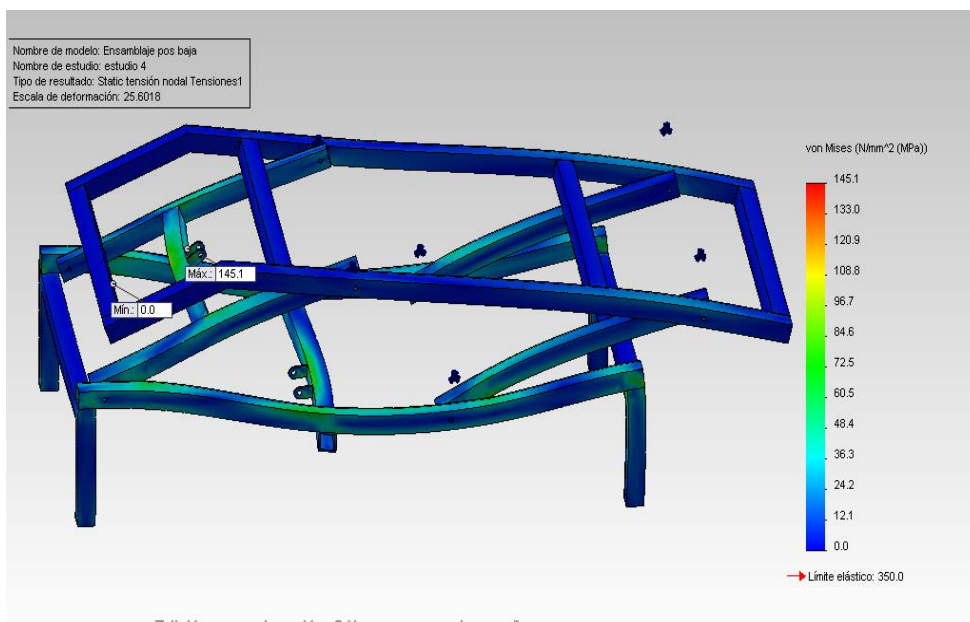


Imagen 67: Aplicación de cargas en la estructura.

### Tensiones



Edición para educación. Sólo para uso en la enseñanza

Imagen 68: Diagrama de tensiones de la estructura.



Como podemos observar, nos vuelve a pasar lo mismo que en el anterior ensamblaje, la tensión máxima se encuentra en la barra del anclaje superior y tiene un valor de 145.1 MPa, ya que a pesar de cambiar el punto de aplicación de la carga, no nos genera grandes cambios en las tensiones de la estructura y por lo tanto el punto máximo vuelve a estar en la misma zona.

## Desplazamientos

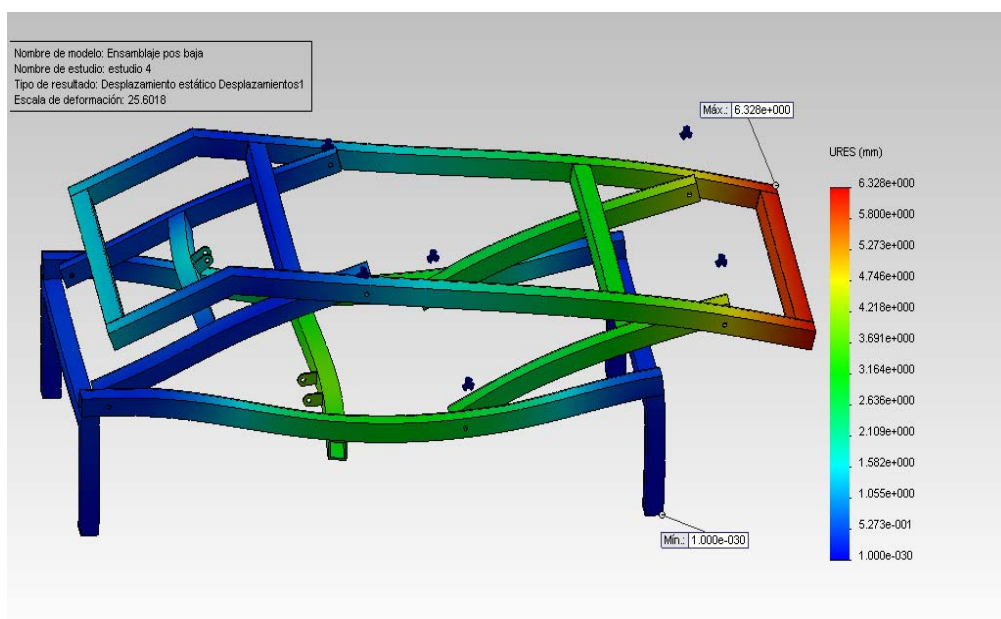


Imagen 69: Diagrama de desplazamientos de la estructura.

Podemos ver que el desplazamiento máximo es de 6.32 mm y se da en la zona donde hemos aplicado la carga. Comparándolo con el diagrama del que tomamos de partida, podemos observar dos cosas muy significativas. Primero, que el desplazamiento se ha duplicado, ha pasado de ser 3.31 mm a 6.32 mm, y segundo, que toda la parte izquierda de la estructura tenga ahora mucho menor desplazamiento, como son la barra del anclaje del cilindro inferior, que antes nos salía con un color rojo indicando que era una de las zonas con mayor desplazamiento, o la parte de la plataforma superior izquierda, que antes nos salía con un color verdoso amarillo, indicándonos también que era una zona con más desplazamiento, y como ahora podemos ver, esas dos partes de la estructura nos aparecen con sendos colores verdosos y azulados indicando mucho menor desplazamiento del que había anteriormente.



### Coeficiente de seguridad

El coeficiente de seguridad de toda la estructura es muy elevado, ya que el menor coeficiente de seguridad que vemos tiene un valor de 2.03. Y comparando esta imagen con la del estudio de partida, podemos destacar que el valor máximo ha pasado de ser 60.2 a 29.8.

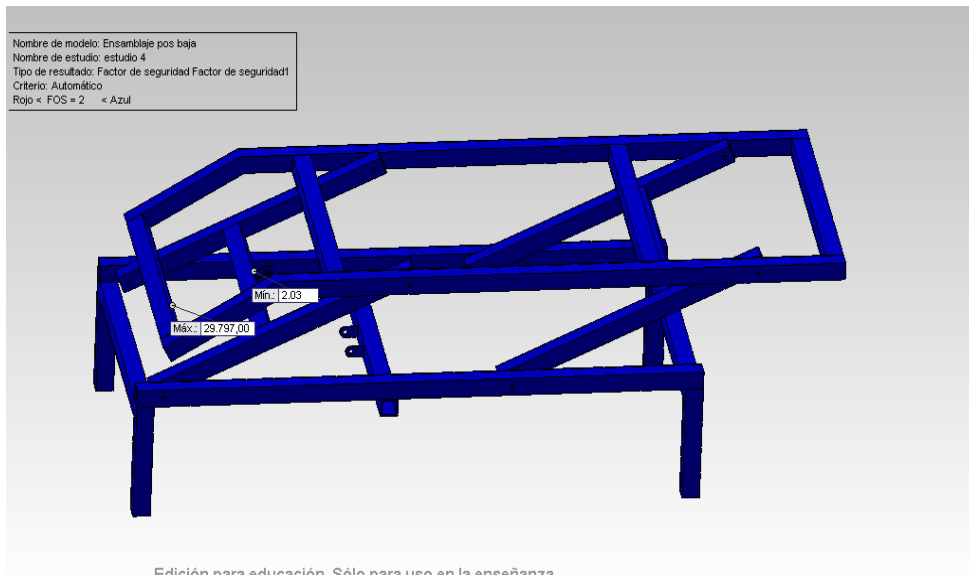


Imagen 70: Coeficiente de seguridad.

### Comprobación de pasadores

La comprobación de pasadores que hemos utilizado en el ensamblaje de la estructura determina que todos los pasadores han sido dimensionados correctamente aunque hayamos cambiado la posición de la aplicación de la carga.

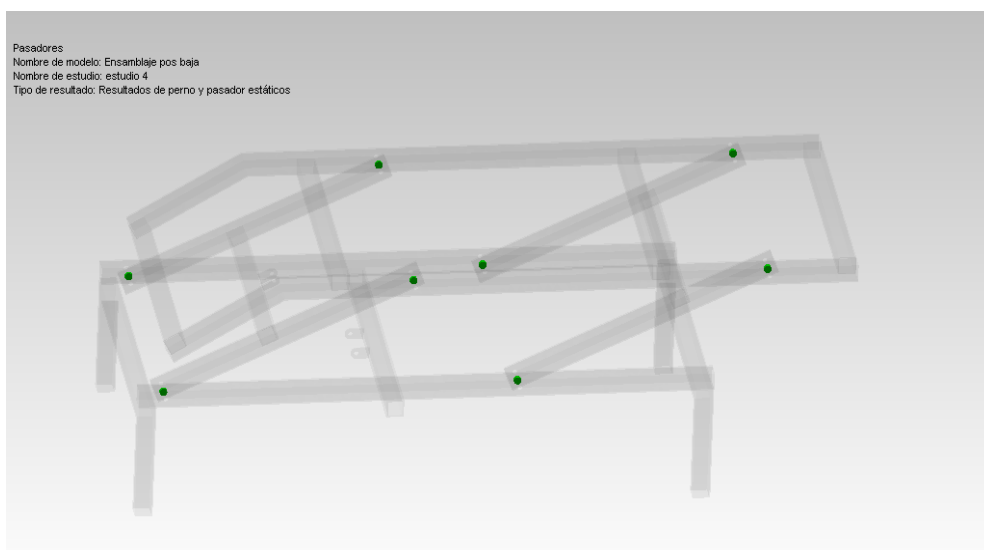


Imagen 71: Comprobación de pasadores.

## 9.- Conclusiones

Recordando los objetivos de nuestro proyecto que son:

1.- Integración de SolidWorks como herramienta de CAD / CAE

2.- Diseño de una camilla hidráulica a partir de una camilla de similares características alojada en el edificio BIFI (Instituto de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos) situado detrás del Edificio Torres Quevedo de la cual obtendremos los planos y la información necesaria.

Podemos llegar a la conclusión de que hemos cumplido los objetivos que nos habíamos marcado antes de empezar a realizar este proyecto. Hemos utilizado el programa SolidWorks para diseñar todas las piezas y su aplicación SolidWorks Simulation, una vez hecho los cálculos analíticos, para comprobar que éstos eran correctos. Una vez conseguida esta última parte procedimos a realizar el ensamblaje de todas las piezas para conseguir ver de qué manera funcionaba éste y poder hacer un estudio completo con varias hipótesis distintas.

En definitiva, las herramientas CAD / CAE en el proceso de diseño mecánico son de gran ayuda para el diseño, la comprensión del funcionamiento y los cálculos. Además, pueden ser un complemento muy útil en la enseñanza ya que los ejemplos visuales facilitan mucho las cosas en la asimilación de conceptos.

Por lo tanto, después de todo lo anterior citado, podemos finalizar diciendo que hemos sido capaces de hacer un proyecto de diseño de una camilla hidráulica pudiendo garantizar su correcto funcionamiento.

## 10.- Bibliografía

### Internet

[www.solidworks.es](http://www.solidworks.es)

[www.efisioterapia.net](http://www.efisioterapia.net)

[www.mobercas.com](http://www.mobercas.com)

[www.kmillas.com](http://www.kmillas.com)

[www.constructalia.com](http://www.constructalia.com)

[www.kitres.com](http://www.kitres.com)

[www.automacion.com.ar](http://www.automacion.com.ar)

### Libros

- “Ingeniería de materiales para industria y construcción”

Jesús Martín San José, María Antonieta Madre Sediles y José Manuel Franco

- Análisis de piezas y ensamblajes asistidos por ordenador

Paula Canalís Martínez

- Apuntes de la asignatura de Diseño de Máquinas

Paula Canalís Martínez y Javier Abad Blasco

## 11.- Anexos

### Anexo 1

Diámetro exterior	Espesor	Masa por unidad de longitud	Área de la sección transversal	Momento de inercia de flexión	Radio de giro	Módulo de flexión elástico	Módulo de flexión plástico	Momento de inercia de torsión	Módulo de torsión	Área superficial por metro lineal	Longitud nominal por tonelada
D	T	M	A	I	i	$W_{el}$	$W_{pl}$	$I_t$	$C_t$	$A_s$	m
mm	mm	kg/m	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	m <sup>2</sup> /m	
20	2.0	1.05	1.34	0.692	0.720	0.692	0.877	1.21	1.06	0.0731	953
	2.0	1.36	1.74	1.48	0.924	1.19	1.47	2.53	1.80	0.0931	733
25	2.5	1.64	2.09	1.69	0.89	1.35	1.71	2.97	2.07	0.0914	610
	3.0	1.89	2.41	1.84	0.874	1.47	1.91	3.33	2.27	0.0897	529
	2.0	1.68	2.14	2.72	1.13	1.81	2.21	4.54	2.75	0.113	596
30	2.5	2.03	2.59	3.16	1.10	2.10	2.61	5.40	3.20	0.111	492
	3.0	2.36	3.01	3.50	1.08	2.34	2.96	6.15	3.58	0.110	423
	2.0	2.31	2.94	6.94	1.54	3.47	4.13	11.3	5.23	0.153	434
40	2.5	2.82	3.59	8.22	1.51	4.11	4.97	13.6	6.21	0.151	355
	3.0	3.30	4.21	9.32	1.49	4.66	5.72	15.8	7.07	0.150	303
	4.0	4.20	5.35	11.1	1.44	5.54	7.01	19.4	8.48	0.146	238
	2.0	2.93	3.74	14.1	1.95	5.66	6.66	22.6	8.51	0.193	341
50	2.5	3.60	4.59	16.9	1.92	6.78	8.07	27.5	10.2	0.191	278
	3.0	4.25	5.41	19.5	1.90	7.79	9.39	32.1	11.8	0.190	236
	4.0	5.45	6.95	23.7	1.85	9.49	11.7	40.4	14.4	0.186	183
	5.0	6.56	8.36	27.0	1.80	10.8	13.7	47.5	16.6	0.183	152
	2.0	3.56	4.54	25.1	2.35	8.38	9.79	39.8	12.6	0.233	281
60	2.5	4.39	5.59	30.3	2.33	10.1	11.9	48.7	15.2	0.231	228
	3.0	5.19	6.61	35.1	2.31	11.7	14.0	57.1	17.7	0.230	193
	4.0	6.71	8.55	43.6	2.26	14.5	17.6	72.6	22.0	0.226	149
	5.0	8.13	10.4	50.5	2.21	16.8	20.9	86.4	25.6	0.223	123
	6.0	9.45	12.0	56.1	2.16	18.7	23.7	98.4	28.6	0.219	106
	6.3	9.55	12.2	54.4	2.11	18.1	23.4	100	28.8	0.213	105
70	2.5	5.17	6.59	49.4	2.74	14.1	16.5	78.5	21.2	0.271	193
	3.0	6.13	7.81	57.5	2.71	16.4	19.4	92.4	24.7	0.270	163
	4.0	7.97	10.1	72.1	2.67	20.6	24.8	119	31.1	0.266	126
	5.0	9.70	12.4	84.6	2.62	24.2	29.6	142	36.7	0.263	103
	6.0	11.3	14.4	95.2	2.57	27.2	33.8	163	41.4	0.259	88.3
	6.3	11.5	14.7	93.8	2.53	26.8	33.8	168	42.1	0.253	86.7
80	3.0	7.07	9.01	87.8	3.12	22.0	25.8	140	33.0	0.310	141
	4.0	9.22	11.7	111	3.07	27.8	33.1	180	41.8	0.306	108
	5.0	11.3	14.4	131	3.03	32.9	39.7	218	49.7	0.303	88.7
	6.0	13.2	16.8	149	2.98	37.3	45.8	252	56.6	0.299	75.7
	6.3	13.5	17.2	149	2.94	37.1	46.1	261	57.9	0.293	74.0
	8.0	16.4	20.8	168	2.84	42.1	53.9	307	66.6	0.286	61.1
90	3.0	8.01	10.2	127	3.53	28.3	33.0	201	42.5	0.350	125
	4.0	10.5	13.3	162	3.48	36.0	42.6	261	54.2	0.346	95.4
	5.0	12.8	16.4	193	3.43	42.9	51.4	316	64.7	0.343	77.9
	6.0	15.1	19.2	220	3.39	49.0	59.5	368	74.2	0.339	66.2
	6.3	15.5	19.7	221	3.35	49.1	60.3	382	76.2	0.333	64.6
	8.0	18.9	24.0	255	3.25	56.6	71.3	456	88.8	0.326	53.0
100	3.0	8.96	11.4	177	3.94	35.4	41.2	279	53.2	0.390	112
	4.0	11.7	14.9	26	3.89	45.3	53.3	362	68.1	0.386	85.2
	5.0	14.4	18.4	271	3.84	54.2	64.6	441	81.7	0.383	69.4
	6.0	17.0	21.6	311	3.79	62.3	75.1	514	94.1	0.379	58.9
	6.3	17.5	22.2	314	3.76	62.8	76.4	536	97.0	0.373	57.3
	8.0	21.4	27.2	366	3.67	73.2	91.1	645	114	0.366	46.8
	10.0	25.6	32.6	411	3.55	82.2	105	750	130	0.357	39.1
	12.0	28.3	36.1	408	3.36	81.6	110	794	136	0.338	35.3
	12.5	29.1	37.0	410	3.33	82.1	111	804	137	0.336	34.4
120	3.0	10.8	13.8	312	4.76	52.1	60.2	488	78.2	0.470	92.3
	4.0	14.2	18.1	402	4.71	67.0	78.3	637	101	0.466	70.2
	5.0	17.5	22.4	485	4.66	80.9	95.4	778	122	0.463	57.0
	6.0	20.7	26.4	562	4.61	93.7	112	913	141	0.459	48.2
	6.3	21.4	27.3	572	4.58	95.3	114	955	146	0.453	46.7
	8.0	26.4	33.6	677	4.49	113	138	1163	175	0.446	37.9
	10.0	31.8	40.6	777	4.38	129	162	1376	203	0.437	31.4
	12.0	35.8	45.7	806	4.20	134	174	1518	219	0.418	27.9
	12.5	36.9	47.0	817	4.17	136	178	1551	223	0.416	27.1
140	4.0	16.8	21.3	652	5.52	93.1	108	1023	140	0.546	59.7
	5.0	20.7	26.4	791	5.48	113	132	1256	170	0.543	48.3
	6.0	24.5	31.2	920	5.43	131	155	1479	198	0.539	40.8
	6.3	25.4	32.3	941	5.39	134	160	1550	205	0.533	39.4
	8.0	31.4	40.0	1127	5.30	161	194	1901	248	0.526	31.8
	10.0	38.1	48.6	1312	5.20	187	230	2274	291	0.517	26.2
	12.0	43.4	55.3	1398	5.03	200	253	2567	322	0.496	23.1