



Universidad
Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO

Título del trabajo:

Diseño y optimización de una
grada de discos

Title of the work:

Design and optimization of a
Disc Harrow

Autor/es:
Melquiades Royo Abadía

Tutor/es:
Hugo Malón Litago

Escuela de Ingeniería y arquitectura/ Universidad
de Zaragoza – diciembre 2022

RESUMEN

El presente trabajo, con título ***“Diseño y optimización de una grada de discos”*** tiene la finalidad de analizar el comportamiento que tiene una grada de discos cuando está labrando, y a partir de ahí, ver sus puntos críticos.

Este estudio está solicitado por la empresa Melquiades Royo S.L, la cual está comenzando a fabricar este tipo de máquinas de cara al público, y ha colaborado en todo momento a la hora de facilitar todo el material necesario, así como recomendaciones, las cuales han simplificado el trabajo.

El programa con el que se va a recrear la máquina en su totalidad es SolidWorks, que permitirá detallar la máquina en todos sus aspectos: longitudes, materiales, uniones, relaciones de posición... y que proporcionará una gran cantidad de datos, como propiedades físicas (centro de masas, peso, inercias...) los cuales van a ser muy importantes para el desarrollo del modelo.

Una vez realizado, la máquina se dividirá en dos partes, que serán los dos casos que se vayan a analizar por separado: el chasis/bastidor y el rodillo.

En cada uno de los casos, habrá que imponer una serie de parámetros, como son condiciones de contorno y fuerzas unitarias, las cuales están normalizadas y que habrá que calcular.

Para el caso del chasis, se comenzará por empotrar las zonas en las que va enganchada la máquina al tractor (tripuntal y tercer punto). Además, los discos van a apoyar en el suelo, por lo que se tendrá una reacción vertical. Estas serán las condiciones de contorno.

En cuanto a fuerzas, habrá que calcular la fuerza unitaria que va a cada uno de los discos, transmitida al eje. Mientras, en las crestas, que son las piezas en las donde se une el chasis con las barras del rodillo, se transmitirán unas reacciones, cuyos valores se tendrán que definir.

Una vez se tenga todo el modelo completo, se procederá a realizar el análisis estático, y con ello, la obtención de diferentes valores de tensiones y desplazamientos.

Para el caso del rodillo, las condiciones de contorno serán unos empotramientos en los agujeros de las barras que van al chasis, y un apoyo vertical en el rulo.

En lo que respecta a fuerzas, el suelo ejercerá otra fuerza unitaria, pero esta vez a las varillas del rulo, de distinto valor al de los discos.

Con todo esto, se volverán a obtener tensiones y desplazamientos, además de las reacciones que se producen en el empotramiento, y que serán llevadas al chasis, cumpliendo así con la tercera ley de Newton.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETO	6
3. ALCANCE.....	7
4. ANÁLISIS NUMÉRICO.....	8
4.1 MODELO NUMÉRICO INICIAL	8
4.2 MATERIALES	11
4.3 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD	12
4.4 SECCIÓN 1 - CHASIS – BASTIDOR.....	13
4.5 SECCIÓN 2 - RODILLO	15
5. RESULTADOS	16
5.1 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD	17
5.2 SECCIÓN 1 – CHASIS/BASTIDOR	19
ANÁLISIS DE CURVATURA.....	19
ANÁLISIS DE CURVATURA COMBINADO	20
5.3. SECCIÓN 2 - RODILLO	24
ANÁLISIS EN CURVATURA.....	24
ANÁLISIS EN CURVATURA COMBINADO	25
6. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.....	27
6.1 SECCIÓN 1 – CHASIS/BASTIDOR	27
6.2 SECCIÓN 2 – RODILLO.....	31
7. CONCLUSIONES	32
8. REFERENCIAS	33
ANEXO A: GEOMETRÍA DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DE LOS MODELOS.....	35
A.1 SECCIÓN 1 - BASTIDOR-CHASIS	36
A.2. SECCIÓN 2 – RODILLO	41
ANEXO B: ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA Y DISCRETIZACIÓN	45
ANEXO C: FUERZAS.....	48
ANEXO D: RESULTADOS	51
D.1 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD.....	53
ANÁLISIS ESTÁTICO EN CURVATURA.....	53

Diseño y optimización de una grada de discos

ANÁLISIS EN CURVATURA COMBINADO	59
D.2. SECCIÓN 1 – CHASIS/BASTIDOR.....	65
ANÁLISIS EN CURVATURA.....	65
ANÁLISIS EN CURVATURA COMBINADO	67
D.2 SECCIÓN 2 – RODILLO	68
ANÁLISIS EN CURVATURA.....	68
ANÁLISIS EN CURVATURA COMBINADO	69
ANEXO E: RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE TENSIONES Y DESPLAZAMIENTOS DE TODOS LOS COMPONENTES QUE FORMAN LA GRADA DE DISCOS	70
E.2 SECCIÓN 1 – CHASIS/BASTIDOR	70
ANÁLISIS EN CURVATURA DEL CHASIS	70
ANÁLISIS EN CURVATURA COMBINADO DEL CHASIS.....	84
E.3 SECCIÓN 2 – RODILLO.....	99
ANÁLISIS EN CURVATURA RODILLO	99
ANÁLISIS EN CURVATURA COMBINADO RODILLO	105
ANEXO F: PROCESO DE OPTIMIZACIÓN	111
F.1. SECCIÓN 1 – CHASIS/BASTIDOR	112
F.2 SECCIÓN 2 - RODILLO	119

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la grada de discos es una de las máquinas más frecuentes en el laboreo de la tierra en nuestro país.

En Aragón, su uso es muy común, especialmente en los Monegros o las bajas Cinco Villas.

En el primer caso, se debe a sus escasas precipitaciones, lo que hace que no se gaste mucho dinero para la serie de cosechas que hay.

En el segundo caso, las grandes extensiones de regadío con las que cuenta hacen que se gane mucho tiempo en el laboreo, en las que se buscan romper unos pocos centímetros la tierra para inmediatamente hacer la siembra directa.

Fuera de ella, y por estas mismas razones, la podemos ver frecuentemente en la Comunidad de Madrid, norte de Castilla y León, Lérida o zonas andaluzas, como pueden ser Córdoba.

Estas máquinas se componen de dos elementos principales, que son:

- Un chasis, que será la estructura principal de la máquina, donde se alojen los discos.
- Un rodillo, el cual se engancha al chasis, y se encarga de envolver la tierra una vez ha sido rota por el paso de los discos.

Como en todo tipo de máquinas, hay muchas variantes de cada una de ellas, pero la estructura sigue siendo básicamente la misma. En nuestro caso, se trata de una máquina suspendida, que se pliega en dos partes, por accionamiento de pistones hidráulicos, los cuales serán accionados hidráulicamente por la bomba del tractor.



Figura 1: Ejemplo de grada de discos plegada en 2 mitades para ir por carretera, sacada de la página AgriOCASION

Diseño y optimización de una grada de discos

También es posible encontrar máquinas arrastradas, con las que se necesitan tractores de menos potencia, pero son más caras, y cuentan con el problema de las matriculaciones. Su estructura es la misma, pero cuenta con una lanza, que será la que irá conectada al tractor, y una serie de ruedas que irán suspendidas o no.



Figura 2: Ejemplo de grada de discos arrastrada, obtenida de la página web del fabricante Jympa

Estos serían los 2 tipos básicos de máquina de discos que habría en el mercado, que a su vez cuentan con distintos tipos de discos, rodillos etc, en función de las condiciones de suelo que tengamos.

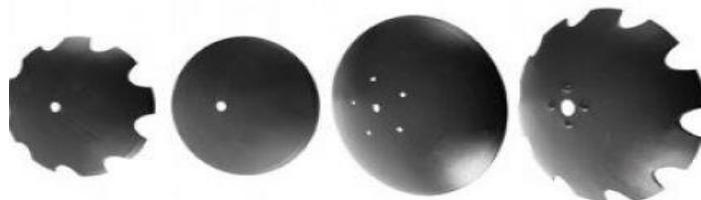


Figura 3: Ejemplo disco liso, para superficies donde no haya mucha paja y disco dentado, orientado para la primera pasada después de la cosecha. Imagen proporcionada por bellota



Figura 4 y 5: Ejemplos de tipo de rodillos, obtenidos de Google Imágenes

2. OBJETO

En la actualidad, hay un encarecimiento de los precios de todo tipo, como pueden ser fertilizantes, combustible etc, a lo que hay que añadir una escasez de agua que está afectando de lleno al sector agrícola. Esto está llevando a un cambio en el tipo de máquinas con las que labrar, y una de las que está siendo muy demandada es la grada de discos.

El objeto principal de este proyecto es el diseño y optimización de una grada de discos. Concretamente de una máquina compuesta por 38 discos, y que abarca una anchura de 5 metros de trabajo. Se caracteriza por ir plegada en dos mitades mediante la acción de cilindros hidráulicos. Una de las ventajas que aporta esto es que podemos circular por carretera sin superar el ancho del carril (3,5 m) y no necesita matriculaciones de ningún tipo. Todos estos conocimientos y geometría que tendrá que tener la máquina han sido facilitados por el fabricante Melquiades Royo S.L, el cual quiere fabricar una máquina de estas dimensiones una vez esté terminado el proyecto.

Este tipo de máquinas están pensadas para realizar labores superficiales, entre 5 y 18 cm de profundidad, con el objetivo de trituración y mezcla de rastrojo. Como no se está haciendo una gran labor, se alcanzan unas altas velocidades de trabajo, que suelen rondar los 12-14 km/h. Todo esto será muy importante a la hora del diseño y los cálculos que se vayan a realizar en SolidWorks.

Además de esto, hay que destacar las condiciones en las que esté la tierra, porque no es lo mismo un suelo arcilloso que uno arenoso, o la humedad que tenga, ya que el funcionamiento no va a ser el mismo.

Diseño y optimización de una grada de discos

Con toda esta recopilación de datos, se llevará a cabo un modelo inicial en SolidWorks, y a partir de los resultados obtenidos, se podrá comprobar las zonas en las cuales la máquina sufre más, y si fuera necesario, proponer una serie de mejoras/refuerzos con las que satisfacer las necesidades del fabricante.

3. ALCANCE

Se va a llevar a cabo modelo inicial 3D conforme a las especificaciones del fabricante, el cual ha proporcionado una serie de planos y modelos similares del resultado final de la máquina. A partir de ahí, se ha realizado una discretización del modelo, con la que se procederá al análisis estático de SolidWorks mediante elementos finitos.

Se va a realizar un estudio de sensibilidad de malla con el fin de analizar el tamaño de malla más adecuado para realizar satisfactoriamente el estudio planteado.

Una vez definido el tamaño de malla se procede a realizar el análisis numérico de la grada de discos mediante el Método de los Elementos Finitos, empleando el software SolidWorks, continuando con un proceso de optimización del diseño inicial, basado en criterios de rigidez y resistencia.

El modelo global de la máquina se muestra en el siguiente apartado, en donde se muestra con detalle todos los elementos que la conforman.

4. ANÁLISIS NUMÉRICO

Se va a hacer una breve introducción mediante una serie de fotos del modelo global, con las que vea de donde se parte:

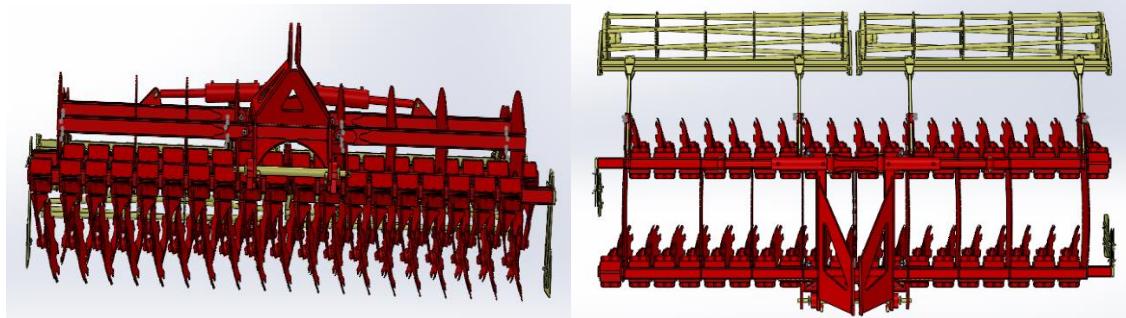


Figura 6 y 7: Ejemplos de vista frontal y desde arriba de la máquina

4.1 MODELO NUMÉRICO INICIAL

En la introducción al apartado, se ha mostrado el modelo global de la máquina, el cual se podría estudiar, pero se complicaría el cálculo y el tiempo de análisis, sin aportar información adicional sobre los componentes principales. Lo que se va a hacer es **dividir** el modelo en dos bien diferenciados: chasis/bastidor y rodillo.

Habrá que plantearse varios aspectos a tener en cuenta en el análisis, como son:

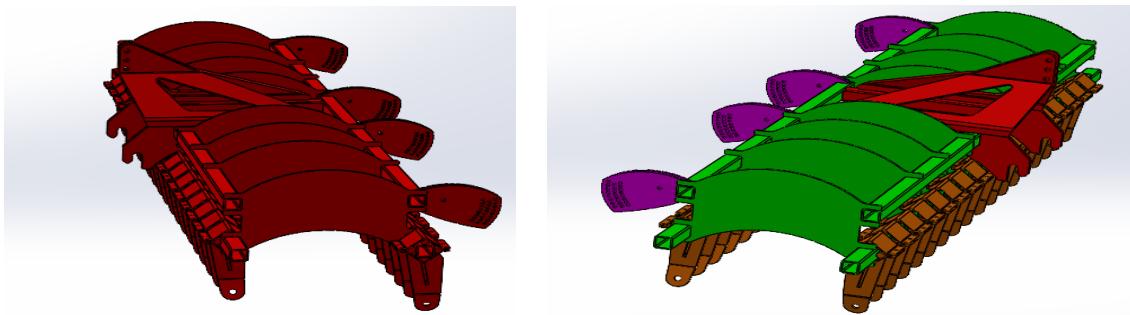
- Como está definido el ensamblaje y que tipo de análisis se va a ejecutar.
- Como trabaja esta máquina.
- Que fuerzas se van a necesitar.
- Que restricciones y apoyos va a tener.

Todo esto se va a explicar con detalle en los siguientes apartados, con las decisiones que se van a ir tomando.

Diseño y optimización de una grada de discos

A continuación, unas imágenes de los modelos establecidos en el proyecto:

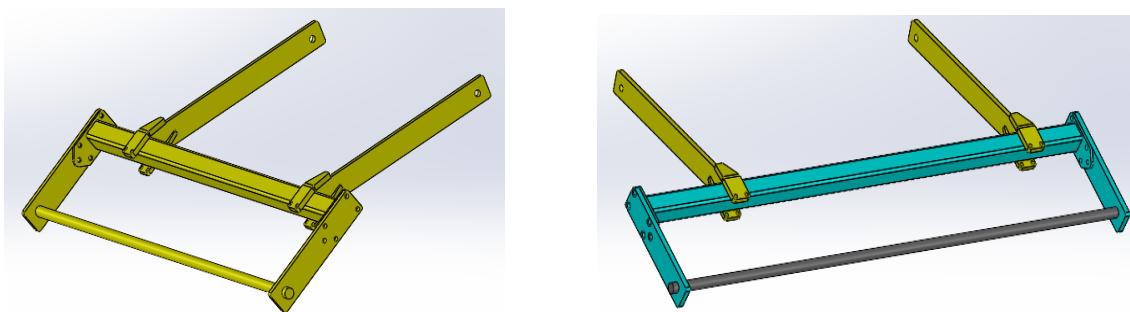
MODELO CHASIS



En estas imágenes se pueden ver claramente cuál es la estructura del bastidor:

- Unos piquetes y enganches pintados en rojo, los cuales van a ir enganchados al tractor.
- Los perfiles, a los cuales van las crestas y los brazos, junto con los soportes que se encargan de unirlos, en verde.
- Unas crestas, en donde irán alojadas las barras de los rodillos, pintadas en morado.
- El conjunto brazo simplificado, en naranja.

MODELO RODILLO



Diseño y optimización de una grada de discos

Al igual que con el modelo chasis, se ha distinguido el rodillo con distintos colores:

- Las barras de enganche y los soportes que van al perfil se han pintado de amarillo.
- El perfil, que junto las llantas, conforman el chasis del rodillo, pintado en azul.
- La varilla, que sería una de las partes que forman el rulo, en gris.

A continuación, se va a nombrar cada uno de los elementos que forman los modelos, junto con sus correspondientes colores, que marcan las distintas zonas:

Nombre	Espesor (mm)	Cantidad	Zona
Perfil de 100x100x10 a 1735 mm	10	4	Verde
Perfil de 100x100x10 a 1000 mm	10	2	Verde
Perfil de 100x100x10 a 2490 mm	10	4	Verde
Puente de piquete 100x100x10	10	2	Verde
Piquete	15	2	Rojo
Unión exterior perfiles	12	2	Verde
Brazos	15	38	Naranja
Elastómero Ø50x220		152	Naranja
Soporte doblado brazo	8	76	Naranja
Refuerzo separador bridas	12	76	Naranja
Soporte unión perfiles	12	8	Verde
Crestas	12	8	Morado
Enganche grada	30	2	Rojo

Tabla 1: Resumen del modelo chasis

Nombre	Espesor (mm)	Cantidad	Zona
Barra cresta rodillo	25	2	Amarillo
Perfil de 80x80 de 2490 mm	10	1	Azul
Sujeción perfil rodillo	20	4	Amarillo
Soporte rodillo	12	2	Azul
Llanta soporte rodillo	25	2	Azul
Varilla Ø40		1	Gris

Tabla 2: Resumen del modelo rodillo

4.2 MATERIALES

A cada una de las piezas que están ensambladas en el modelo, le corresponde un material, el cual hay que definir. Se cuentan con muchos tipos de materiales, pero habrá que pensar en cuales satisfacen los objetivos. Es una máquina enfocada a la durabilidad, aunque esto suponga un encarecimiento del precio final, por lo que se piensa en aquellos que contengan específicamente una gran resistencia a tracción, compresión e impactos y que admitan bien la soldadura.

Destacan 3 grupos de materiales, que son los que componen estos modelos: acero S355 JR, HARDOX 400 y poliuretano.

La razón de que sea así es la siguiente:

- Acero S355JR: nos admite un límite elástico alto y admite muy bien la soldadura mediante varios métodos de soldadura, ya sea sin calentamiento o con precalentamiento, y seguido de un tratamiento a alta temperatura. Será nuestro principal material, tanto para el chasis como para el rodillo.
- HARDOX 400: acero que destaca por su versatilidad y resistencia a la abrasión. Además, es adecuado en aplicaciones de desgaste moderado que requieren una alta resistencia a impactos, una óptima capacidad de plegado y una excelente soldabilidad.
Lo utilizaré únicamente para los brazos que van a soportar los discos.
- Poliuretano: se conoce comercialmente por el nombre de Vulkollan. Destaca por sus grandes propiedades mecánicas, como pueden ser un alto alargamiento o

Diseño y optimización de una grada de discos

una excelente resistencia al desgarro y a la abrasión. Este es el material del que se componen los redondos, cuya función es absorber las vibraciones.

Lo descrito se va a ver mejor unas tablas a modo resumen, en donde se muestran los coeficientes más importantes para nuestros cálculos, como son el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, densidad o el límite elástico.

Material	Módulo de Young (Mpa)	Coeficiente de Poisson	Densidad de masa (Kg/m3)	Límite elástico (Mpa)
S355JR	210000	0,3	7800	355
HARDOX 400	190000	0,29	8000	1020
POLIURETANO	2,5	0,495	1223	

Tabla 3: Resumen de los materiales con sus propiedades

4.3 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad es un término que se utiliza para hacer referencia a las decisiones que se van a tomar mediante el cambio de una variable, que permita **calcular** y **mejorar** las estimaciones sobre el proyecto que se comienza, en el caso de que esas variables cambiaseen o existiesen errores de apreciación en los datos iniciales.

Como se trata de un modelo muy complejo, no se sabe cuál es la mejor opción que se puede llevar a cabo, tanto para definir como para ejecutar los análisis. Por tanto, se van a plantear una serie de casos, con los que se puedan sacar una serie de conclusiones.

El estudio de sensibilidad consistirá en que, una vez se tenga definido el modelo, se varie una variable, en este caso el tamaño de malla.

Esto se va a aplicar sólo al rodillo, debido a que se trata de un estudio rápido y sencillo. El proceso a seguir es el siguiente:

- Los tamaños de malla van a ser de 5,15,30,45,60 y 80 mm, tanto para el análisis en curvatura y en curvatura combinado.
- Se representará en una tabla de Excel los resultados obtenidos, donde se obtendrá una gráfica.

- En la gráfica se apreciará una curva, la cual se irá estabilizando en unos valores, hasta formar una **“meseta”**. En esa zona se encontrará el mejor tamaño de malla para los cálculos.

Una vez se tenga claro cuál es el mejor tamaño de malla, será con el que se analicen los resultados finales, tanto para el rodillo como para el chasis.

4.4 SECCIÓN 1 - CHASIS – BASTIDOR

En el apartado 4.1, se ha visto como es el modelo chasis y cuáles son las distintas zonas que lo conforman. Ahora se va a analizar qué es lo que va a ocurrir una vez esté trabajando.

Lo primero que se necesita saber es como se levanta la máquina para que pueda empezar a trabajar. Contamos con unas piezas soldadas al bastidor. Son los llamados **enganches**, en donde se aloja un barrón. Este será levantado por el **tripuntal del tractor**, que son los enganches con los que cuenta.



Figura 8: Tripuntal del tractor

Si solo hubiera esos dos puntos de enganche, la máquina se vencería. Para que esto no suceda, se colocan en los piquetes un bulón, al cual irá el tercer punto del tractor.

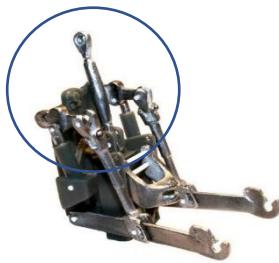
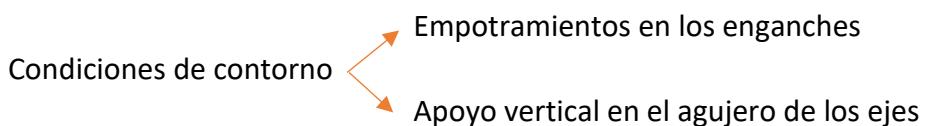


Figura 8: Tercer punto del tractor

Ya se sabe cómo va enganchada la máquina al tractor, por lo que habrá pasar a ver qué ocurre una vez esté en funcionamiento. Lo descrito hasta ahora lleva a afirmar que contamos con condiciones de contorno en nuestro problema. Se cuenta con puntos fijos en la zona del enganche, por lo que hay que restringir el movimiento en las tres direcciones.

En cuanto a los discos, estos van a ir apoyados al suelo, lo que produce una reacción vertical por parte del suelo. En nuestro modelo, se define en el agujero del eje.



Hasta ahora, no se han comentado las propiedades físicas de la grada de discos. El peso que nos proporciona SolidWorks del modelo global es de 3500 Kg aproximadamente, de los cuales 2528 kg estarán repartidos en el bastidor, y el resto en el rodillo. Esto va a ser sumamente importante, ya que el suelo hace una fuerza cuando la máquina está trabajando. Esta será paralela al suelo, y de sentido será contrario al movimiento. Va a ser conocida como una **fuerza de arrastre** transmitida a los discos, y que tendrá la misma magnitud para cada uno de los 38 discos.

Esta será de 978 Newtons, valor obtenido del libro **"La mecanización agraria"** del autor Juan Antonio Boto Fidalgo. Este cálculo se justificará en el **anexo C: FUERZAS**

Pero esta no va a ser la única fuerza, ya que la gravedad también ejerce una fuerza de 9,81 m/s², que hay que definir en el modelo.

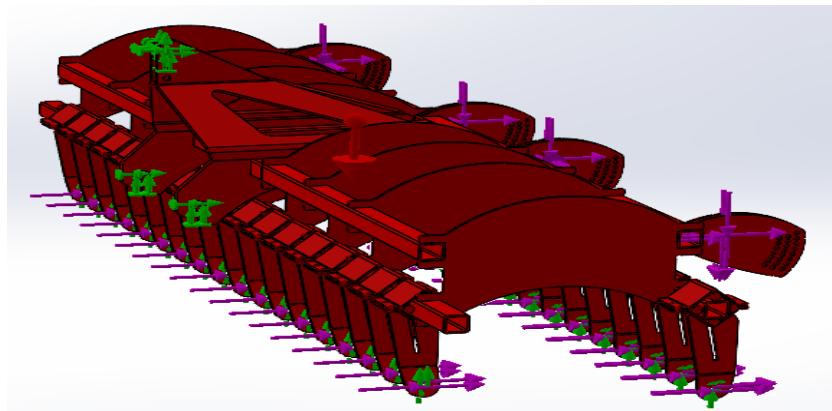


Figura 9: Ejemplo con las condiciones de contorno en verde, junto con las fuerzas en morado

4.5 SECCIÓN 2 - RODILLO

El rodillo se trata de un modelo mucho más sencillo que el chasis, por lo que su análisis va a ser mucho menos costoso. Hay que comenzar a hablar por cómo va a ir enganchado al chasis. Las barras de enganche cuentan con unos agujeros, concéntricos a los de las crestas, por donde se pasarán unos tornillos.

Ya se conoce cómo va enganchado el rodillo al chasis, por lo que hay que analizar lo que ocurre. En estos agujeros, hay que definir una restricción de movimiento en las tres direcciones, ya que se trata de puntos fijos.

Al igual que con los discos, el rulo del rodillo va apoyado en el suelo mediante las varillas, lo que supone una restricción de movimiento a lo largo de toda la verilla en la dirección vertical.

Condiciones de contorno

- Empotramientos en los enganches
- Apoyo vertical a lo largo de la varilla

En lo que respecta a fuerzas, hay otra fuerza de arrastre, paralela al suelo y de sentido contrario al movimiento. Esta será de 2200 Newtons, valor obtenido del libro “**La mecanización agraria**” del autor Juan Antonio Boto Fidalgo. Este cálculo se justificará en el **anexo C: FUERZAS**

Diseño y optimización de una grada de discos

Por último, hay que volver a definir la fuerza de la gravedad, perpendicular al suelo y de valor 9,81 m/s².

Con las condiciones de contorno y la fuerzas, se ejecuta el análisis, y una vez esté resuelto, en el apartado de Resultados  Enumerar fuerza resultante, se verán cuáles son las reacciones que se crean en el empotramiento. Estas habrá que definirlas en las crestas del modelo chasis, en los ejes que les correspondan y con sentidos contrarios a los del rodillo.

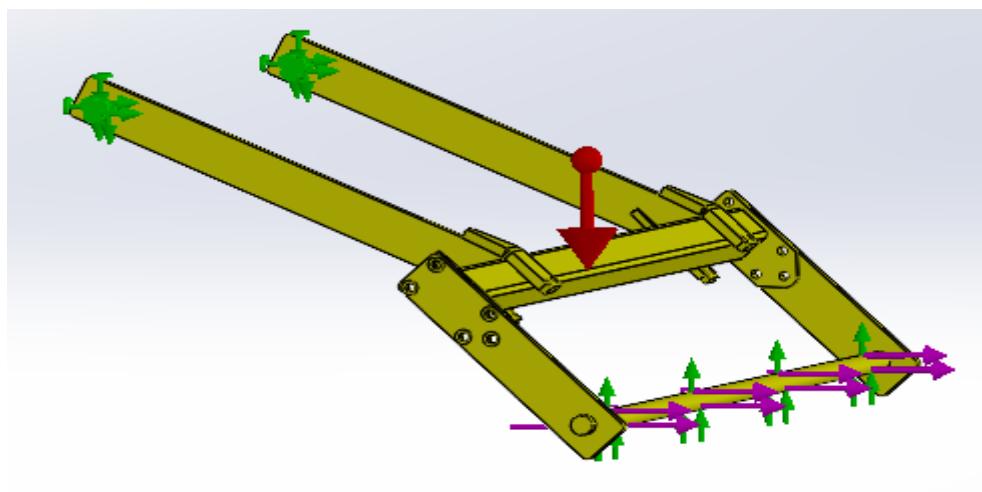


Figura 15: Condiciones de contorno en verde, junto con las fuerzas en morado

5. RESULTADOS

Una vez definidos los modelos, SolidWorks nos ofrece varios tipos de análisis, que son:

- Análisis estático con malla estándar
- Análisis estático en curvatura
- Análisis estático en curvatura combinado

En el proyecto vamos a desechar el estándar, debido a que no se ajusta a nuestra geometría.

Se va a trabajar con el basado en curvatura y el de curvatura combinado, y se apreciará si hay cambios significativos entre los dos, y cual se ajusta mejor a nuestras necesidades.

Diseño y optimización de una grada de discos

Los parámetros que nos van a ofrecer son múltiples, pero nos va a interesar exclusivamente la tensión de Von Mises y el desplazamiento, ya que se analiza un diseño según criterios de rigidez y resistencia.

Se va a poner especial atención a varias zonas críticas, como son los empotramientos, perfiles del chasis o agujeros en los que se apliquen cargas.

Validaremos los cálculos en lo que respecta a tensiones con el coeficiente de seguridad, parámetro que relaciona el límite elástico del material con la máxima tensión que nos proporciona. Para el proyecto, se buscan unos valores altos, que no comprometan la estructura de la grada de discos. Se va a establecer un valor mínimo de coeficiente de seguridad de **3**, aunque se intentará que todo el conjunto esté por encima de **5**.

No se ha hablado a cerca del sistema de amortiguación planteado en esta grada de discos. Se van a introducir unos redondos compuestos de poliuretano, un sistema innovador en las máquinas agrícolas, ya que sustituye a sistemas tradicionales como pueden ser el muelle o la ballesta.

Como su comportamiento es desconocido, será un punto a tener en cuenta en los resultados, aunque para poder analizarlos de una manera más correcta, habría que hacer un análisis dinámico.

Con respecto a SolidWorks, la leyenda que nos mostrará los resultados definirá los valores mínimos con el color azul, seguido de verdosos, amarillos, hasta llegar a rojos, que mostrarán los valores máximos.

5.1 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

En el apartado 4.3, se ha definido lo que es un estudio de sensibilidad y como se va a llevar a cabo para nuestro proyecto. Se van a presentar unas gráficas de Excel que se han realizado a partir de los resultados de tensiones y desplazamientos para cada uno de los tamaños de malla. Se muestra el caso de curvatura combinado como modo ejemplo:

Malla (mm)	Desplazamiento máximo (mm)	Malla (mm)	Tensión máxima (Mpa)
5	1,11	5	62,54
15	1,11	15	63,65
30	1,1	30	64,26
45	1,1	45	64,17
60	1,1	60	64,13
80	1,1	80	64,24

Diseño y optimización de una grada de discos

Tabla 4 y 5: Valores obtenidos en SolidWorks para cada uno de los casos

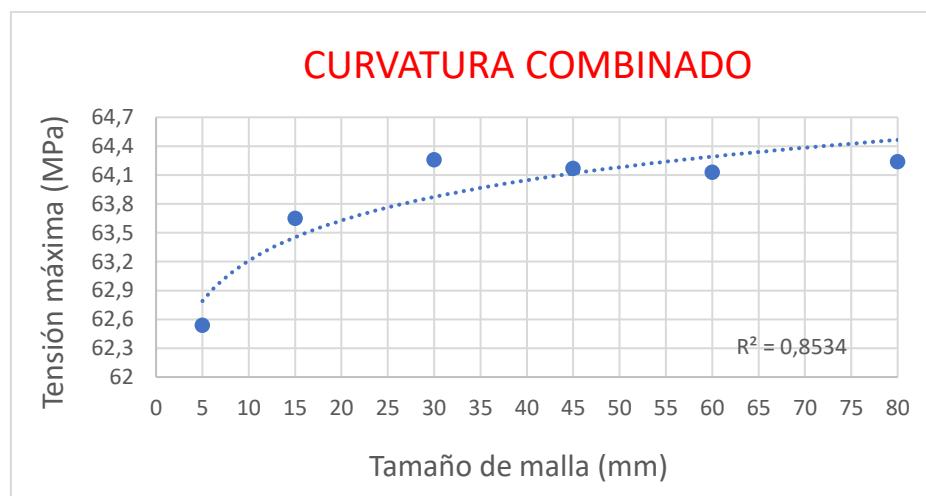
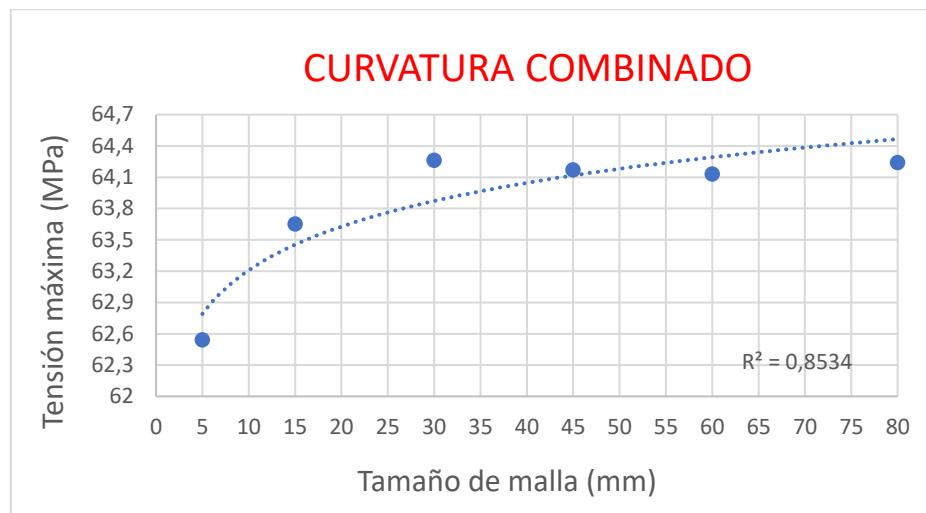


Imagen: Gráficas obtenidas mediante los valores de las tablas

Con estos resultados a mano, se pueden ver unos desplazamientos máximos alrededor del mm en la zona central de la varilla, y que en todos los tamaños de malla las variaciones son mínimas, lo que supone que no se puedan sacar unas conclusiones en claro.

En cuanto a las tensiones, se aprecia una cierta estabilización de valores alrededor de los 45 mm, en donde se alcanza la llamada “meseta”. También serían aceptables tamaños de malla superiores.

El único valor que se puede descartar con total seguridad es el de tamaño 5 mm, debido a que se está dotando al modelo de una rigidez excesiva, por lo que los valores obtenidos

Diseño y optimización de una grada de discos

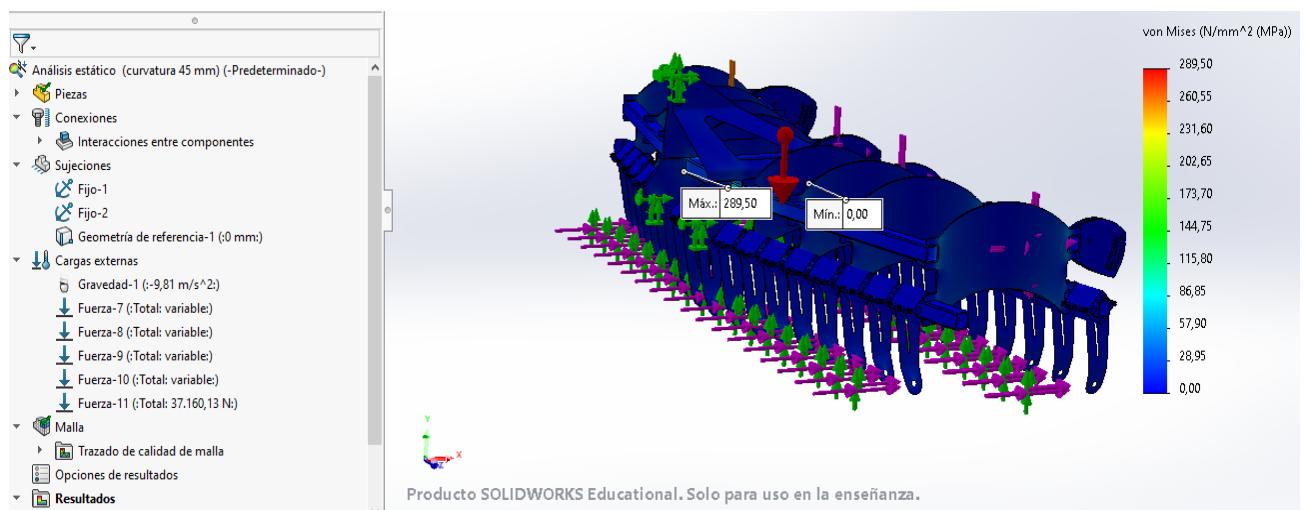
los podríamos desechar, y que únicamente han servido para ver la trayectoria de la curva.

Por tanto, el tamaño de malla de **45 mm** será con el que trabajaremos en nuestros análisis, tanto para el rodillo como para el chasis.

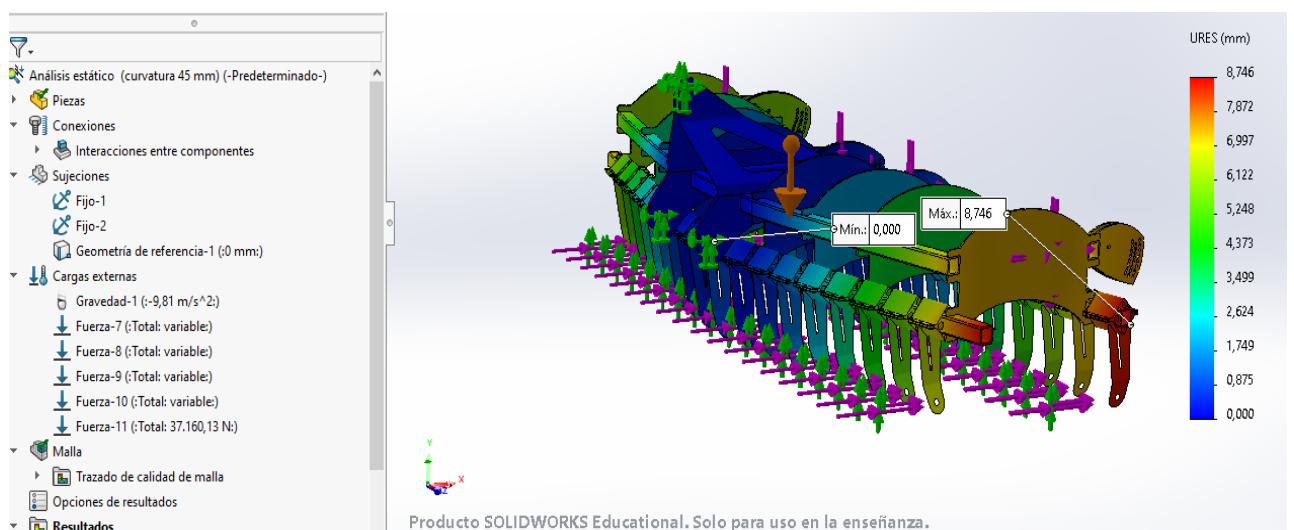
5.2 SECCIÓN 1 – CHASIS/BASTIDOR

ANÁLISIS DE CURVATURA

1. TENSIONES

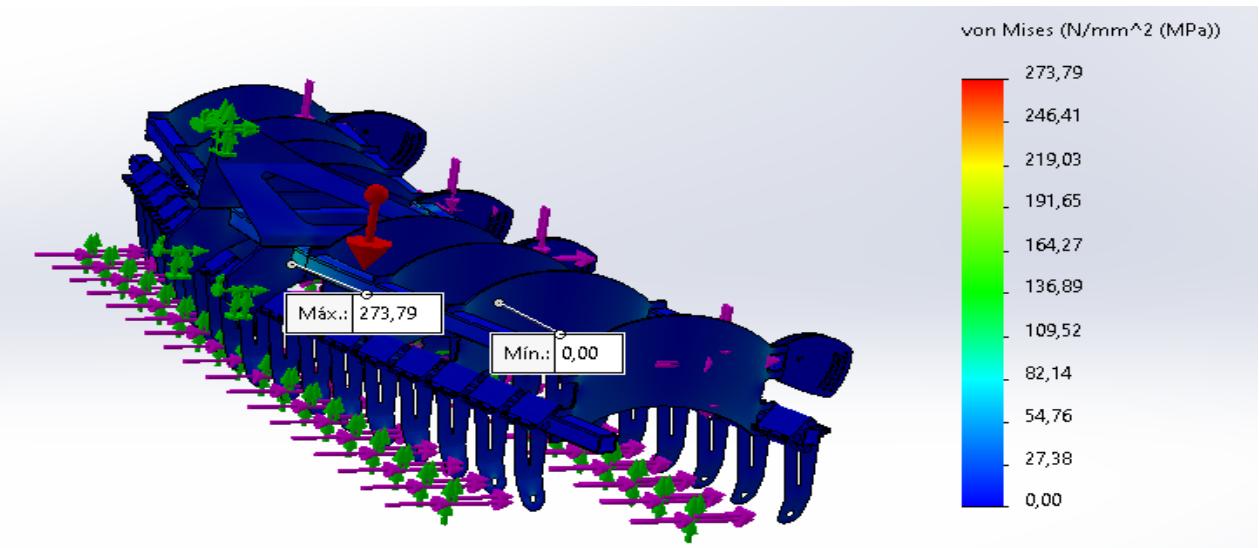


2. DESPLAZAMIENTOS

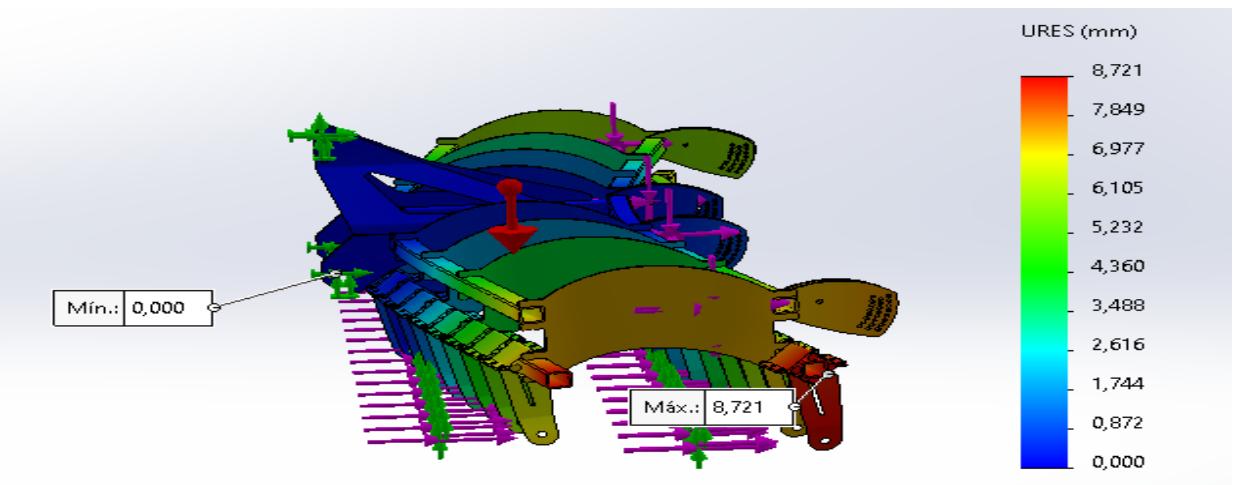


ANÁLISIS DE CURVATURA COMBINADO

1. TENSIONES



2. DESPLAZAMIENTOS



RESUMEN DE LOS RESULTADOS

Con los 2 análisis a mano, podemos sacar una serie de conclusiones:

- No se ven grandes diferencias entre máximos de tensiones y desplazamientos, ni en las zonas en donde se encuentran.
- Si hilamos más fino, encontramos alguna diferencia más notable en los agujeros en donde se alojan bulones o ejes, donde se obtienen unos mejores resultados con el de curvatura combinado. En este modelo, la tensión en esa zona es de 49,16 MPa, frente a los 42,24 MPa en curvatura.

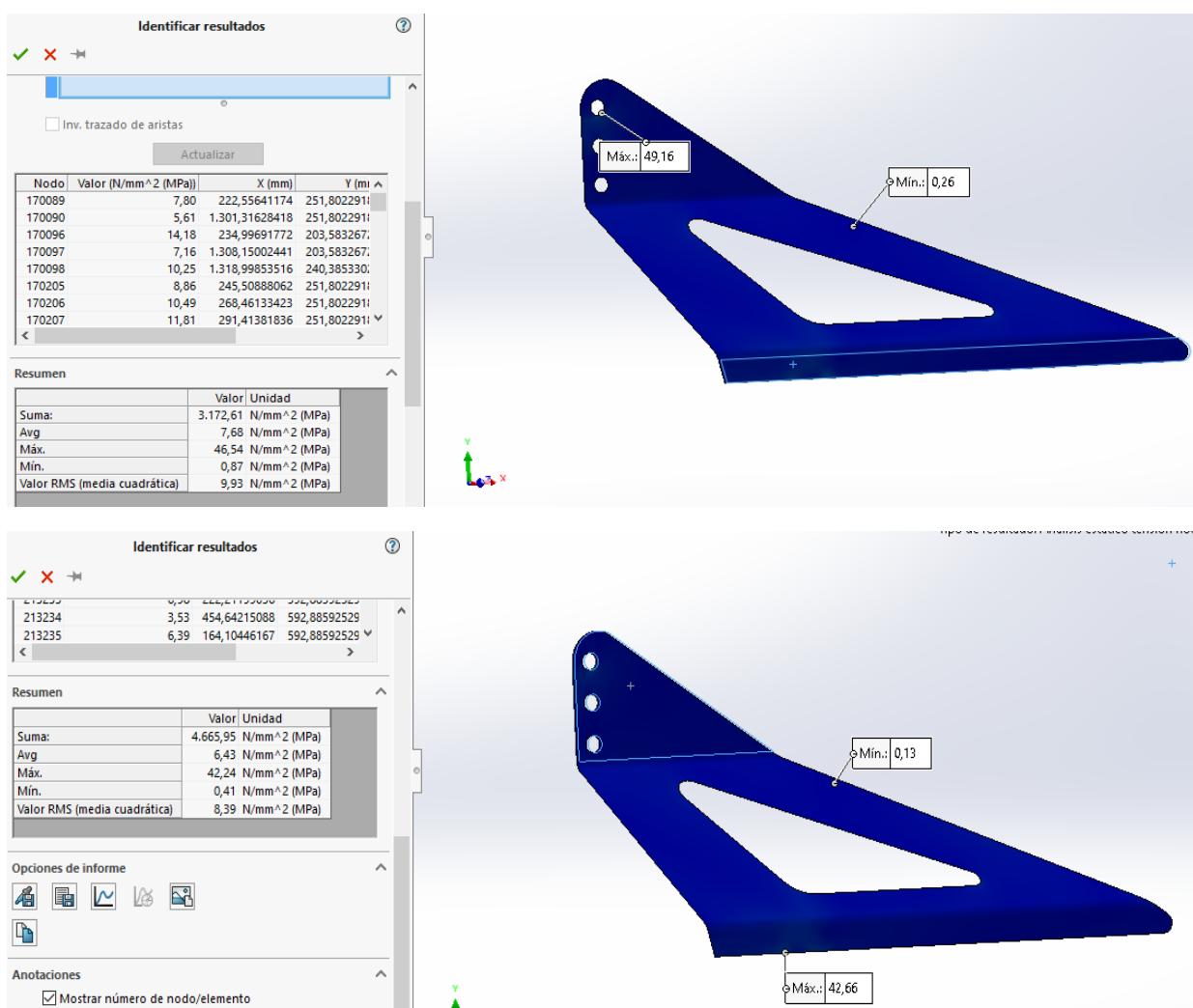


Figura 16: Diferencia de tensiones entre el análisis en curvatura combinado y el análisis en curvatura

Diseño y optimización de una grada de discos

Por tanto, se va a seguir analizando los resultados del modelo con el análisis en curvatura combinado. Las imágenes se muestran por configuración con la opción de deformada de SolidWorks, con la que se puede ver en mejor medida cómo se deformaría la máquina, una vez aplicadas las condiciones de contorno y las fuerzas.

En las tensiones, se ven zonas en las que prácticamente la grada de discos no está sometida, como son las crestas o los elastómeros, mientras que, en zonas de unión con perfiles, sí que se observan concentradores de tensiones, aunque en su mayoría son puntuales.

Como ya se ha visto, uno de los focos a tener en cuenta son los enganches. En los tres puntos fijos van a recaer el peso total de la grada de discos.

Habrá que poner también especial atención en las zonas redondeadas, como son los soportes de unión de los perfiles, en donde se ven puntos con manchas verdosas, que suponen unas tensiones superiores a 100 Mpa.

Como ya se ha comentado, el material **principal** de la máquina es el **S355JR**, cuyo límite elástico es de 355 Mpa. Vemos que el valor máximo de este modelo es de 274 Mpa, lo que supone un coeficiente de seguridad de 1,2 en esa pieza, que es la del enganche inferior, lo cuál no sería válido. Esto hará que tengamos que plantearnos una serie de soluciones para corregir las zonas en la que haya piezas con un coeficiente de seguridad inferior a 3.

En el caso de desplazamientos, serán mayores cuanto más nos alejemos de la parte central de la máquina, la llamada zona central-enganche, los cuales son de cerca de 9 mm respecto a su posición original en la horizontal.

Todo lo comentado se detallará en mejor medida en el apartado del **anexo E.2: SECCIÓN 1 – CHASIS/BASTIDOR**, donde se adjuntarán imágenes en las que se puede ver los resultados de cada una de las piezas, tanto en tensiones como en desplazamientos.

Diseño y optimización de una grada de discos

PIEZA	ESPESOR (mm)	MATERIAL	TENSIONES (MPa)	DESPLAZAMIENTOS (mm)	COEFICIENTE DE SEGURIDAD
Perfil de 100x100x10 a 1735 mm	10	S355JR	87,41	7,431	4,1
Perfil de 100x100x10 a 1000 mm	10	S355JR	116,74	0,286	3,0
Perfil de 100x100x10 a 2490 mm	10	S355JR	32,11	8,707	11,1
Puente de pique 100x100x10	10	S355JR	213,19	0,135	1,7
Pique	15	S355JR	42,66	0,11	8,3
Unión exterior perfiles	12	S355JR	30,12	1,254	11,8
Brazos	15	HARDOX 400	25,8	0,865	42,64
Elastómero Ø50x220		POLIURETANO	0	8,673	
Soporte doblado brazo superior	8	S355JR	4,7	8,647	75,53
Refuerzo separador bridas	12	S355JR	5,69	8,65	62,39
Soporte unión perfiles	12	S355JR	99,47	7,47	3,57
Crestas	12	S355JR	16,12	7,7	22,02
Enganche grada	30	S355JR	281,86	0,12	1,26
Soporte doblado brazo inferior	8	S355JR	21,31	8,653	16,66

Tabla 6: Resumen del análisis en curvatura

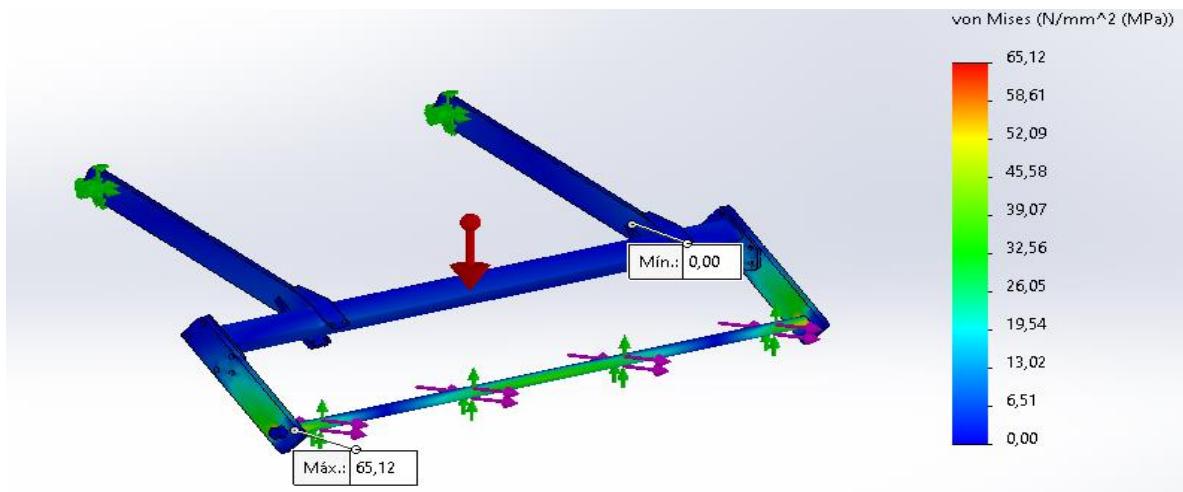
PIEZA	ESPESOR (mm)	MATERIAL	TENSIONES (MPa)	DESPLAZAMIENTOS (mm)	COEFICIENTE DE SEGURIDAD
Perfil de 100x100x10 a 1735 mm	10	S355JR	80,81	7,413	4,4
Perfil de 100x100x10 a 1000 mm	10	S355JR	108,81	0,289	3,3
Perfil de 100x100x10 a 2490 mm	10	S355JR	28,54	8,684	12,4
Puente de pique 100x100x10	10	S355JR	207,56	0,137	1,7
Pique	15	S355JR	49,16	0,127	7,2
Unión exterior perfiles	12	S355JR	27,79	1,244	12,8
Brazos	15	HARDOX 400	50,81	0,828	7,0
Elastómero Ø50x220		POLIURETANO	0	8,668	
Soporte doblado brazo superior	8	S355JR	3,21	8,637	110,59
Refuerzo separador bridas	12	S355JR	3,03	8,646	117,16
Soporte unión perfiles	12	S355JR	104,92	7,447	3,38
Crestas	12	S355JR	13,17	7,684	26,96
Enganche grada	30	S355JR	273,79	0,127	1,30
Soporte doblado brazo inferior	8	S355JR	24,42	8,675	14,54

Tabla 7: Resumen del análisis en curvatura combinado

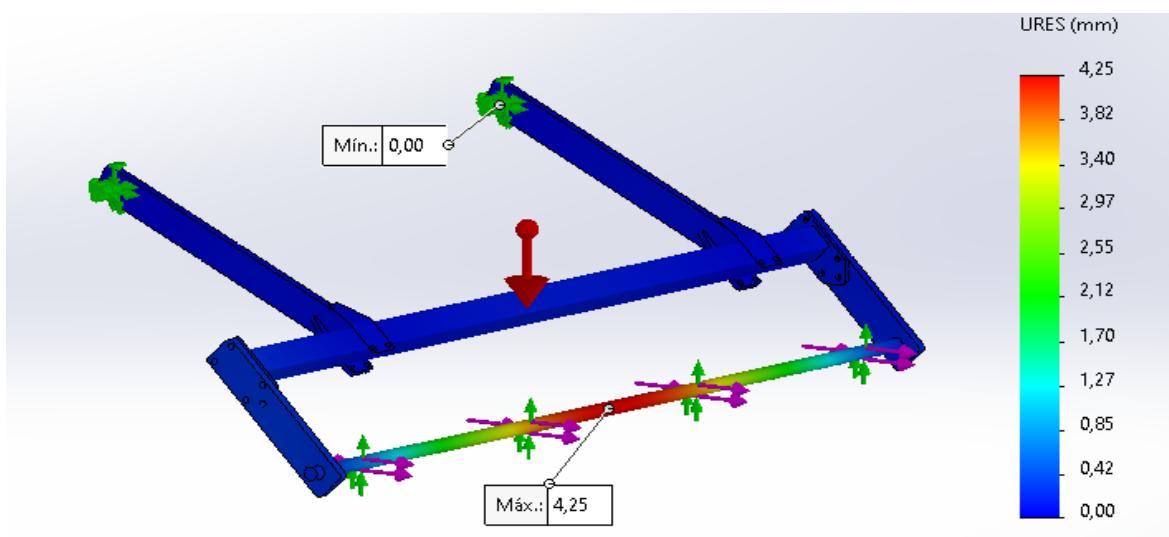
5.3. SECCIÓN 2 - RODILLO

ANÁLISIS EN CURVATURA

1. TENSIONES

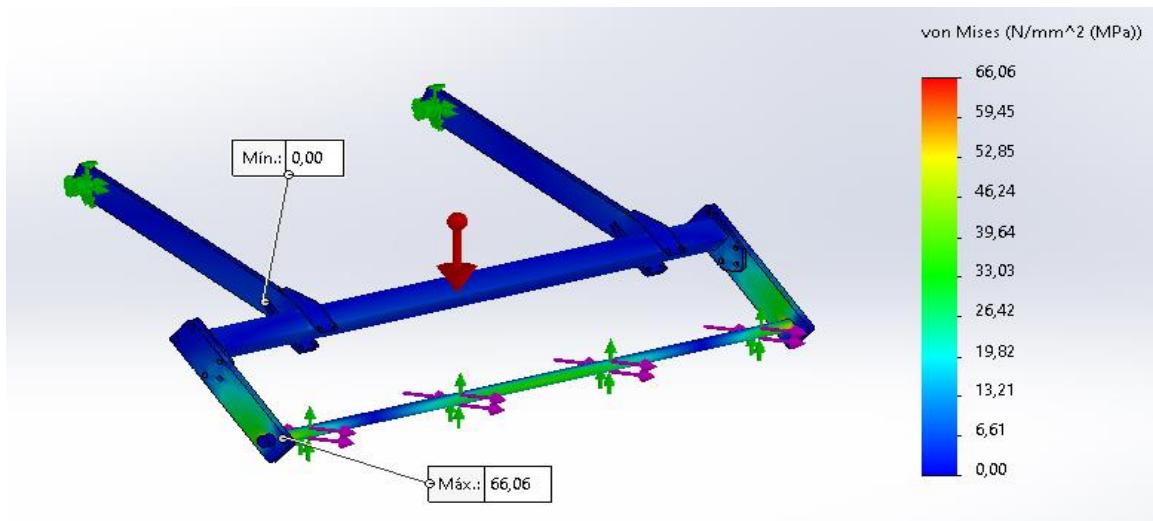


2. DESPLAZAMIENTOS

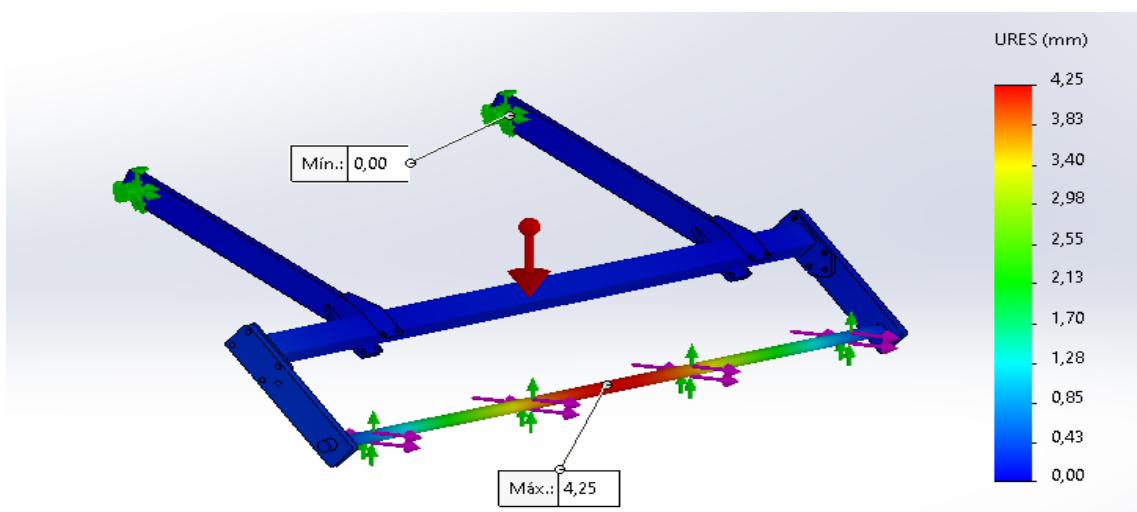


ANÁLISIS EN CURVATURA COMBINADO

1. TENSIONES



2. DESPLAZAMIENTOS



RESUMEN DE LOS RESULTADOS

Al igual que se ha hecho con el chasis, vamos a ver lo que está ocurriendo en cada uno de los análisis. No se aprecian grandes diferencias ni en tensiones ni desplazamientos, por lo que para este caso daría igual que análisis escoger. Los dos serían igual de válidos.

Se puede ver que las tensiones en ningún caso superan los 20-30 MPa, a excepción del rulo, por lo que el rodillo no está sometido en exceso, concorde a la realidad, ya que se trata de un elemento secundario, cuya función es la de compactar la tierra, una vez esté movida por los discos.

En cuanto a la recreación del rulo, no se ajusta mucho a lo que es en sí el conjunto, pero permite ver lo que le va a pasar a cada una de las 8 varillas que lo forman. Lo más importante es ver cuánto se deforman una vez el suelo le aplica una determinada fuerza.

Se han dotado del mismo material que el conjunto, el S355JR, con el que se ha pensado que era suficiente. Con los resultados, se observa un desplazamiento máximo muy alto, por encima de los 4 mm, por lo que habrá que llevar a cabo una optimización, con la que se consiga un valor más normal y que no comprometa el modelo.

Por último, se ha comentado que en los empotramientos del rodillo se producirán unas reacciones, las cuales obtendremos numéricamente una vez se haya ejecutado el análisis. Habrá que tener en cuenta sus direcciones y sentidos respecto a los ejes de coordenadas del modelo rodillo, ya que para llevarlas al modelo chasis, tendrán que concordar con sus ejes y en sus correspondientes sentidos, que serán los contrarios a los del rodillo.

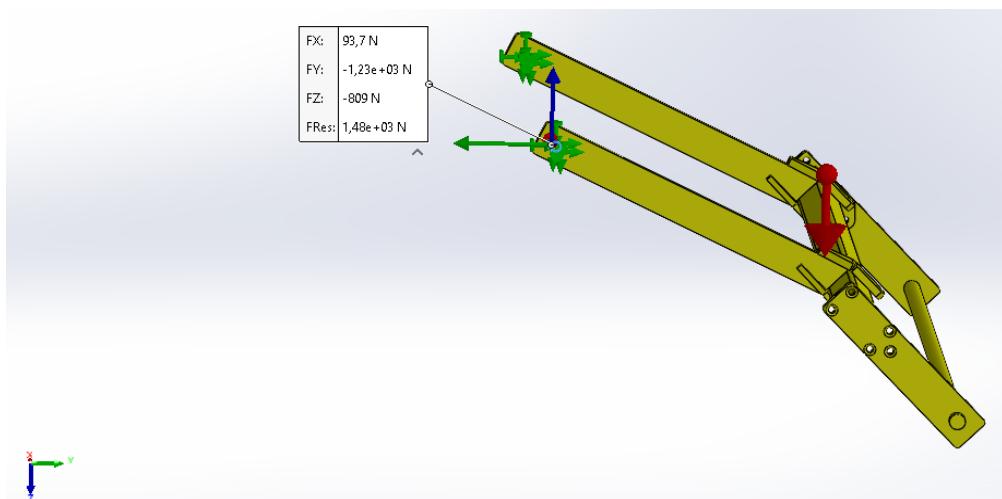


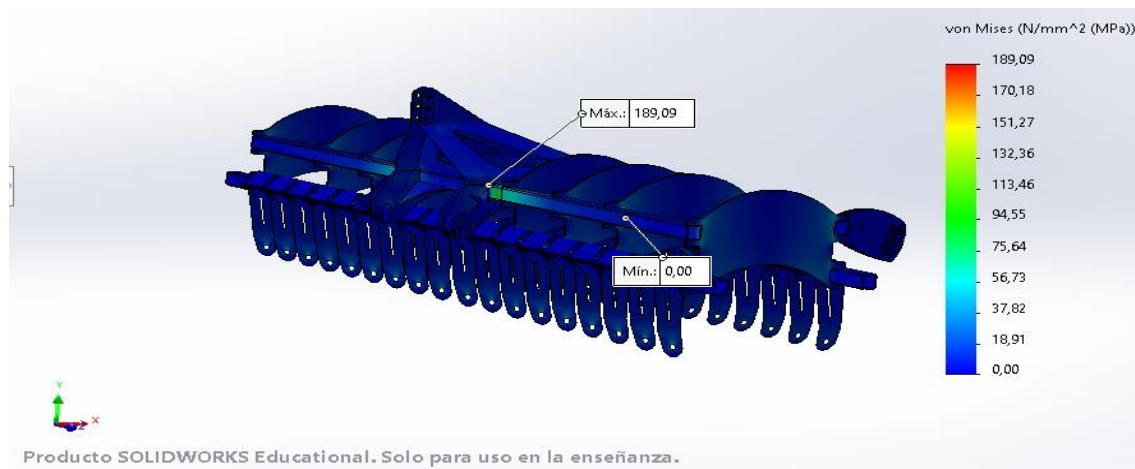
Figura 17: Reacciones en el empotramiento

6. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

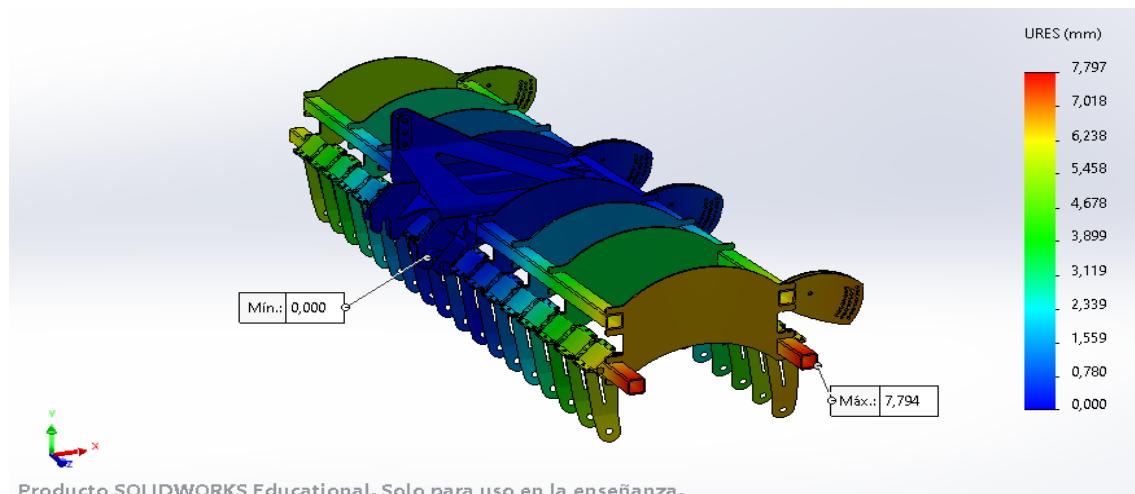
En vista a los resultados, se va a llevar a cabo una reflexión acerca de lo obtenido en los dos modelos.

6.1 SECCIÓN 1 – CHASIS/BASTIDOR

1. TENSIONES



2. DESPLAZAMIENTOS



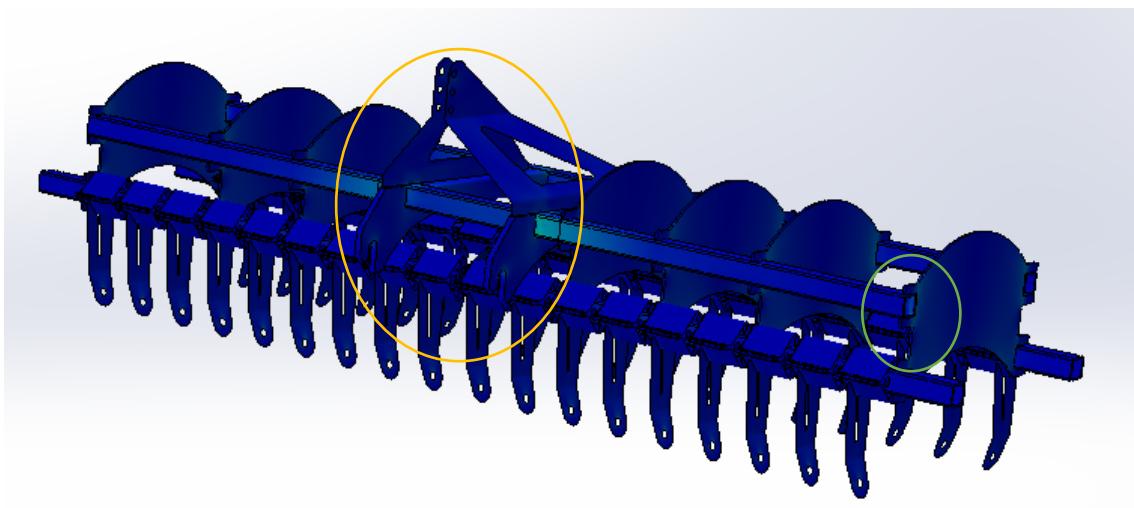


Imagen: Resultado de las tensiones con sus zonas críticas

Se han rodeado las zonas cuyas piezas no llegan al coeficiente mínimo de seguridad, o están en un intervalo correcto, pero que me gustaría que fuera más alto. Para los soportes de unión de perfiles, encontramos zonas verdosas en las uniones con los perfiles. La solución más lógica sería la de dotar a la unión de un espesor de cordón de soldadura mayor, ya que es algo muy puntual, tal y como se puede apreciar. En el resto de la pieza, las tensiones son bajas, por lo que no hay problemas.

En cuanto a la zona central de la máquina, en concreto la delantera, está muy condicionada por los enganches inferiores, en donde se producen las mayores tensiones, y compromete toda la zona.

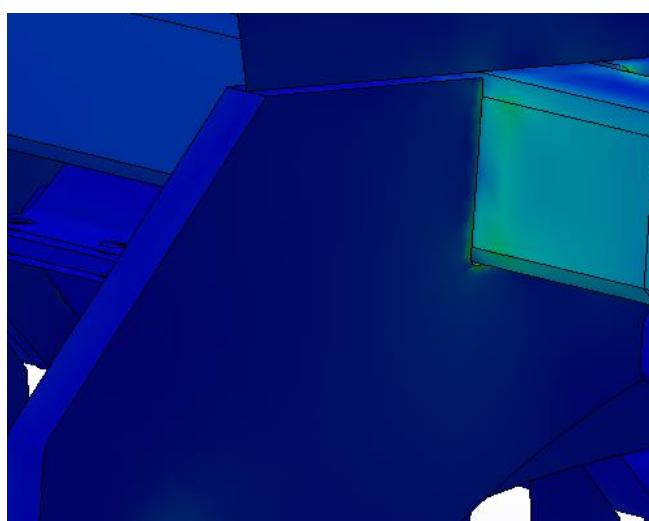


Imagen: Unión entre el enganche y el perfil

Diseño y optimización de una grada de discos

En esa unión del enganche con el perfil, tenemos un concentrador de tensiones de unos 270 MPa, que supone que haya añadir piezas de refuerzo para poder bajar esa tensión. Se ha pensado hacer mediante un enganche lateral, que ayude a repartir la tensión que le va al enganche principal, y a su vez un cartabón soldado al perfil y enganche, que nos ayuden a poder eliminar esas zonas puntuales con una tensión tan elevada.

Además, en el piquete el coeficiente de seguridad está por encima de **5** en todos sus puntos, pero los perfiles sobre los que se encuentran soportan unas tensiones altas, por lo que también lo vamos a reforzar mediante una placa frontal que una los dos piquetes, aportando mayor estabilidad a la estructura.

En su parte superior, hay tres agujeros, que son las tres posiciones a las que puede ir el bulón de enganche. Aunque según los resultados, la tensión en esos puntos es de unos 45 MPa, para que no haya ningún tipo de problema, nos va a interesar reforzar la zona, dotándola de un mayor espesor, mediante una pletina soldada.



Imagen: Refuerzo enganche bulones

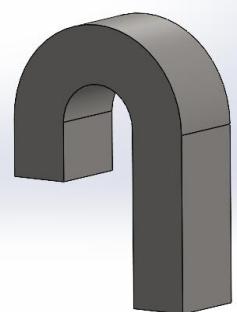


Imagen: Refuerzo enganche concéntrico

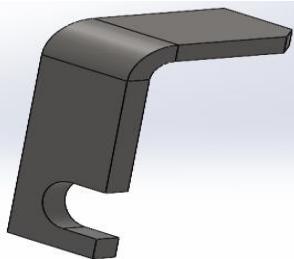


Imagen: Refuerzo enganche lateral



Imagen: Cartabón de 100x100x12 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

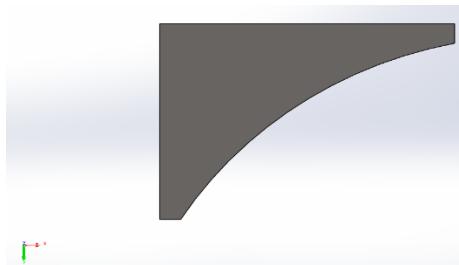


Imagen: Cartabón enganche grada

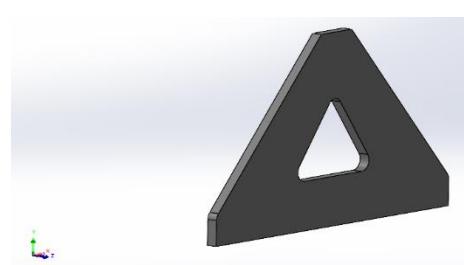


Imagen: Refuerzo piquete

PIEZA	ESPESOR (mm)	MATERIAL	CANTIDAD
Refuerzo enganche bulones	10	S355JR	2
Cartabón enganche grada	10	S355JR	1
Refuerzo enganche concéntrico	10	S355JR	2
Refuerzo enganche lateral	10	S355JR	2
Cartabón 100x100	12	S355JR	6
Refuerzo piquete	15	S355JR	1

Tabla 8: Resumen de las piezas introducidas

En el **anexo F: Proceso de optimización**, se mostrarán los resultados de tensiones y desplazamientos de cada una de las piezas por separado, junto con más imágenes.

Con estas imágenes, se muestran las tensiones y desplazamientos que se obtienen con los refuerzos.

PIEZA	ESPESOR (mm)	MATERIAL	TENSIONES (MPa)	COEFICIENTE DE SEGURIDAD
Perfil de 100x100x10 a 1735 mm	10	S355JR	67,21	5,3
Perfil de 100x100x10 a 1000 mm	10	S355JR	139,09	2,6
Perfil de 100x100x10 a 2490 mm	10	S355JR	32,11	11,1
Puente de piquete 100x100x10	10	S355JR	176,16	2,0
Piquete	15	S355JR	28,98	12,2
Enganche grada	30	S355JR	189,09	1,9

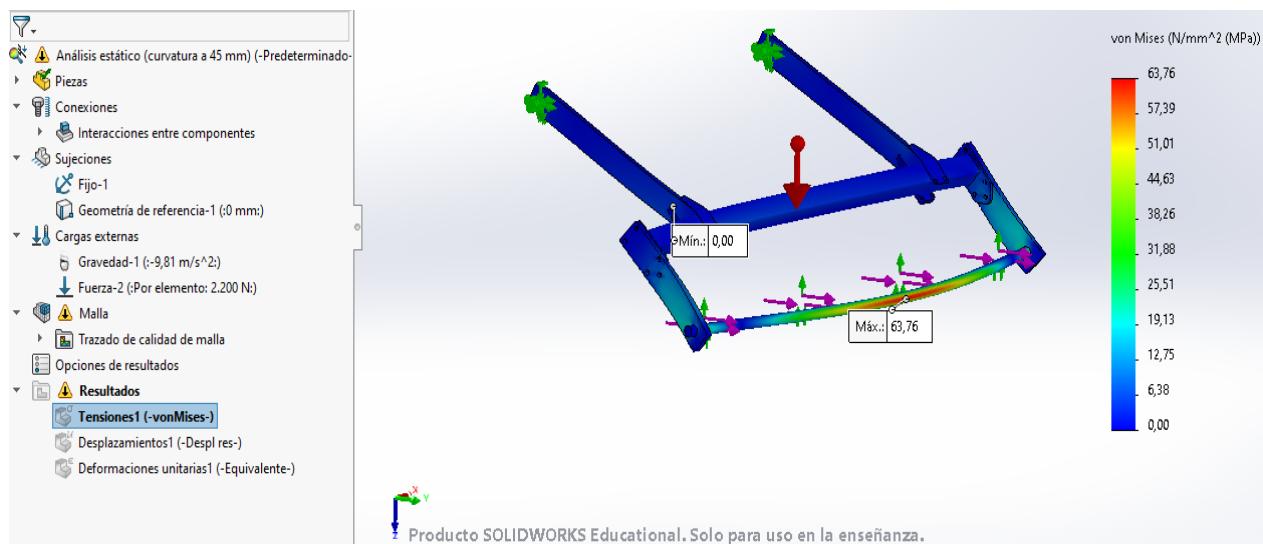
Tabla 9: Resumen de los nuevos valores con las mejoras

En este último resumen, se aprecia que siguen quedando valores de coeficiente de seguridad por debajo de 3, como es en el caso del enganche, el puente del piquete o el perfil de 1000 mm. Esto supone que sigan sin cumplir con el criterio establecido. Pero se ha visto que las zonas donde se dan estos concentradores de tensiones son **muy pequeñas**, por lo que voy a darlo por válido, y así concluir el proceso de optimización para este modelo.

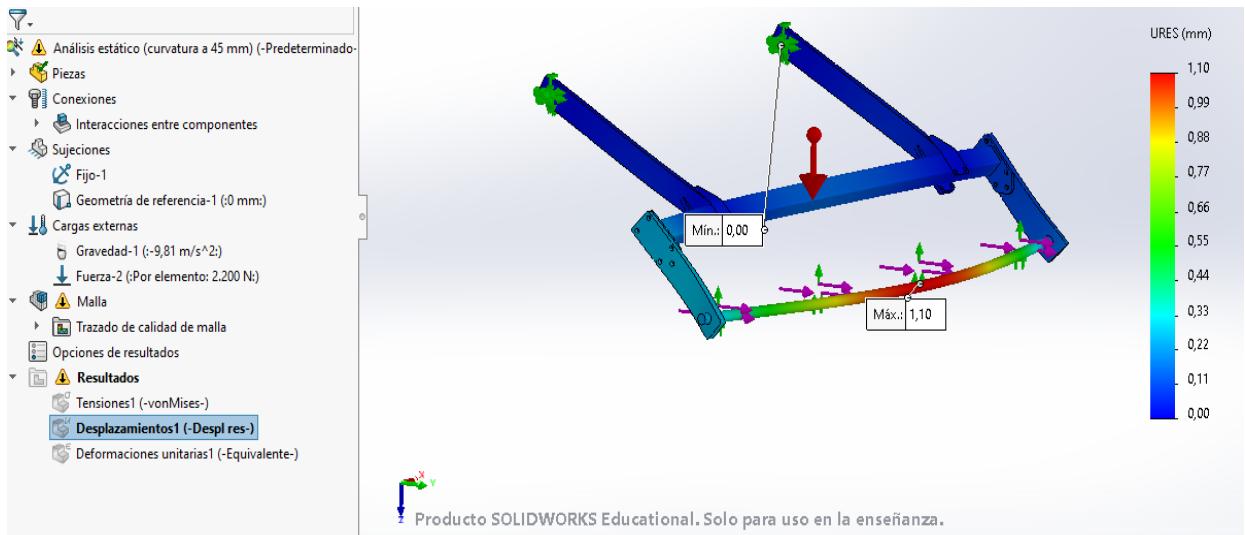
6.2 SECCIÓN 2 – RODILLO

En el **apartado 5.3**, se ha visto que los desplazamientos son muy altos en la varilla, donde se ha apreciado un desplazamiento máximo de más de 4mm en la parte central. La solución que se va a aportar es cambiar el material, que era un S355 JR, por uno que tenga un Módulo de Young más alto, siendo el resto de propiedades mecánicas las mismas. Se va a probar con un material con un Módulo de Young del orden de 10 veces mayor.

1. TENSIONES



2. DESPLAZAMIENTOS



Este cambio supone unas ligeras variaciones en las tensiones, pero una importante disminución en los desplazamientos:

Tensión máxima: 65,12 MPa → 63,76 MPa

Desplazamiento máximo: 4,25 mm → 1,1 mm

7. CONCLUSIONES

El presente trabajo “Diseño y optimización de una grada de discos” se ha realizado para diseñar y optimizar una **grada de discos de 5 metros de anchura**, destinada a cortar y envolver toda la paja presente en el campo. Se trata de un modelo pensado para fabricar por parte de la empresa Melquiades Royo S.L, fabricante a nivel nacional de todo tipo de aperos, y que cuenta con una experiencia de más de 50 años, con la que poder cubrir la alta demanda de este tipo de máquinas.

Actualmente, se están imponiendo leyes medioambientales en toda Europa y que están incluidas en la agenda 2030, como son las restricciones al uso de fertilizantes o prohibición a la quema de paja, lo que supone que los agricultores se vean obligados en mayor o menor medida a labrar sus tierras.

Con esta máquina, conseguimos ir a velocidades altas con un consumo de combustible mínimo, lo que supone un gran ahorro.

Diseño y optimización de una grada de discos

Se ha facilitado el diseño mediante modelos de otras máquinas que siguen una estructura similar, como es el caso de los chisels. A esto, hay que añadir la colaboración de proveedores de todo tipo de piezas agrícolas como son Bellota o SKF, los cuales han ayudado en todo momento para el diseño de algunas partes del modelo global.

Una vez se tenga el modelo global, se divide en dos casos independientes, los cuales se ejecutarán mediante dos tipos de análisis, en curvatura y curvatura combinando, en los cuales habrá que definir una serie de parámetros.

A partir de ahí, obtendremos una serie de resultados, los cuales analizaremos mediante el coeficiente de seguridad, cuyo valor lo estableceremos en un rango entre 3-5, con el que pueda as

egurarme de que la máquina no va a sufrir en ningún punto, y si es el caso, se aportarán diferentes soluciones, ya sea con refuerzos, cambios de material, espesor etc.

8. REFERENCIAS

Para la realización de este trabajo de fin de grado, se ha utilizado la siguiente documentación.

1. Planos y visualización de piezas similares a las del modelo por parte de la empresa Melquiades Royo S.L.
2. Catálogos de piezas normalizadas por parte de empresas dedicadas al sector agrícola, como pueden ser SKF o Bellota, con las que se han completado al detalle la grada de discos.
3. El libro **“La mecanización agraria”** del autor Juan Antonio Boto Fidalgo, con el que me he apoyado para el cálculo de las fuerzas.
4. Páginas web como la de la Universidad de Barcelona <http://www.ub.edu> donde se facilitan las propiedades mecánicas del poliuretano.
5. Páginas web como AgriOCASION o Jympa, para mostrar ejemplos de grada de discos.

TRABAJO FIN DE GRADO

Título del trabajo:

Diseño y optimización de una
grada de discos

ANEXOS

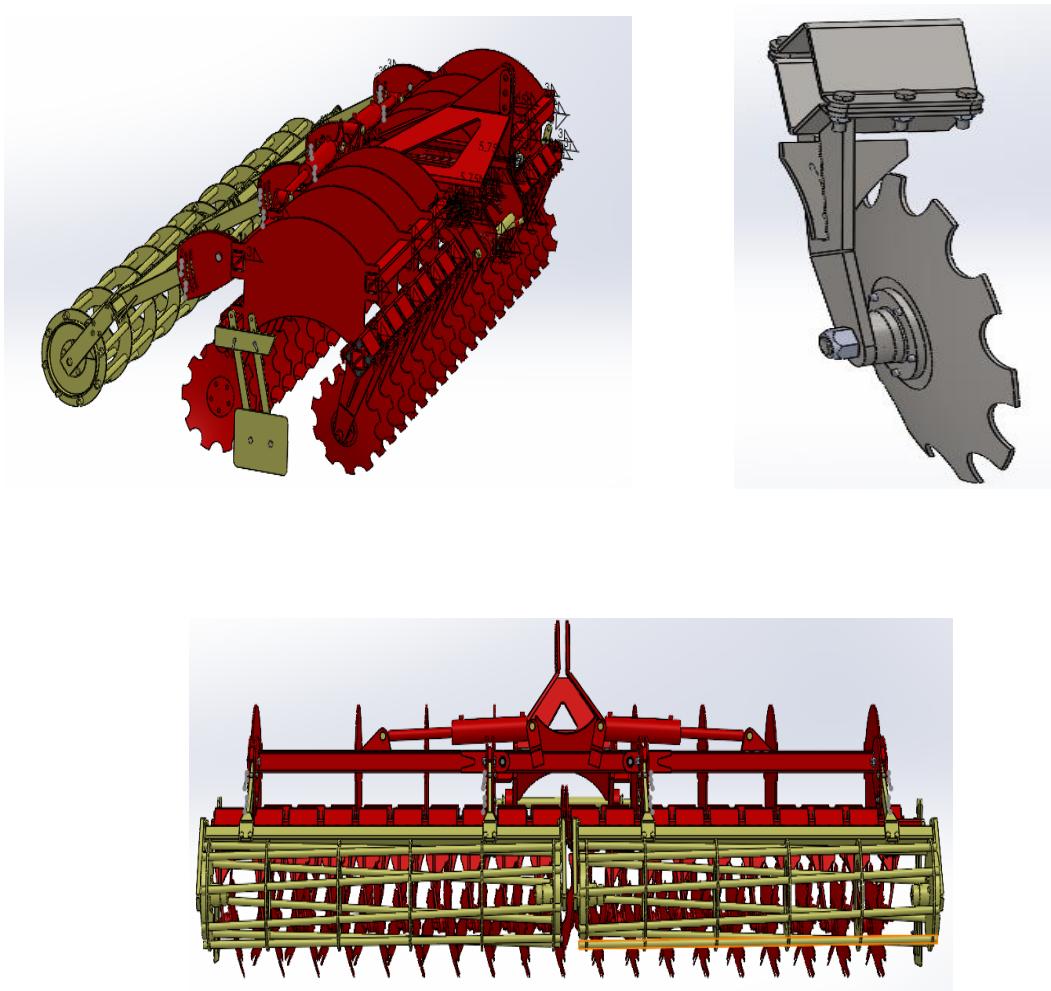
Autor/es:
Melquiades Royo Abadía

Tutor/es:
Hugo Malón Litago

Escuela de Ingeniería y arquitectura/ Universidad
de Zaragoza – diciembre 2022

ANEXO A: GEOMETRÍA DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DE LOS MODELOS

Para poder hablar de la estructura de esta máquina, lo primero que hay que hacer es un análisis en profundidad de que es lo que necesita, y las medidas de cada uno de sus componentes. Se trata de una máquina de 5 metros de anchura total, la cuál va a ir plegada en dos mitades, y que cuenta con 38 discos.

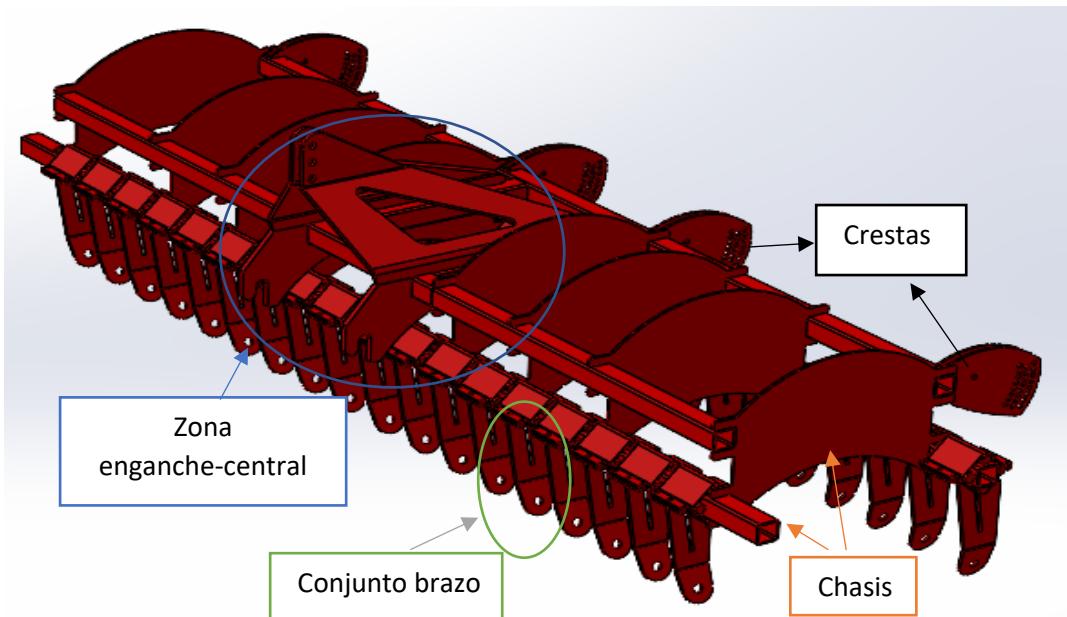


Imágenes del modelo completo y del conjunto brazo

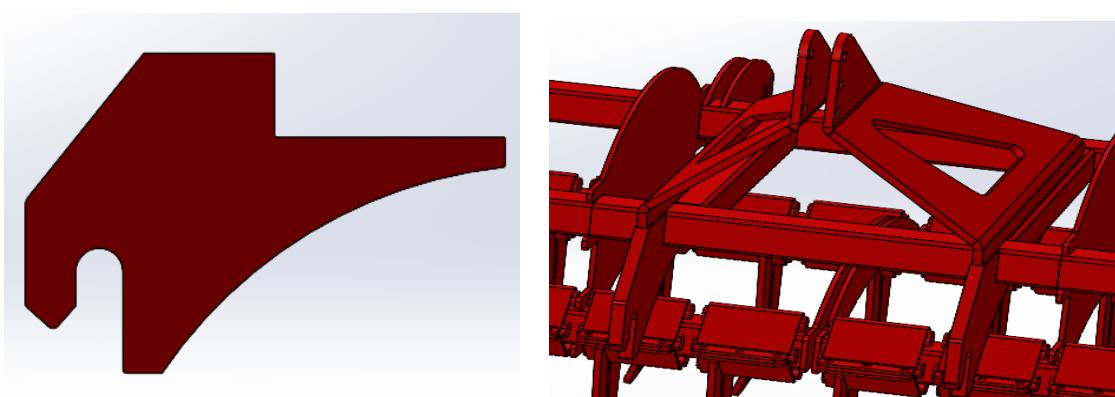
Diseño y optimización de una grada de discos

A continuación, se va a ver por separado cada una de las piezas que componen los dos modelos, que ya se nombraron en la memoria y se distinguieron con colores, dependiendo de la zona en la que se encuentren:

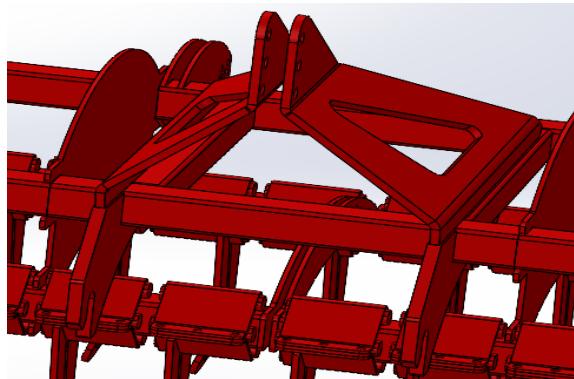
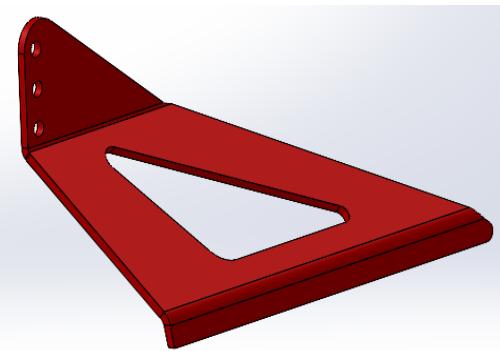
A.1 SECCIÓN 1 - BASTIDOR-CHASIS



Zona enganche-central

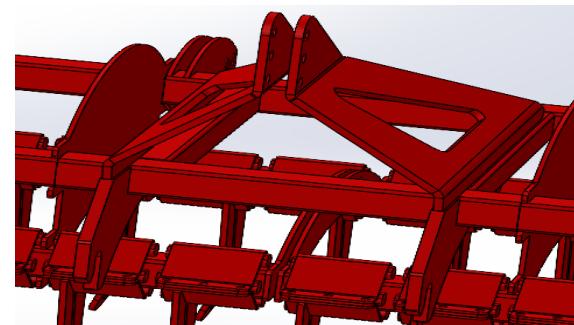
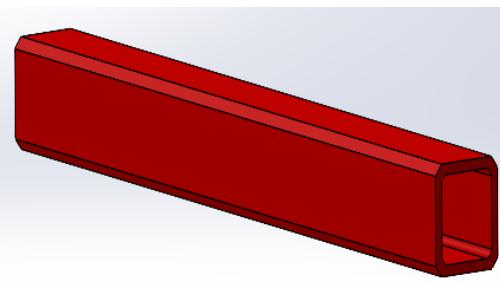


A.1: Enganche grada

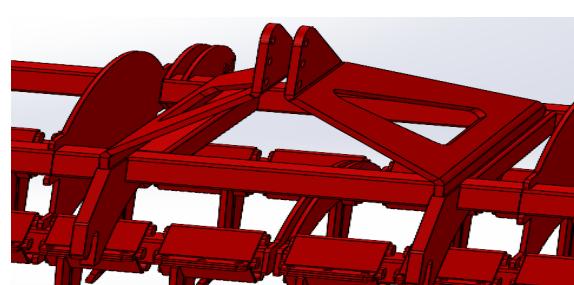
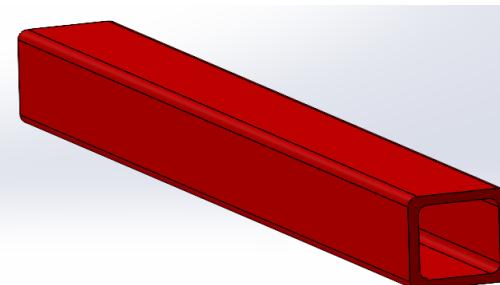


A.2: Piquete

Zona chasis

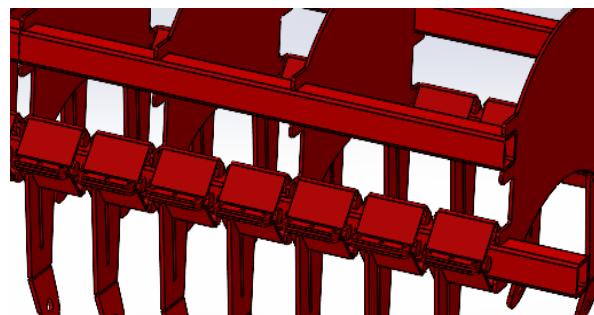
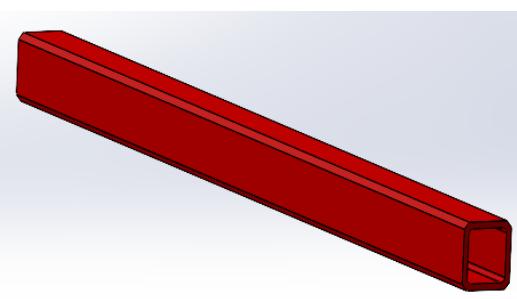


A.3: Perfil 100x100x10 de 1000 mm

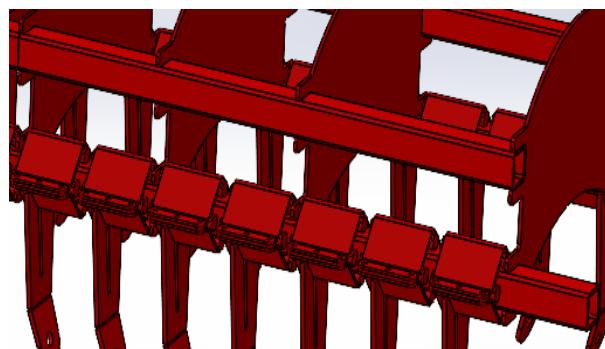
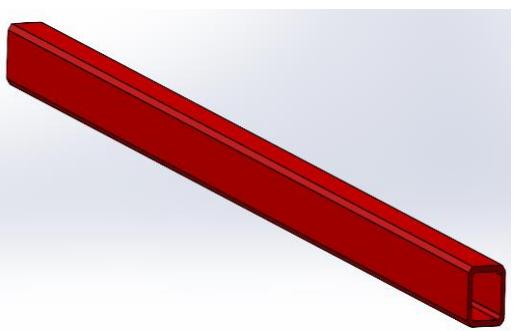


A.4: Puente del piquete 100x100x10 de 900 mm

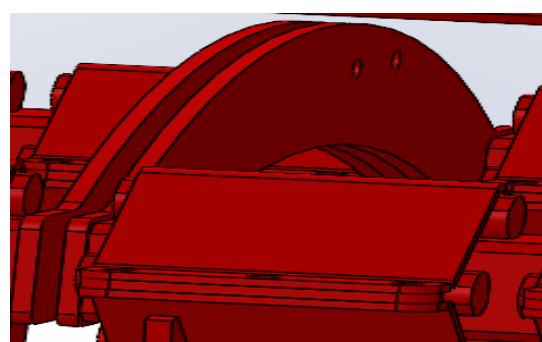
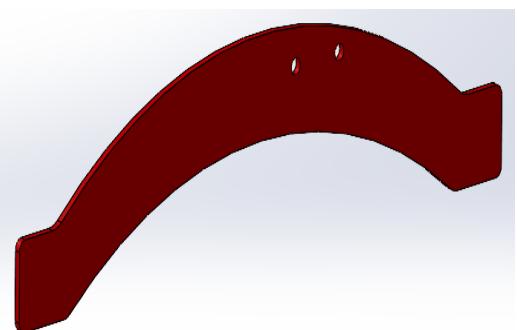
Diseño y optimización de una grada de discos



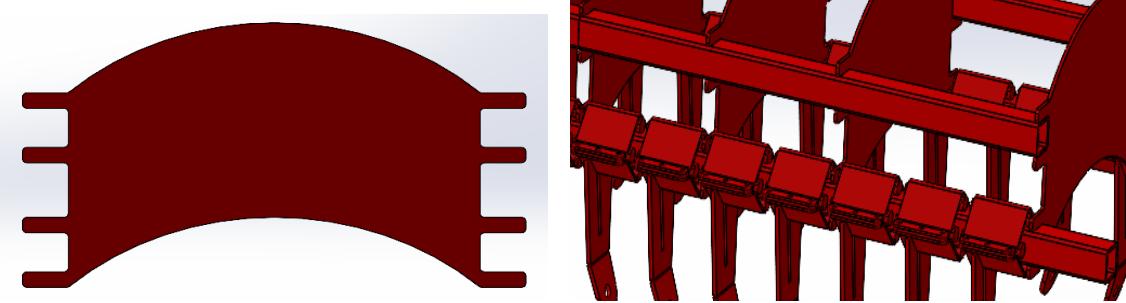
A.5: Perfil 100x100x10 de 1735 mm



A.6: Perfil 100x100x10 de 2490 mm

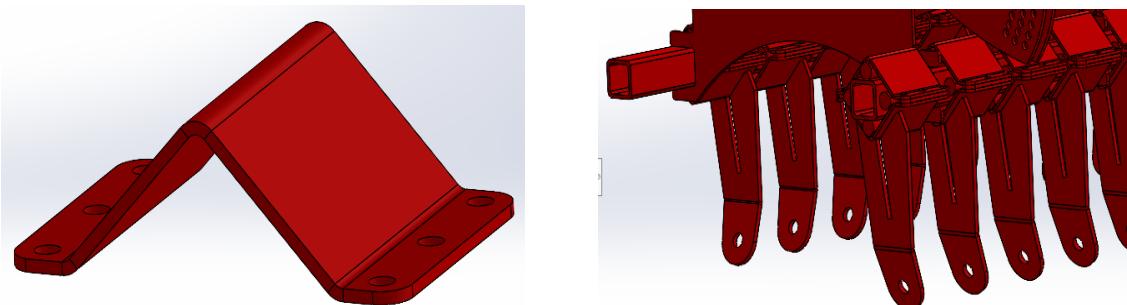


A.7: Unión exterior perfiles

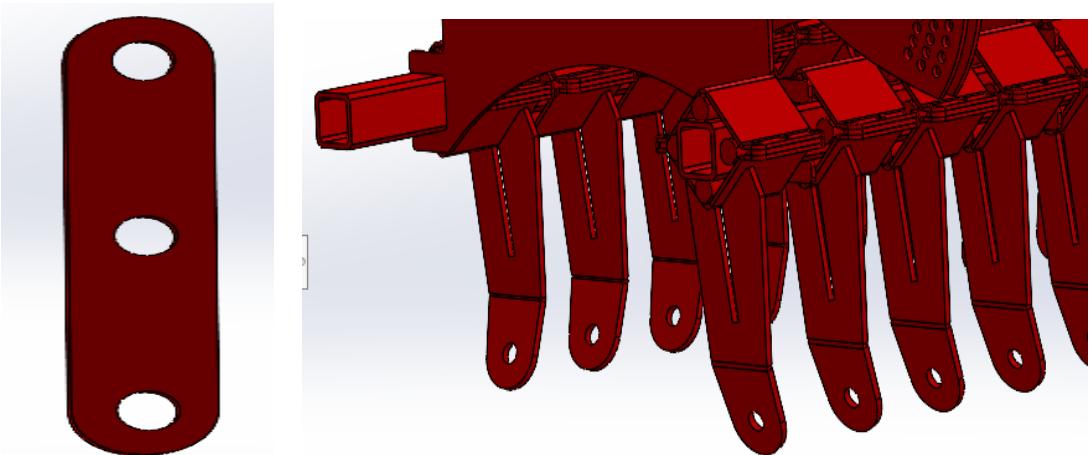


A.8: Soporte unión perfiles

Conjunto brazo

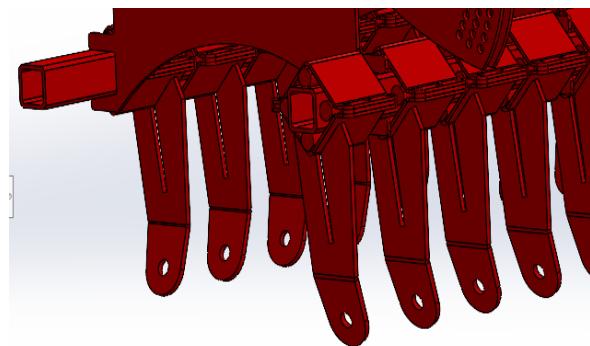
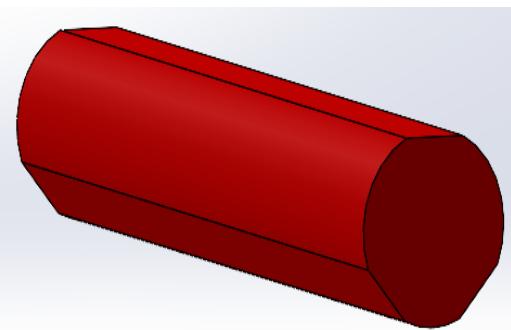


A.9: Soporte doblado brazos

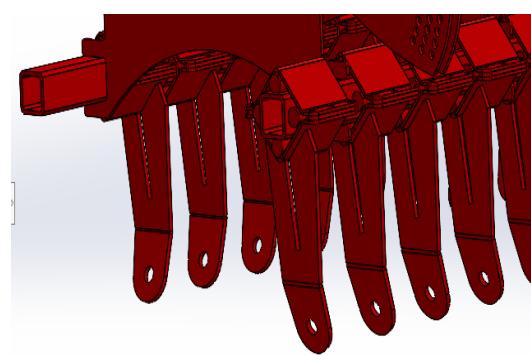
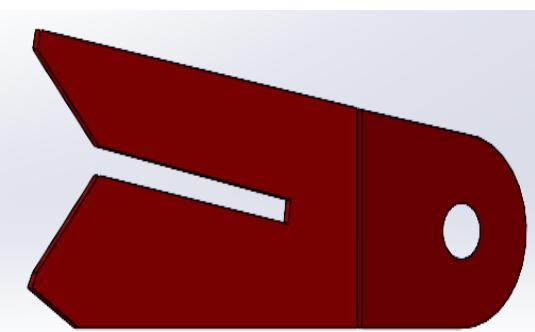


A.10: Separador bridas

Diseño y optimización de una grada de discos

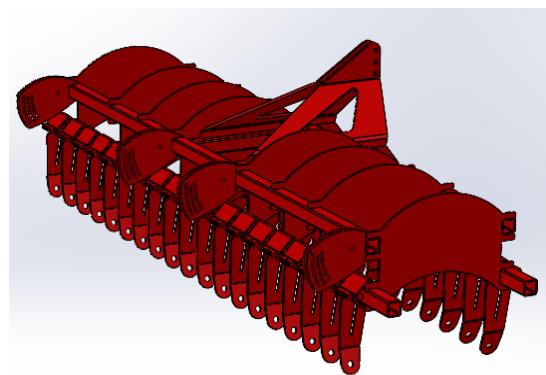
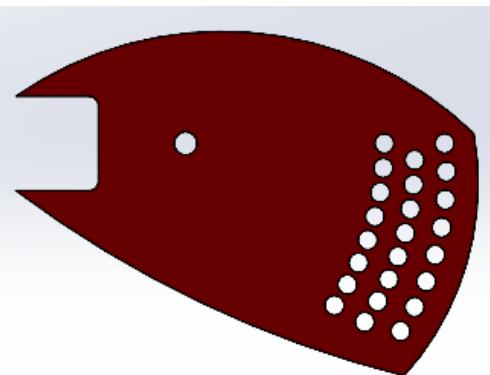


A.11: Elastómero



A.12: Brazo

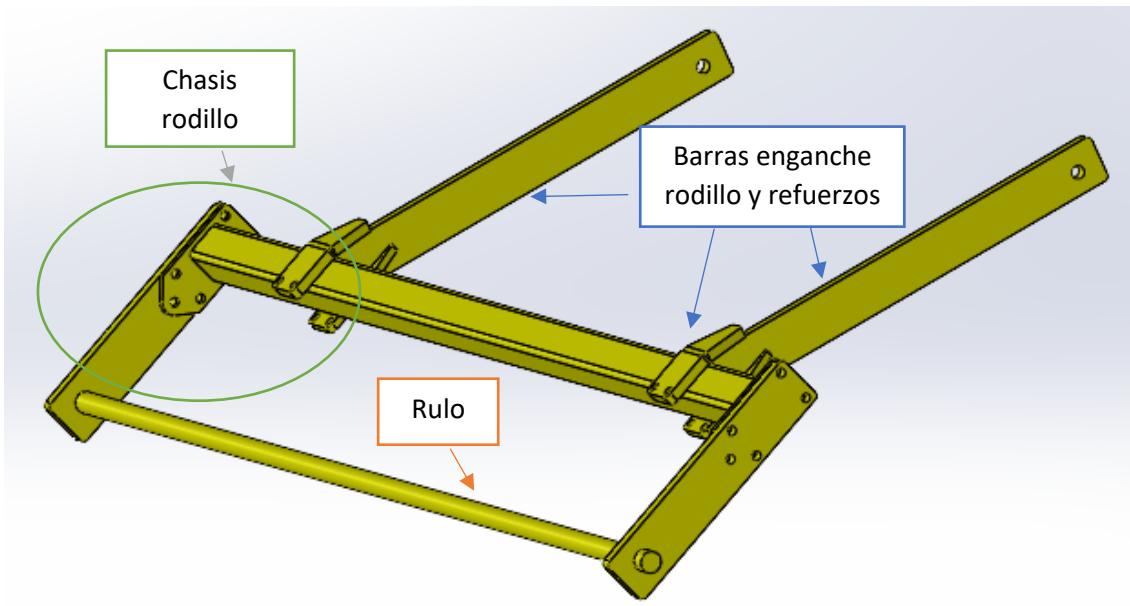
Crestas



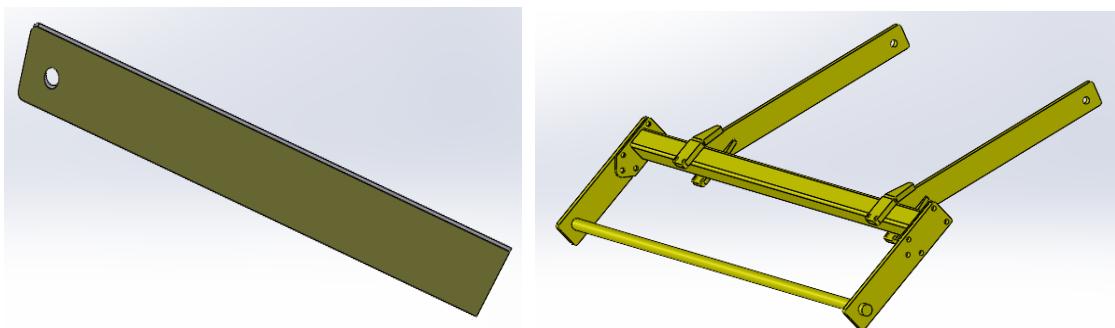
A.13: Crestas

Se han ilustrado todos los elementos que conforman el modelo chasis. A continuación, se hará lo mismo, pero con los del modelo rodillo.

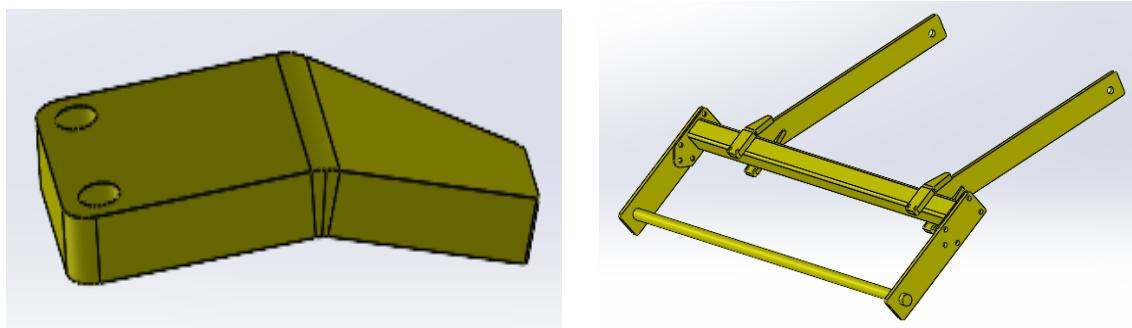
A.2. SECCIÓN 2 – RODILLO



Barras enganche rodillo y refuerzos

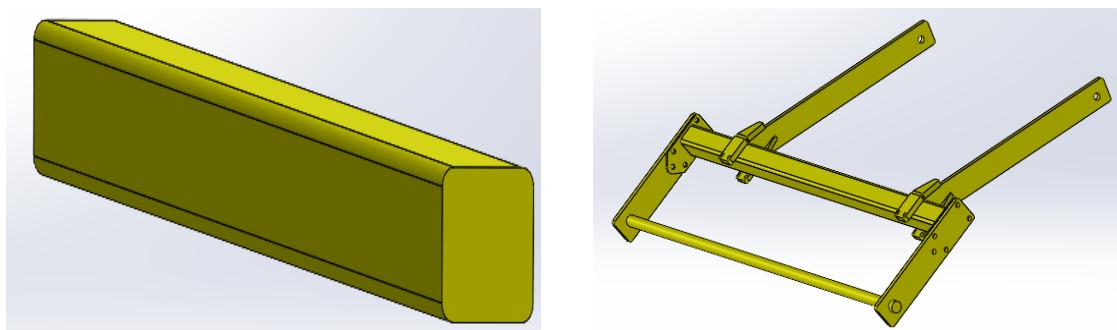


A.14: Barras rodillo

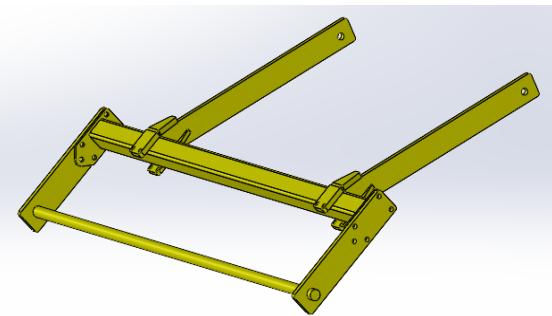
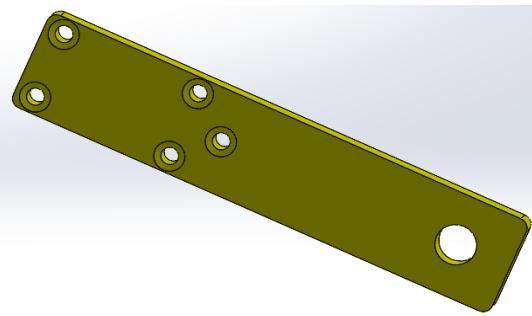


A.15: Sujeción perfil rodillo

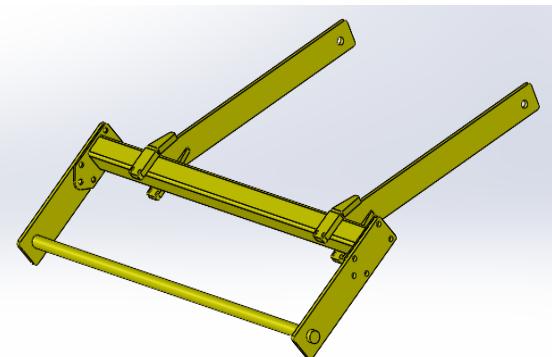
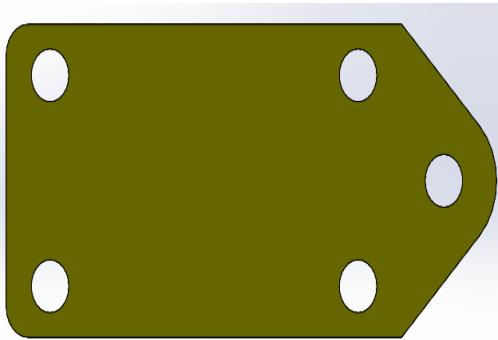
Chasis rodillo



A.16: Perfil 80x80 de 2490 mm

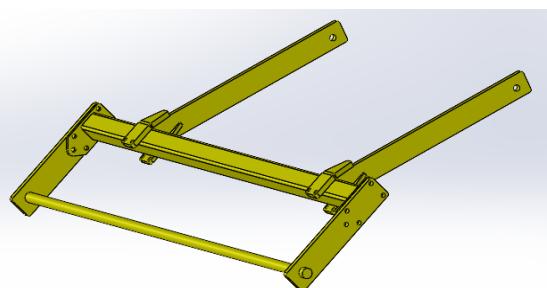
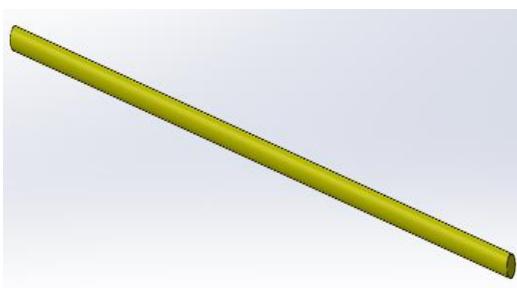


A.17: Llanta soporte rodillo



A.18: Soporte rodillo

Rulo



A.19: Varilla rulo

Diseño y optimización de una grada de discos

Esto será todo en cuanto a los elementos de los modelos, pero no hay que olvidar que se han hecho muchas simplificaciones, y que la máquina cuenta con una infinidad más de elementos, como son ejes, tapetas, rodamientos, retenes, bulones... además de elementos de unión como son tuercas, tornillos o pasadores, los cuales se ignoran todos en SolidWorks, ya que para la hora de los cálculos cuenta todo como una unión rígida.

Por ello, no podía dejar de mostrar alguna de las cosas nombradas, como son:

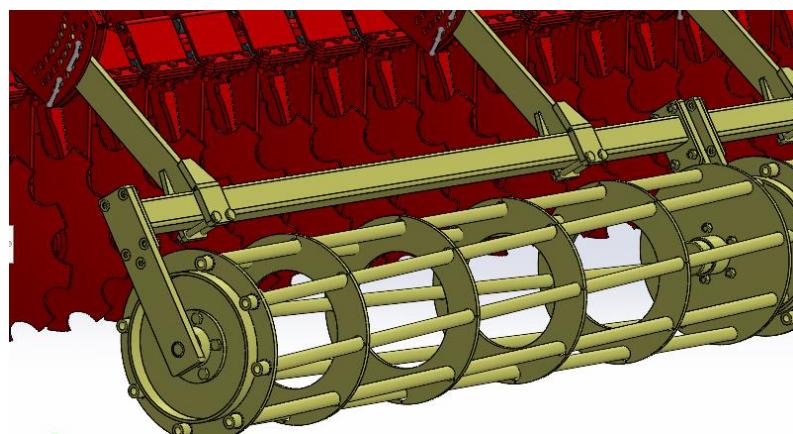


Figura A.1: Rulo entero, donde vemos las arandelas y las varillas que lo conforman

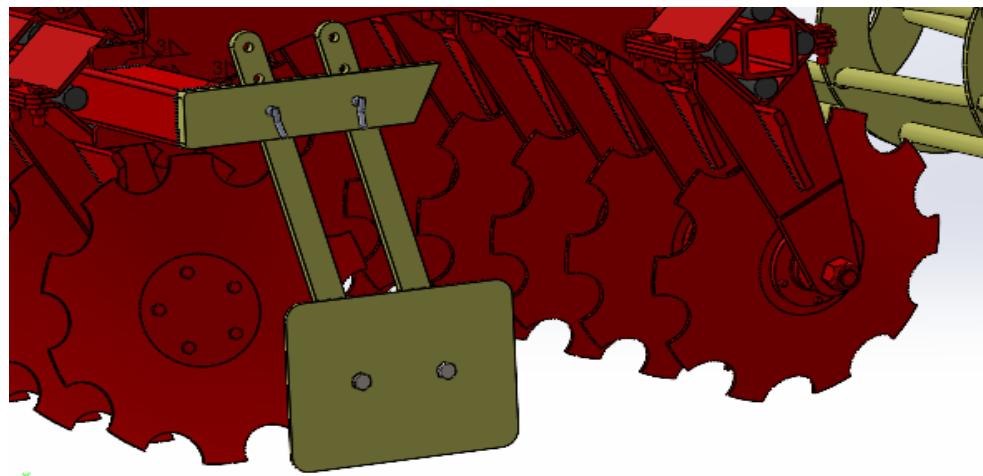


Figura A.2: Rasqueta lateral, cuya función es emparejar la tierra que está siendo movida por los discos

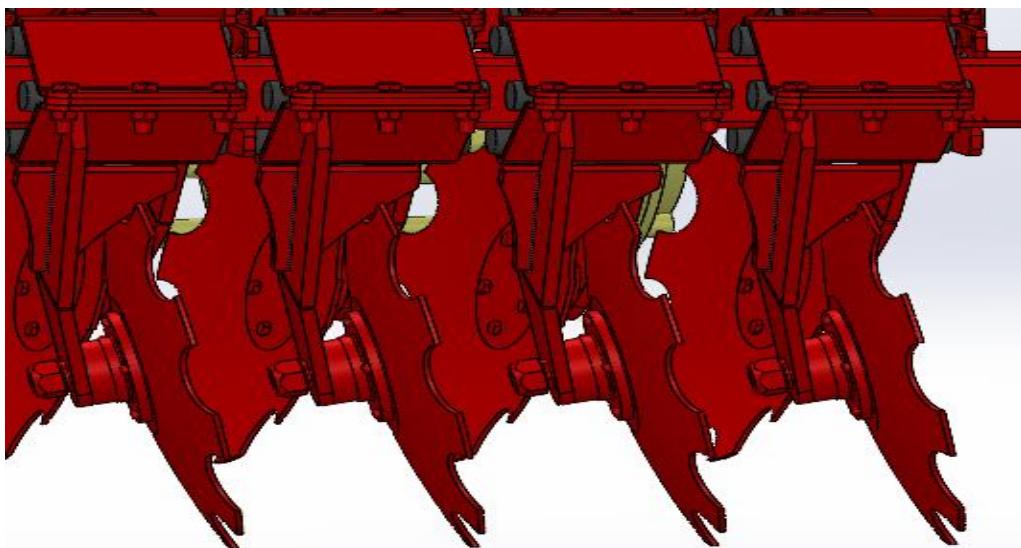


Figura A.3: Disposición de los discos en la grada, en la que se ve su montaje en el soporte del brazo, y la distancia correspondiente entre ellos

ANEXO B: ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA Y DISCRETIZACIÓN

En la grada de discos, hay que tener en cuenta varios aspectos a la hora de definir la geometría:

- Cuanta es la separación que lleva de normal un tractor en el tripuntal. Actualmente, suele ser de unos 950 mm.
- Calcular la longitud de perfiles necesarios para cubrir los 5 metros que va a llevar la máquina, y como se van a unir.
- La distribución de cada uno de los discos para que no nos estorben.
- El acople del rodillo será desmontable, por lo que habrá que unirlo al chasis.
- El plegamiento se hará mediante unos cilindros hidráulicos.

Si no se han definido todos aspectos nombrados, no se puede realizar un modelo global y, por tanto, modelos simplificados. Para ver un poco de lo que se está hablando, una serie de detalles, tanto de la geometría como en elementos finitos:

GEOMETRÍA

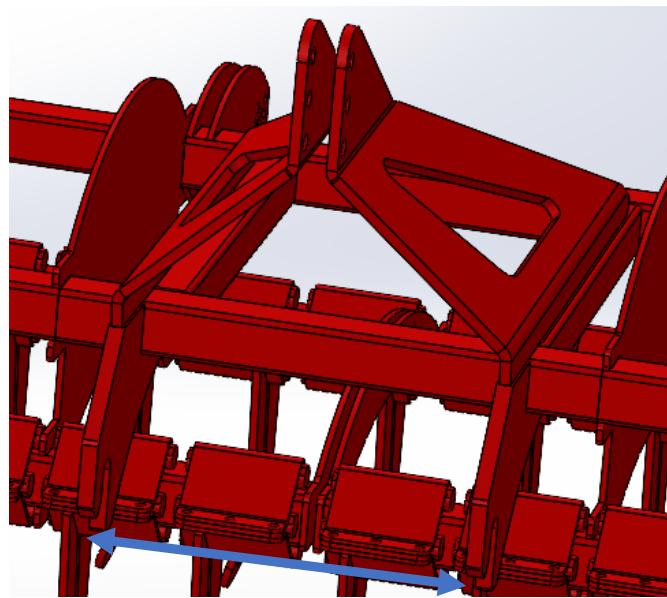


Figura B1: la distancia correspondiente es de 950 mm

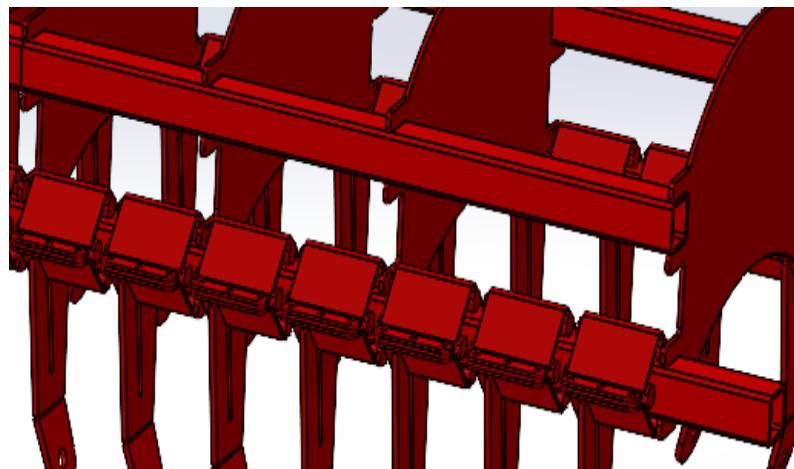


Figura B2: Tanto el perfil delantero como trasero está formado por 19 discos, cuya separación estándar entre cada uno de ellos es de 246 mm

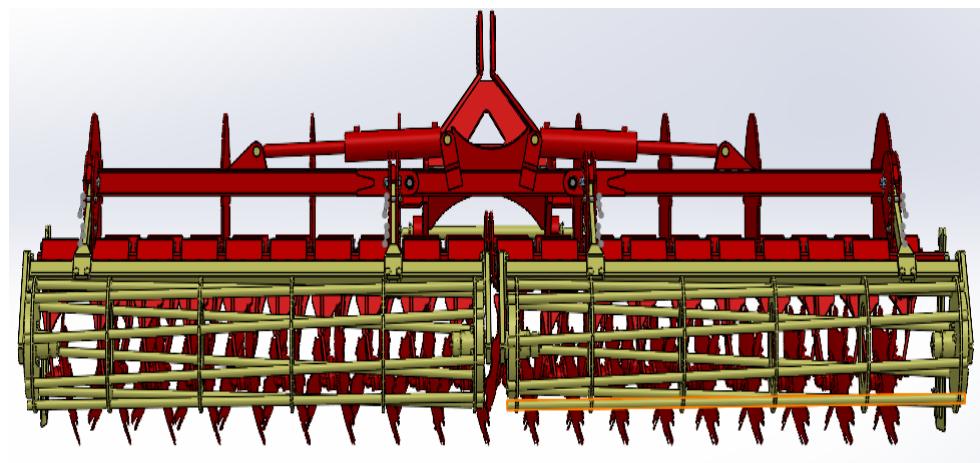
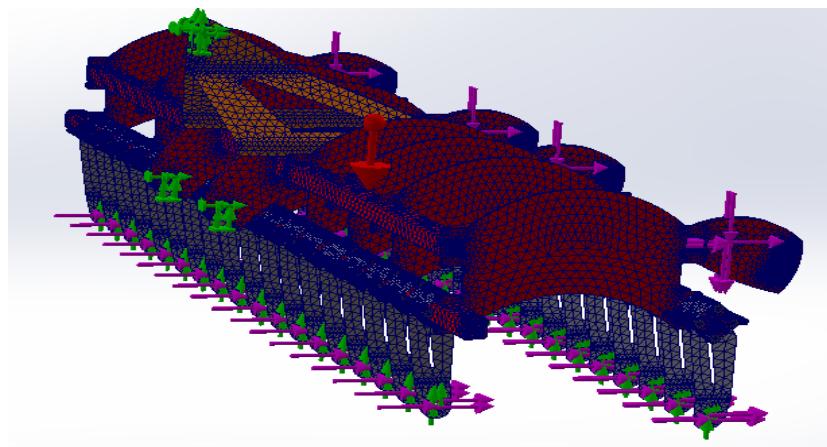
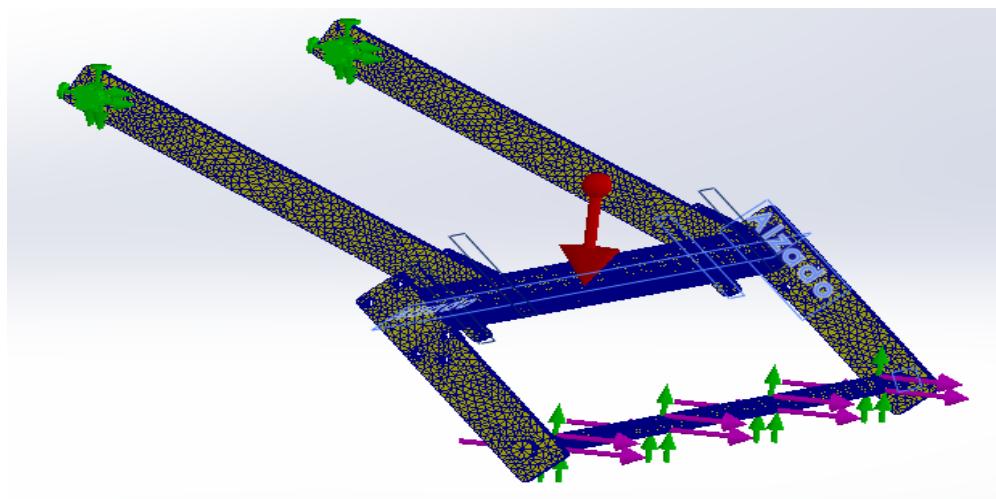


Figura B3: Colocación de los pistones hidráulicos

MODELO EN ELEMENTOS FINITOS



Estudio
Grados de libertad: 4,829,601
Número de nodos: 1,388,477
Número de elementos: 1,220,827



Nombre de estudio	Ánálisis estático (curvatura a 45 mm) (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla mixta
Mallador utilizado	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 puntos
Verificación jacobiana para el vaciado	Activar
Tamaño máx. de elemento	45 mm
Tamaño mín. de elemento	11,7651 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	92633
Número total de elementos	53440
Mallar de nuevo las piezas fallidas de forma independiente	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:27
Nombre de computadora	

Figura B4 Y 5: Discretización del modelo chasis y modelo rodillo junto con los detalles de sus estudios

ANEXO C: FUERZAS

En este anexo, se va a especificar cuáles son los cálculos seguidos para la obtención de las 2 fuerzas principales de la grada de discos.

Han sido obtenidas bajo el libro **“La mecanización agraria”** del autor Juan Antonio Boto Fidalgo. En él, si se busca el anexo 1.- FUERZAS UNITARIAS REQUERIDAS EN EL USODE MAQUINARIA AGRÍCOLA. - (ASAE D.497.2), hay una serie de ecuaciones para todo tipo de maquinaria agrícola.

Diseño y optimización de una grada de discos

Para mi caso, se irá al apartado de **grada de discos**, en donde se especifica que es una fuerza requerida en función del peso "W", expresada en Kg, para una velocidad estándar de trabajo, y cuenta con 3 casos posibles:

- Suelo arcilloso, $F = 14,7 \times W \text{ (Kg)}$
- Suelo franco, $F = 11,7 \times W \text{ (Kg)}$
- Suelo franco-arenoso, $F = 7,8 \times W \text{ (Kg)}$

El modelo completo pesa unos 3500 kg, de los cuales 2528 Kg corresponden al chasis y el resto, al rodillo.

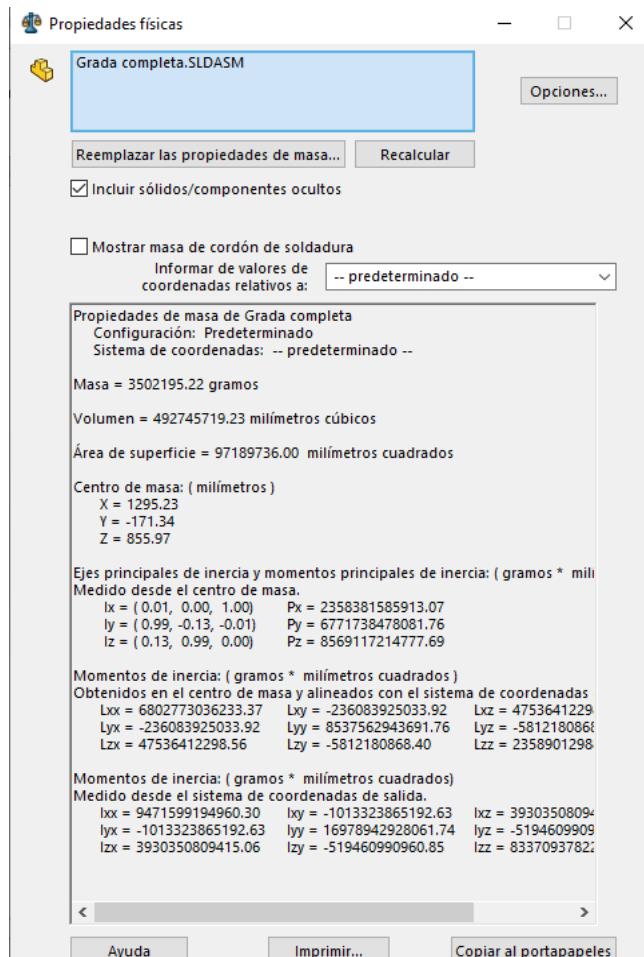


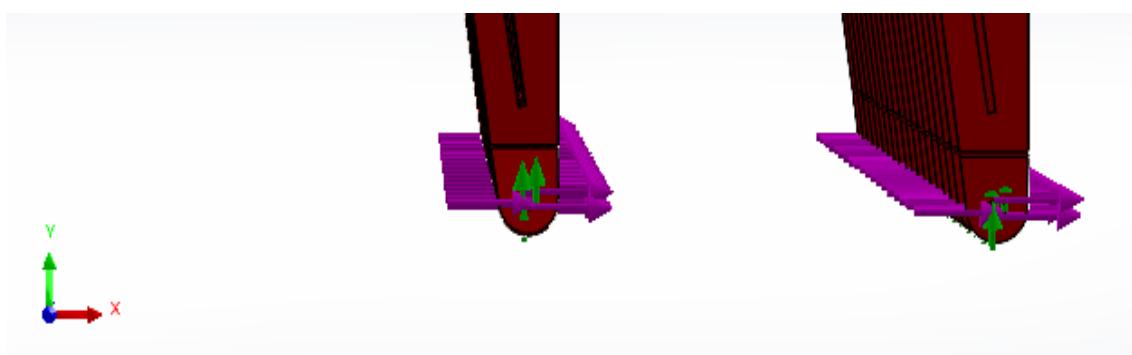
Imagen C.1: Propiedades físicas de la grada de discos

Diseño y optimización de una grada de discos

Como no podía ser de otra forma, voy a ir al caso más desfavorable, ya que si con este cumple, con el resto también. En un suelo arcilloso, la fuerza va a ser:

$$F = 14,7 \times 2528 = \mathbf{37160 \text{ N}}$$

Como bien se dice al final del anexo, las unidades de los resultados obtenidos son en Newtons, por lo que este cálculo podrá llevarse directamente a SolidWorks. Le diré que me aplique el total sobre los 38 agujeros correspondientes, por lo que el programa el solo repartirá la fuerza correspondiente a cada uno de los discos. Solo faltará definirla, por lo que habrá que buscar un plano que sea paralelo al eje horizontal del modelo. De esta forma, ya habré encontrado su dirección, y el sentido será el contrario al del movimiento.



C.1: Dirección y sentido de las fuerzas

Ya se tiene definida la fuerza del chasis, por la que pasaremos a la del rodillo. Si se sigue leyendo el anexo, en el siguiente apartado aparece **otros aperos de laboreo secundario**, en donde la fuerza requerida es en función del ancho de trabajo, expresado en metros, para un suelo medio, con 4 casos posibles:

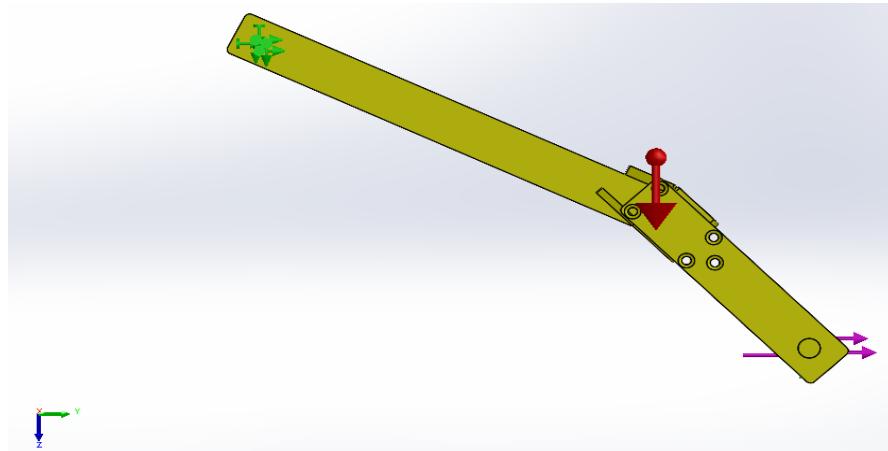
- Grada de púas rígidas, $F = (440 \text{ a } 730) \times a \text{ (m)}$
- Grada de púas flexibles, $F = (1460 \text{ a } 2190) \times a \text{ (m)}$
- Barra escardadora, $F = (880 \text{ a } 1830) \times a \text{ (m)}$
- Rodillo compactador, $F = (440 \text{ a } 880) \times a \text{ (m)}$

De las 4 opciones, mi caso es el del rodillo compactador, el cual apoya en el suelo, compacta la tierra y mezcla todo el rastrojo cortado por los discos. Cada uno de los dos rodillos va a llevar un ancho de trabajo de 2,5 metros, ya que la máquina es de 5 metros, por lo que el cálculo será el siguiente:

$$F = 880 \times 2,5 = \mathbf{2200 \text{ N}}$$

Diseño y optimización de una grada de discos

Al igual que en el caso anterior, se continua el mismo criterio, cogiendo del intervalo el valor más desfavorable, con el que obtenemos 2200 Newtons de fuerza, que se aplicaran a lo largo de la varilla, paralela al suelo y de sentido contrario al del avance.



C.2: Dirección y sentido de la fuerza

ANEXO D: RESULTADOS

A continuación, se van a mostrar más imágenes de todas las piezas que conforman cada uno de los modelos, con sus correspondientes leyendas de tensiones y desplazamientos. Una vez se obtengan los valores máximos, se podrá obtener el coeficiente de seguridad de cada una de ellas, cuyos resultados ya se han adjuntado en la memoria. Lo que no se ha mostrado son otros parámetros, como son los nudos en los que se encuentran los máximos, o cual es la media de las tensiones y desplazamientos de cada pieza.

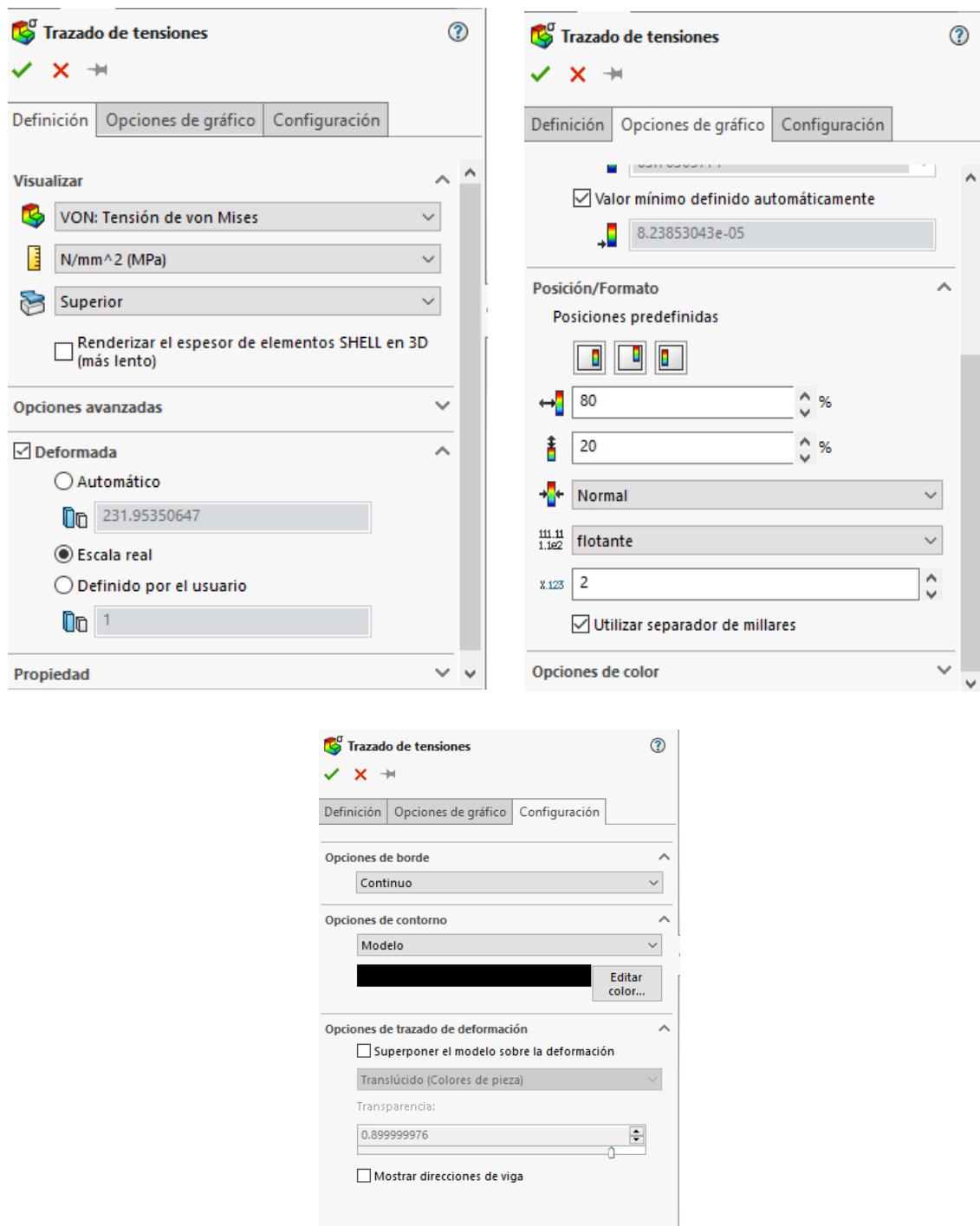
$$CS = \frac{\text{límite elástico}}{\sigma_{\text{máx}}}$$

Ecuación 1: Definición del coeficiente de seguridad

SolidWorks nos proporciona muchas configuraciones para ver los resultados. Para ello, solo tenemos que pinchar encima del recuadro de resultados configuración

Diseño y optimización de una grada de discos

definición-opciones de gráfico-configuración, y en cada una de las pestañas puedes poner las unidades que tú quieras, escalas, anotaciones máximas, mínimas, decimales etc.



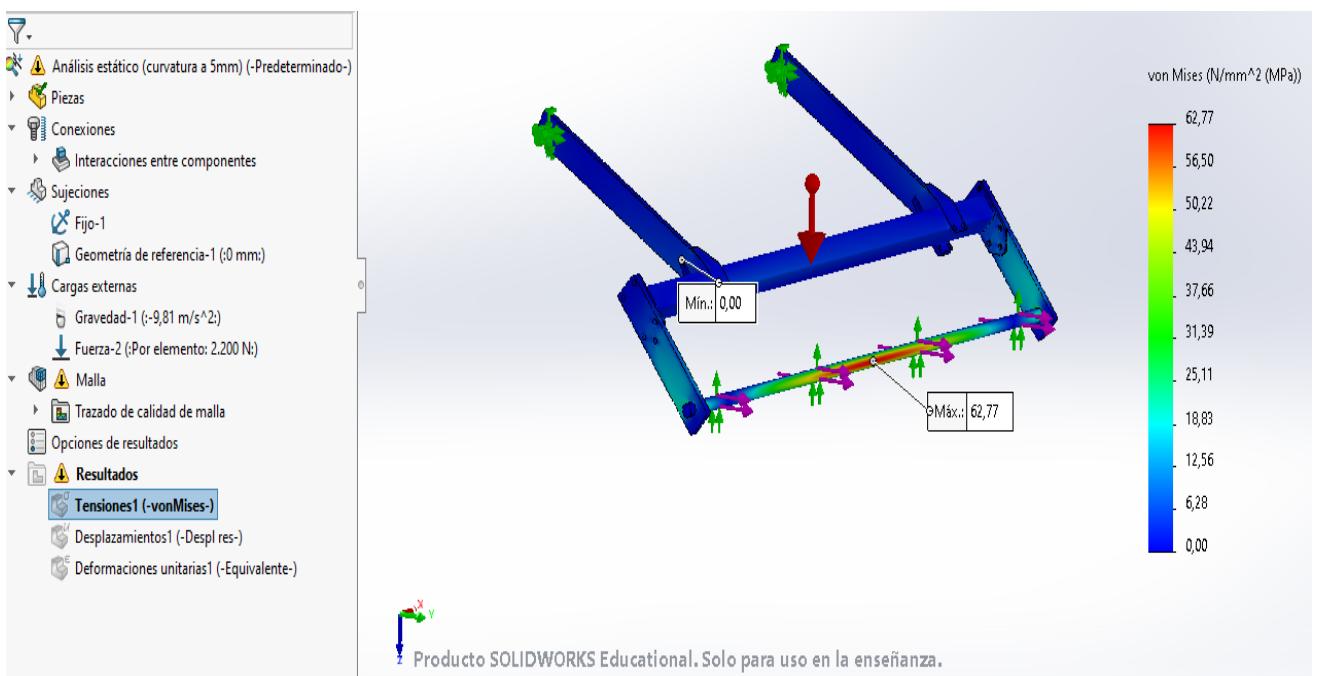
D.1: Configuración de visualización de resultados de SolidWorks

D.1 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

En la memoria, se ha llevado a cabo una definición genérica de lo que es un estudio de sensibilidad, y cuáles son sus aportaciones. Para nuestro caso, quería saber cuál es el tamaño de malla más adecuado para los modelos, y por ello se han presentado **seis casos**, que son con mallas de **5,15,30,45,60 y 80 mm**, tanto para el análisis en curvatura como para curvatura combinado. Para poder realizar las tablas junto con sus gráficas correspondientes, se han ejecutado primero todos estos casos en SolidWorks. Se van a presentar capturas de los seis casos, en donde se ven todos los valores obtenidos.

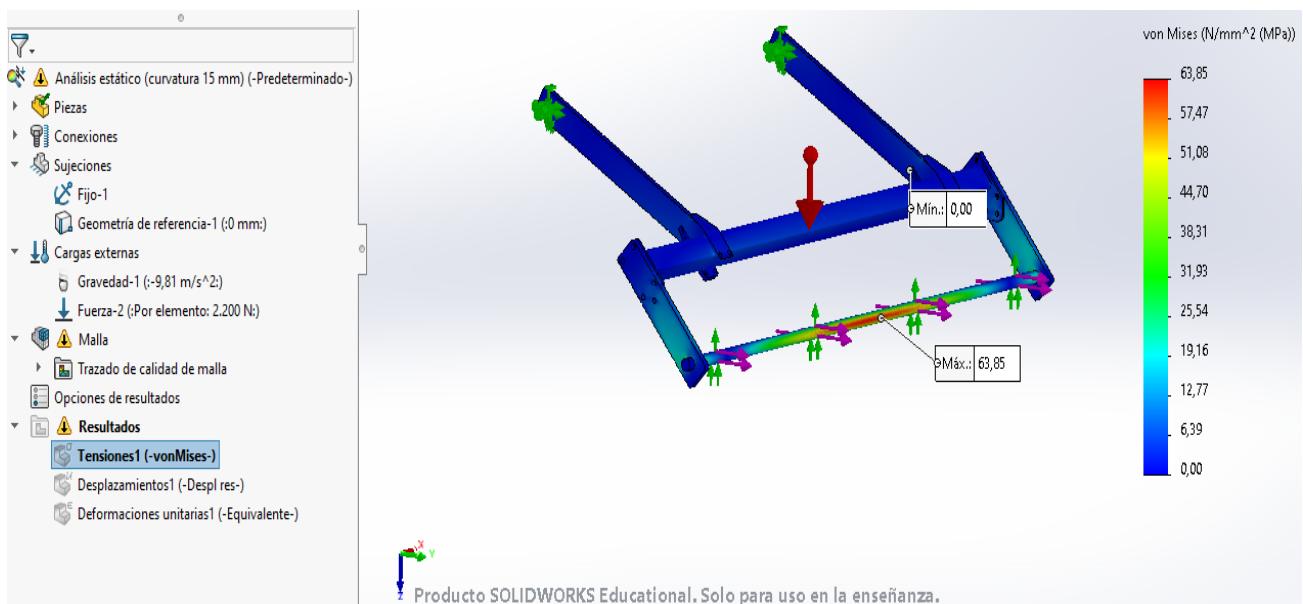
ANÁLISIS ESTÁTICO EN CURVATURA

1. TENSIONES

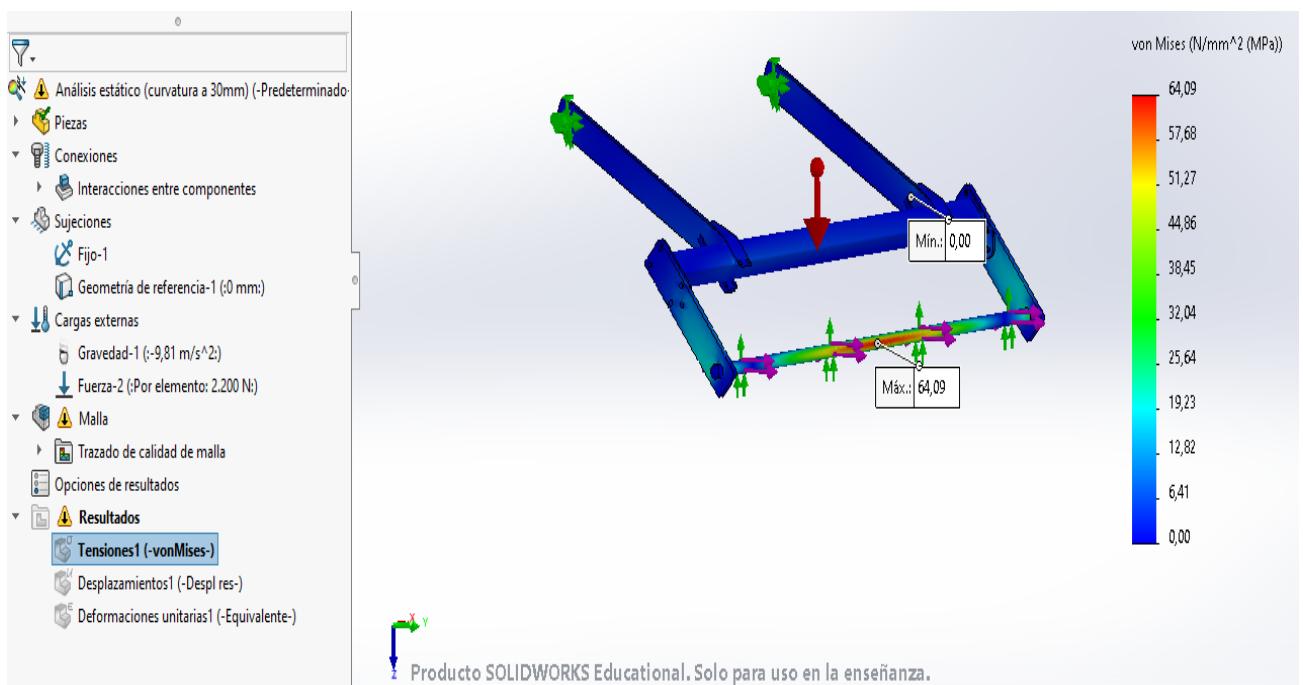


D.1: Tensiones con tamaño de malla 5 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

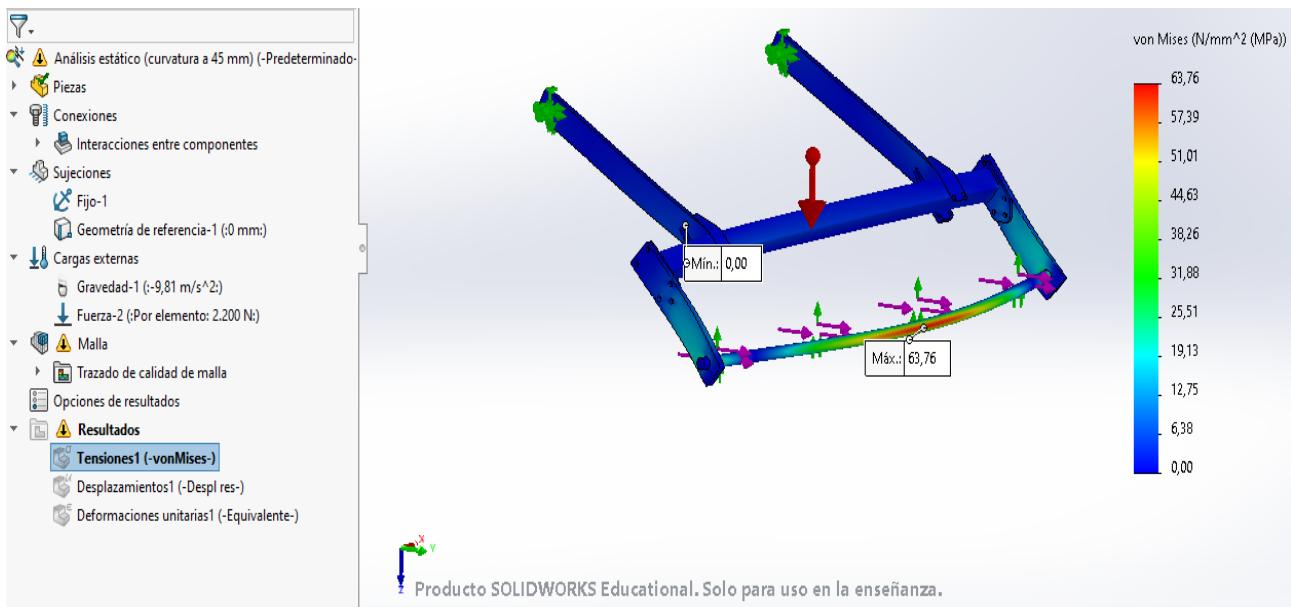


D.2: Tensiones con tamaño de malla 15 mm

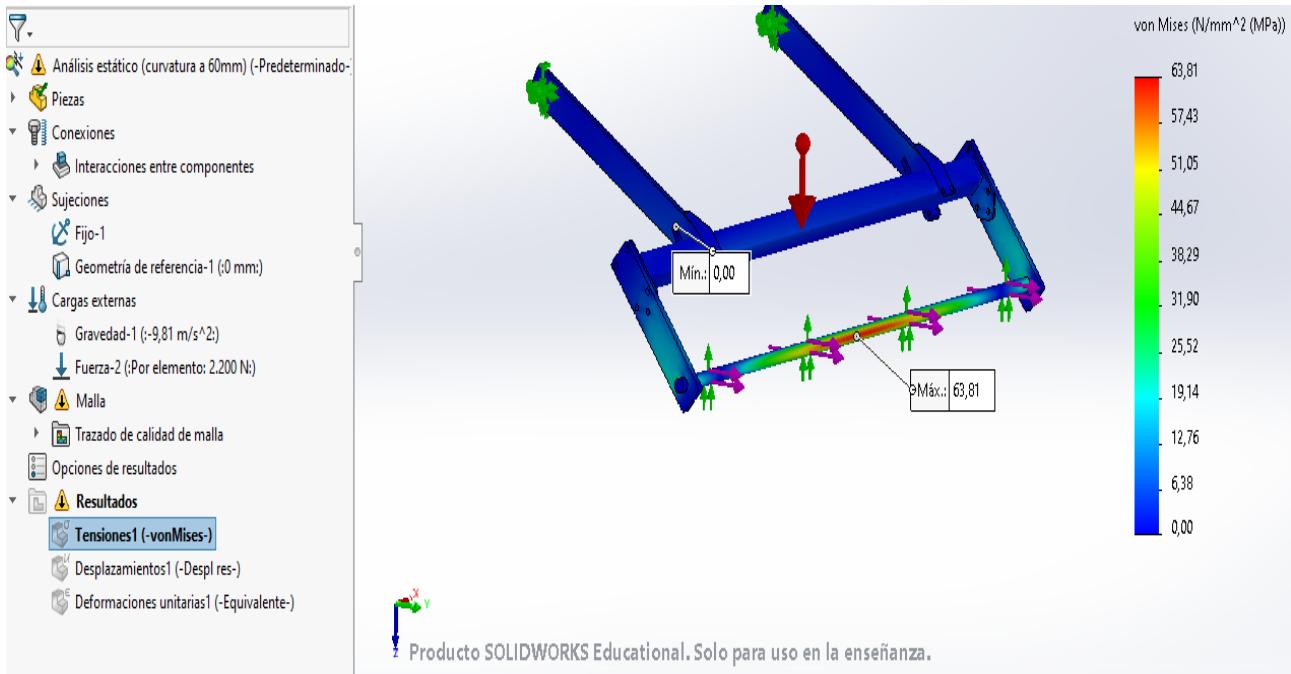


D.3: Tensiones con tamaño de malla 30 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

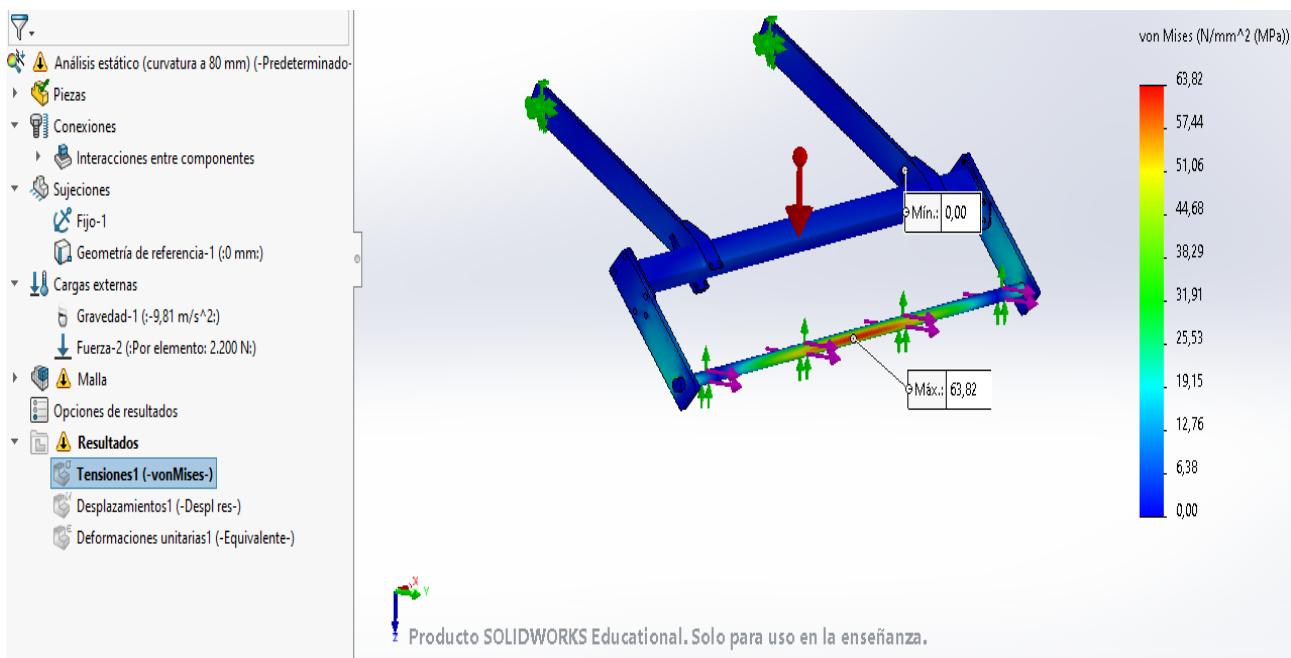


D.4: Tensiones con tamaño de malla 45 mm



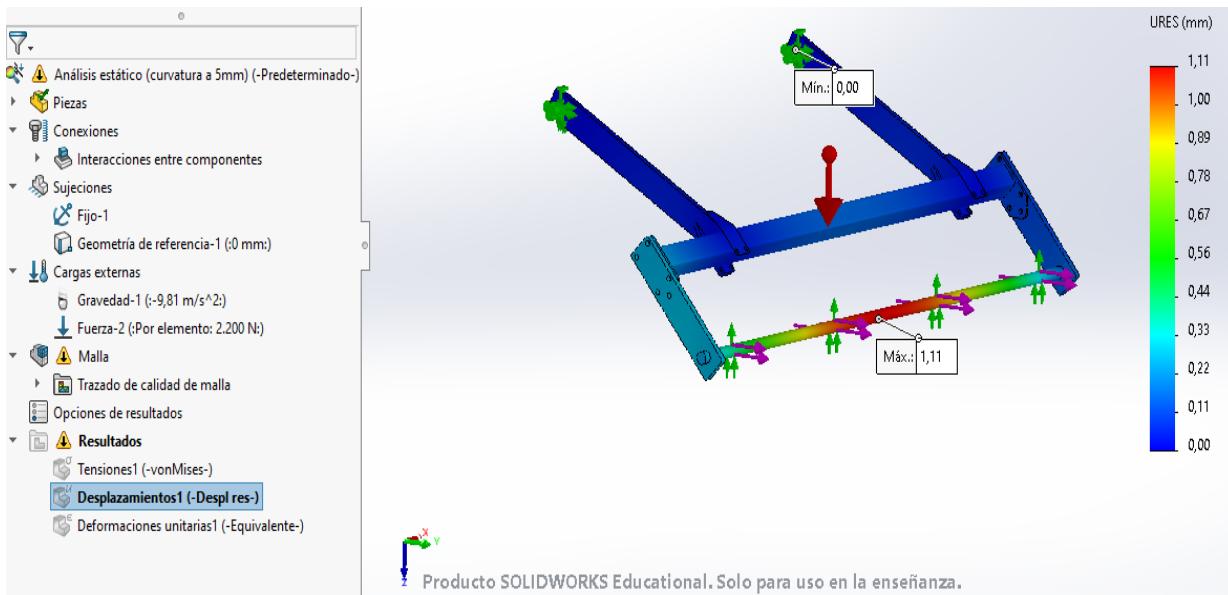
D.5: Tensiones con tamaño de malla 60 mm

Diseño y optimización de una grada de discos



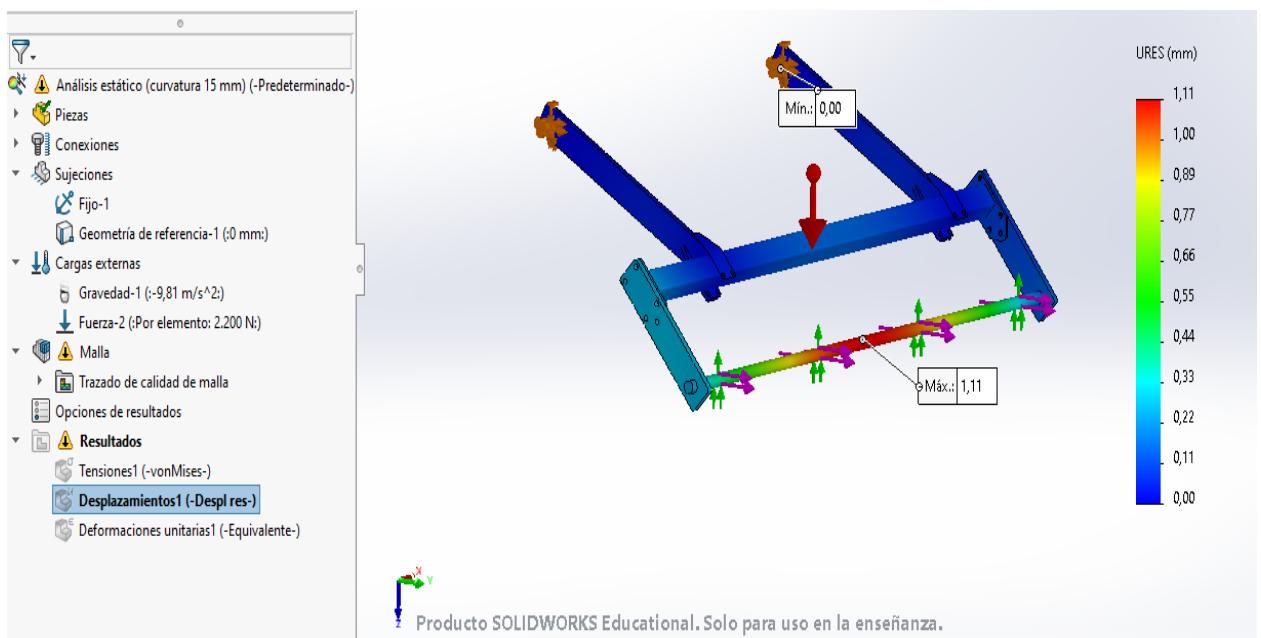
D.6: Tensiones con tamaño de malla 80 mm

2. DESPLAZAMIENTOS

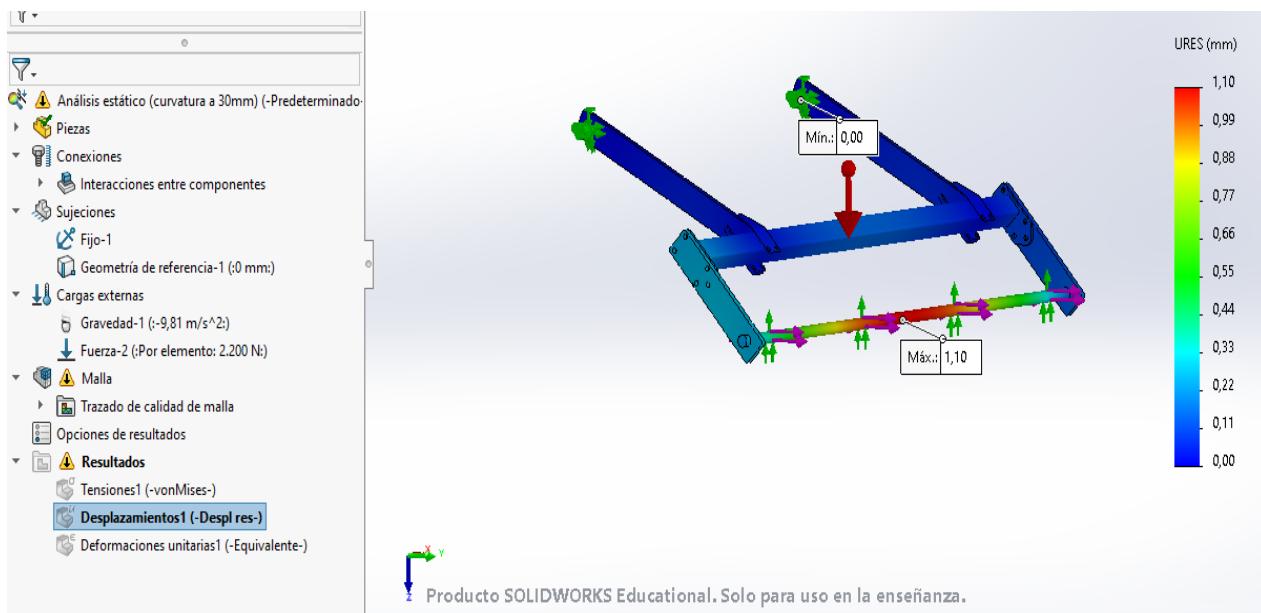


D.7: Desplazamientos con tamaño de malla 5 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

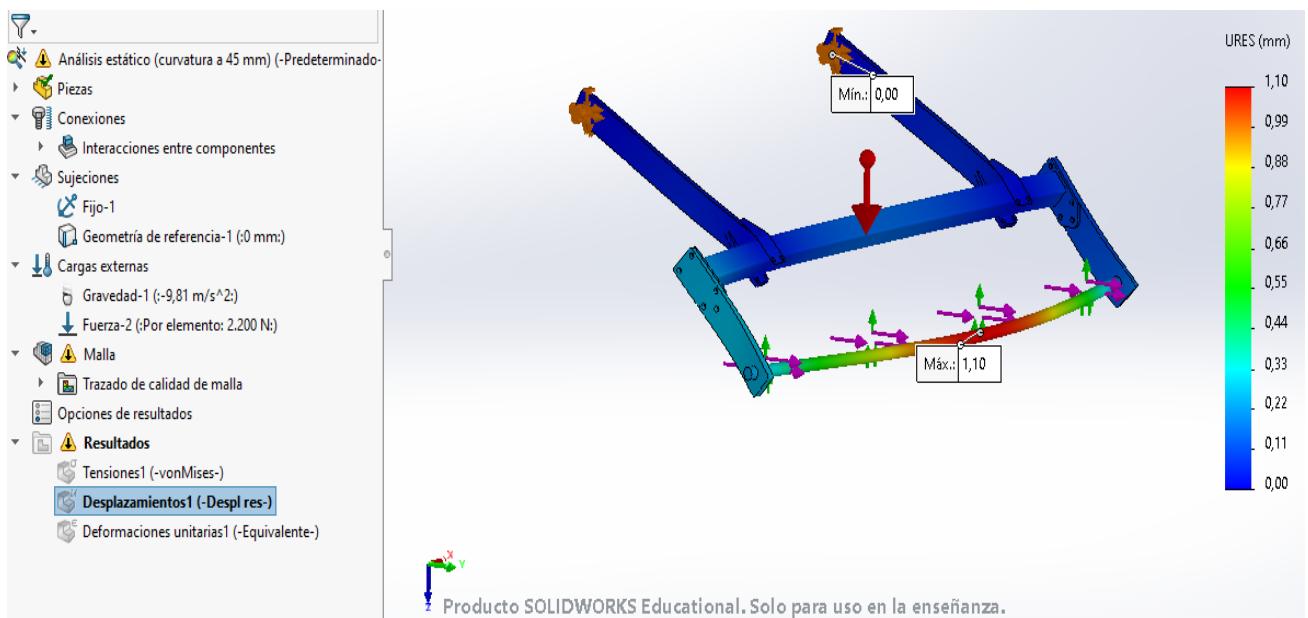


D.8: Desplazamientos con tamaño de malla 15 mm

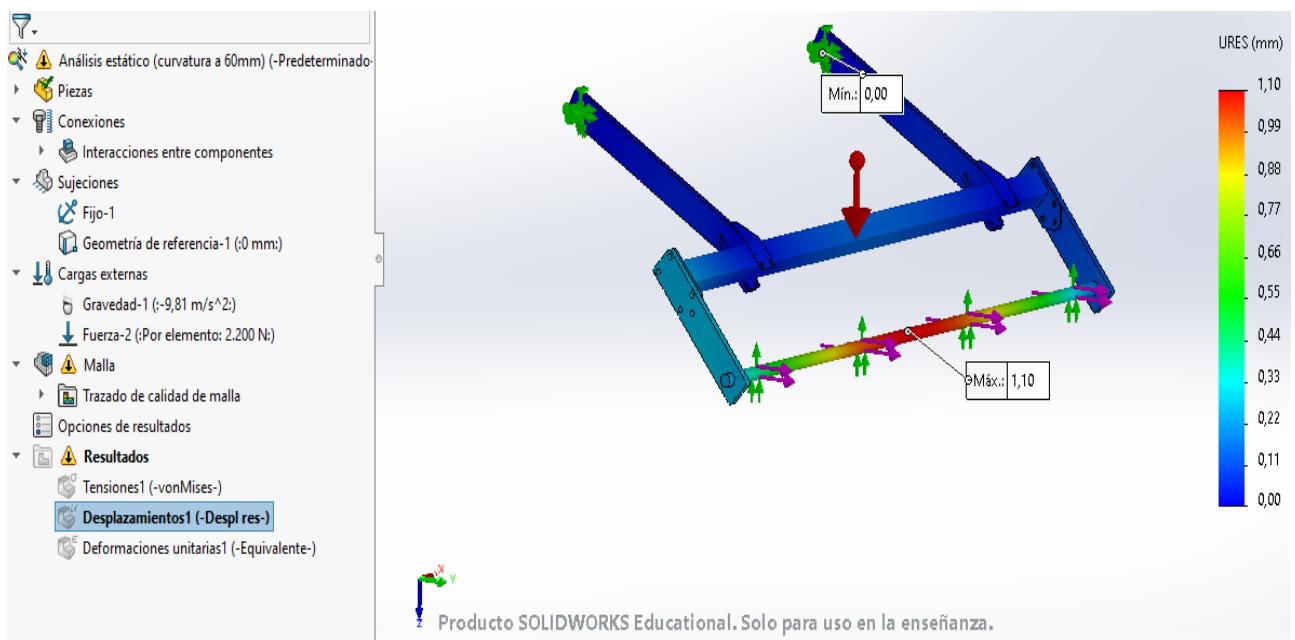


D.9: Desplazamientos con tamaño de malla 30 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

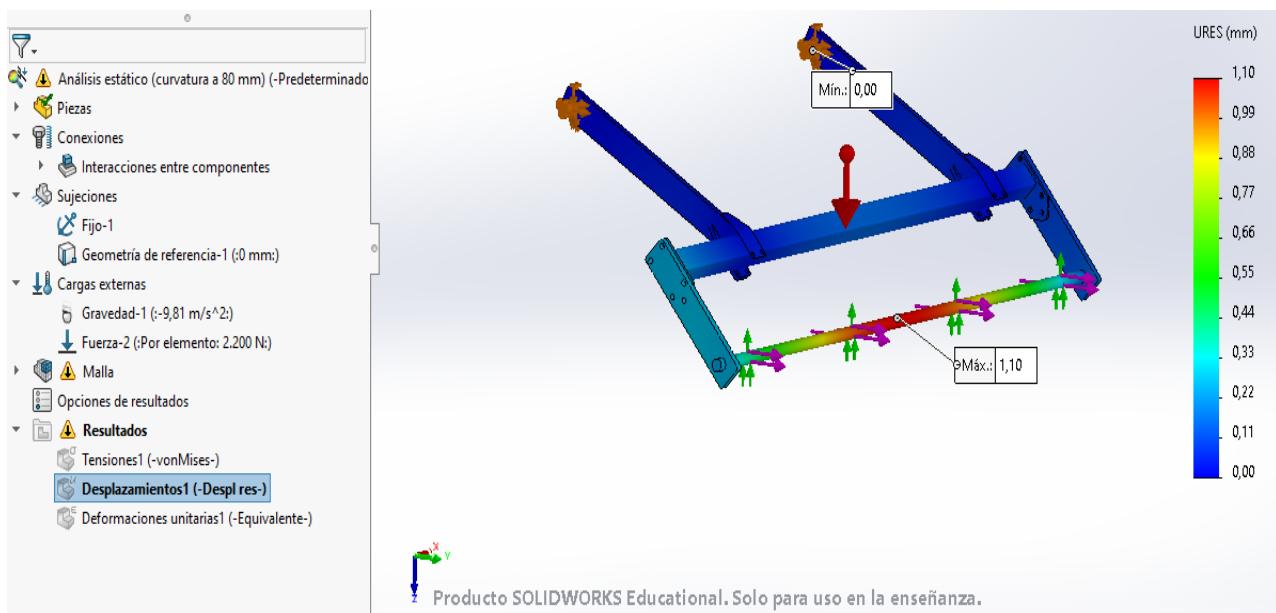


D.10: Desplazamientos con tamaño de malla 45 mm



D.11: Desplazamientos con tamaño de malla 60 mm

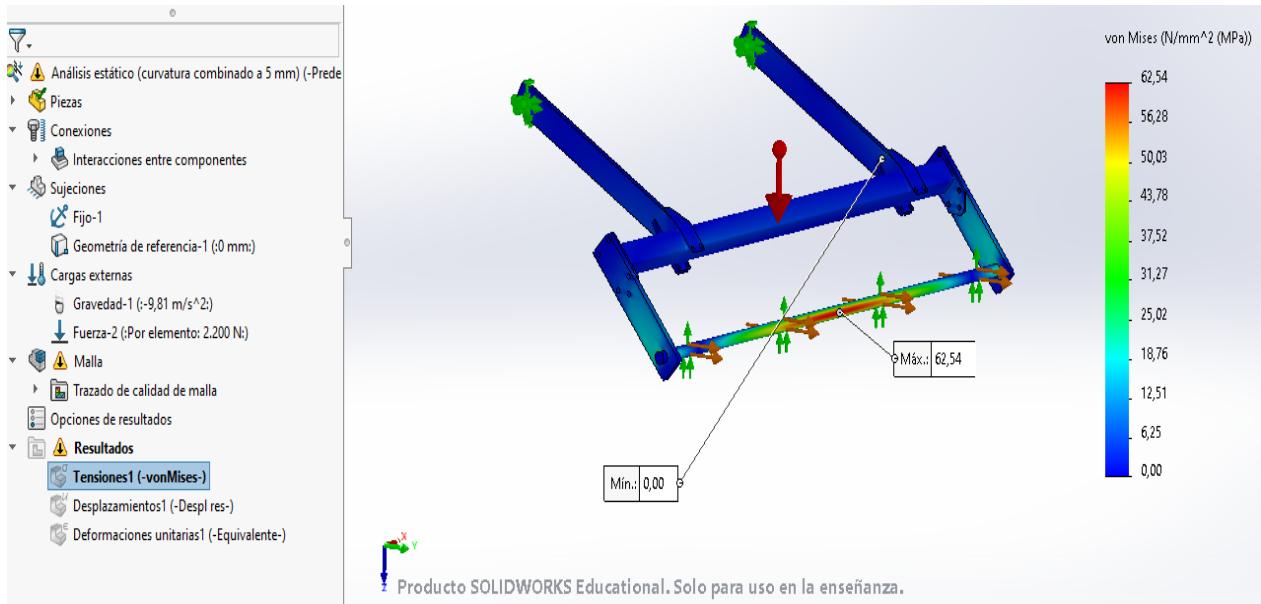
Diseño y optimización de una grada de discos



D.12: Desplazamientos con tamaño de malla 80 mm

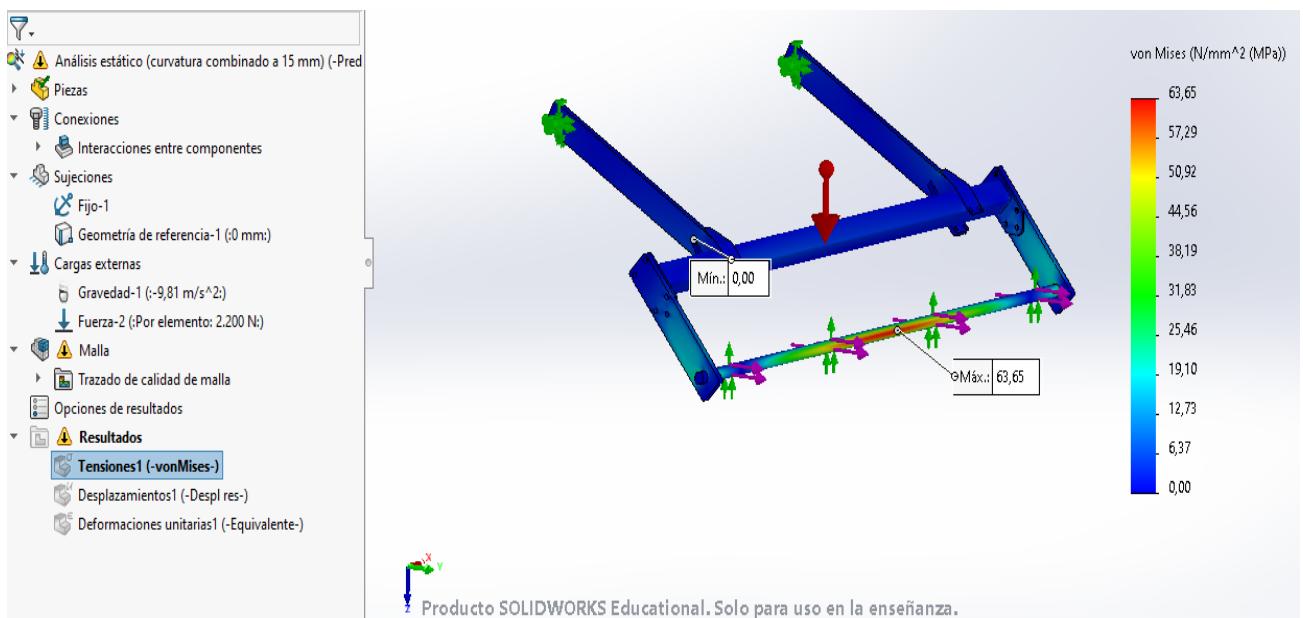
ANÁLISIS EN CURVATURA COMBINADO

1. TENSIONES

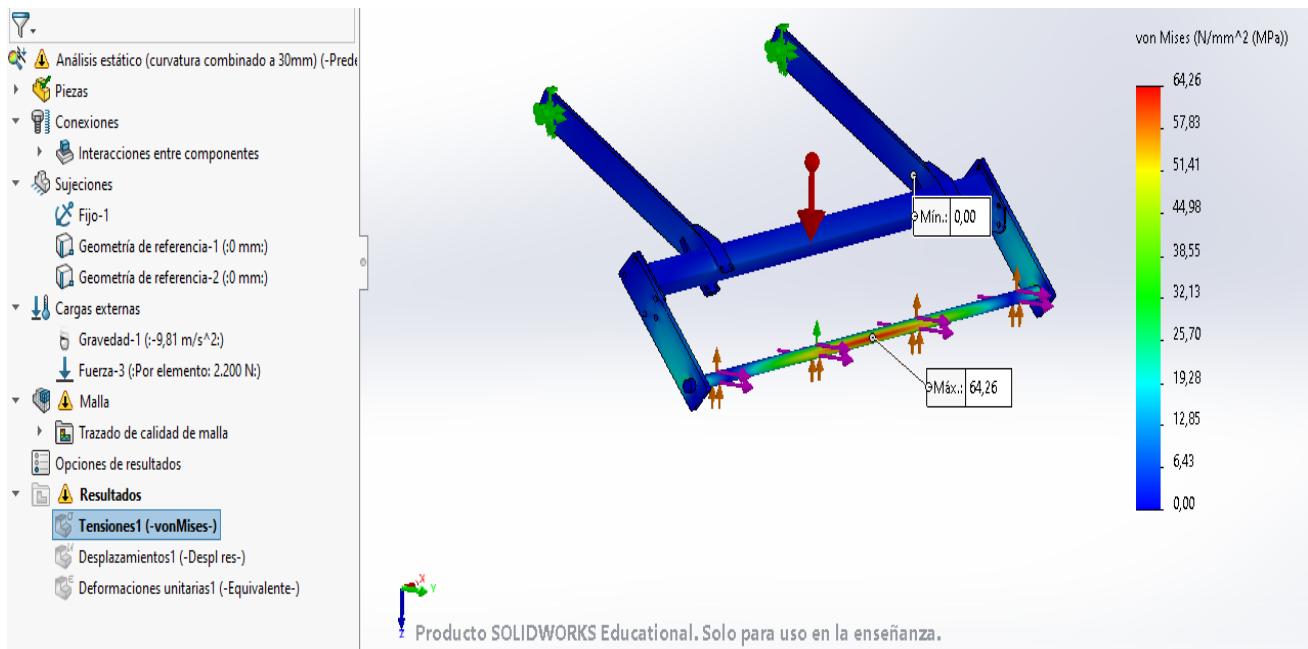


D.13: Tensiones con tamaño de malla 5 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

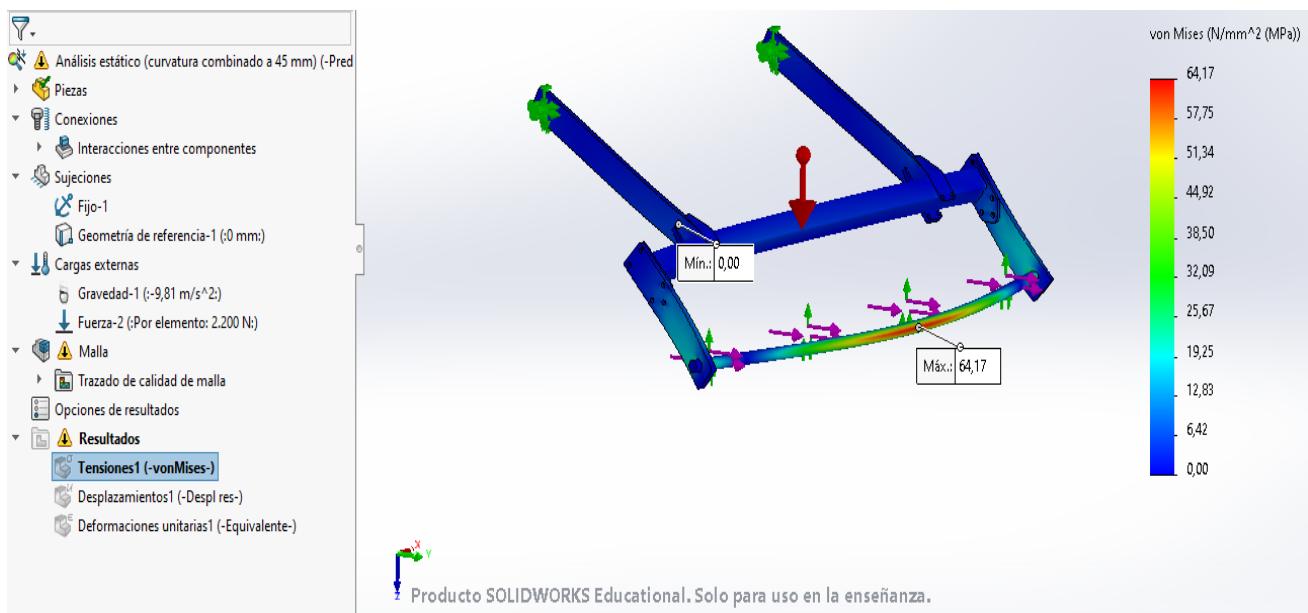


D.14: Tensiones con tamaño de malla 15 mm

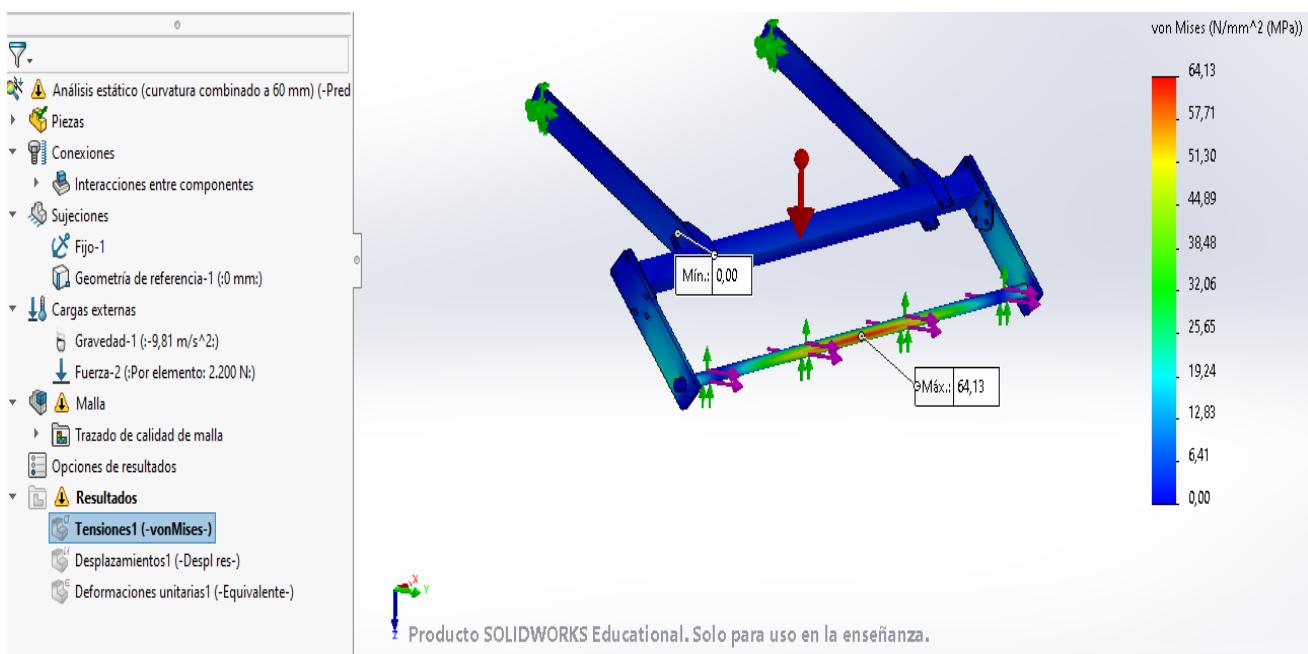


D.15: Tensiones con tamaño de malla 30 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

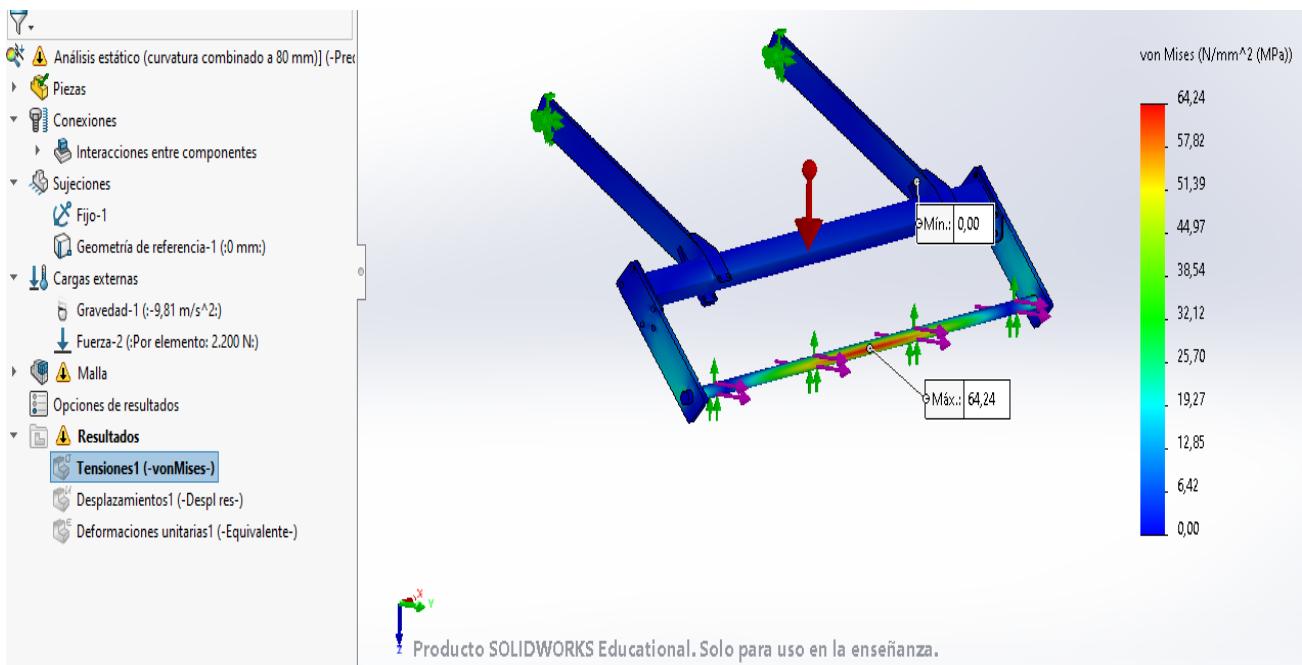


D.16: Tensiones con tamaño de malla 45 mm



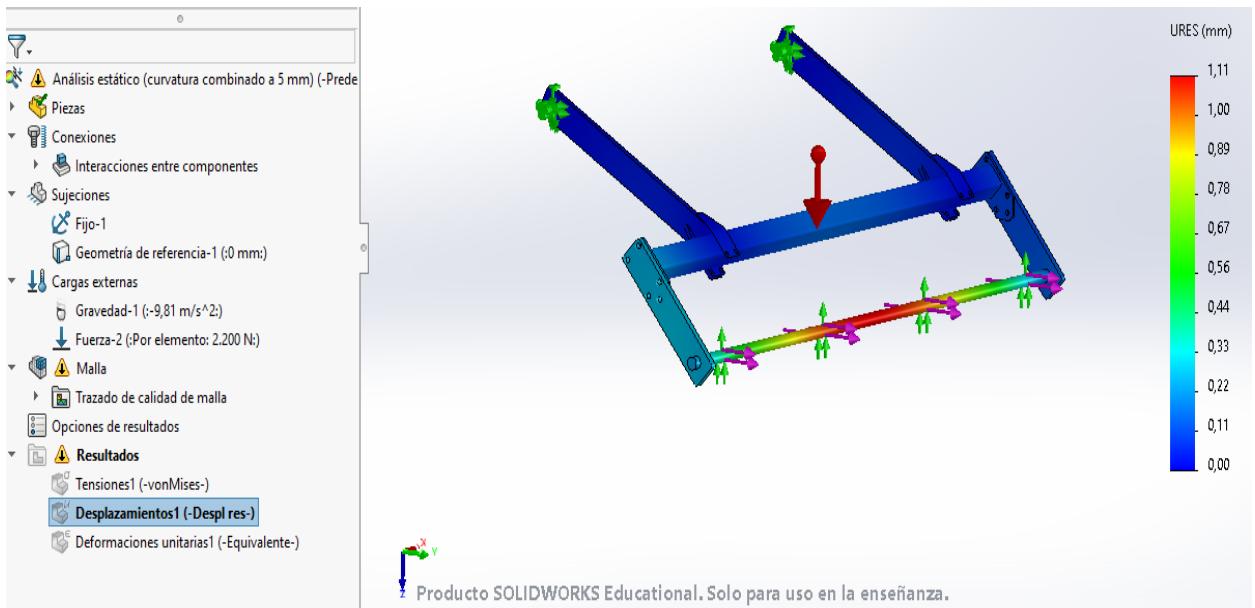
D.17: Tensiones con tamaño de malla 60 mm

Diseño y optimización de una grada de discos



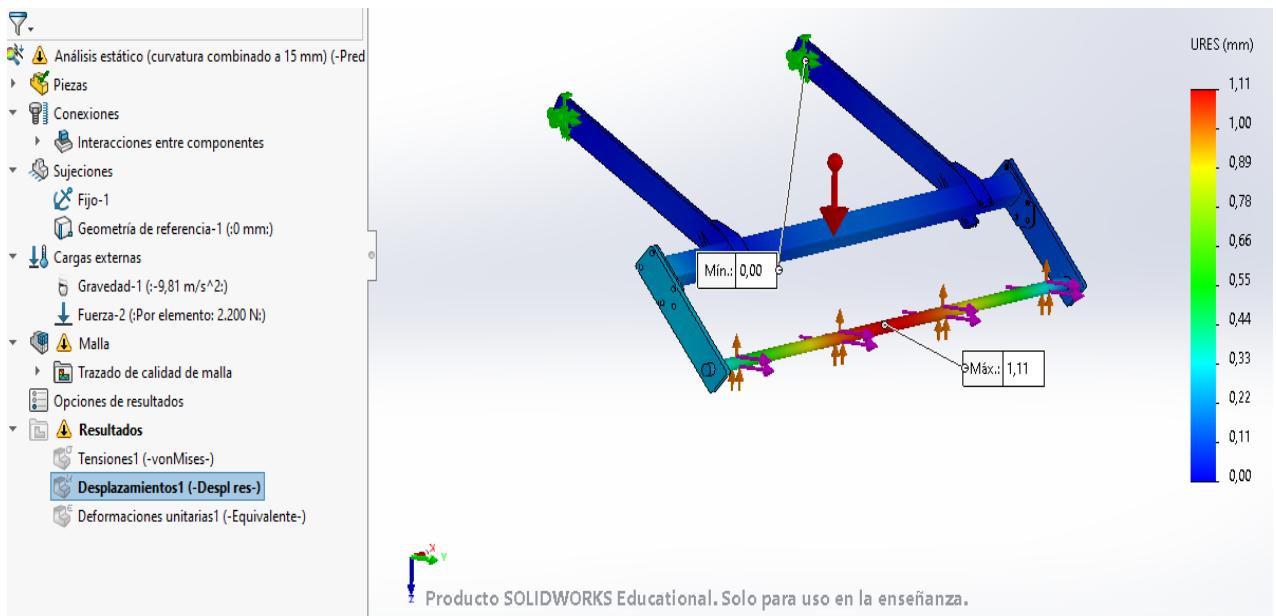
D.17: Tensiones con tamaño de malla 60 mm

2. DESPLAZAMIENTOS

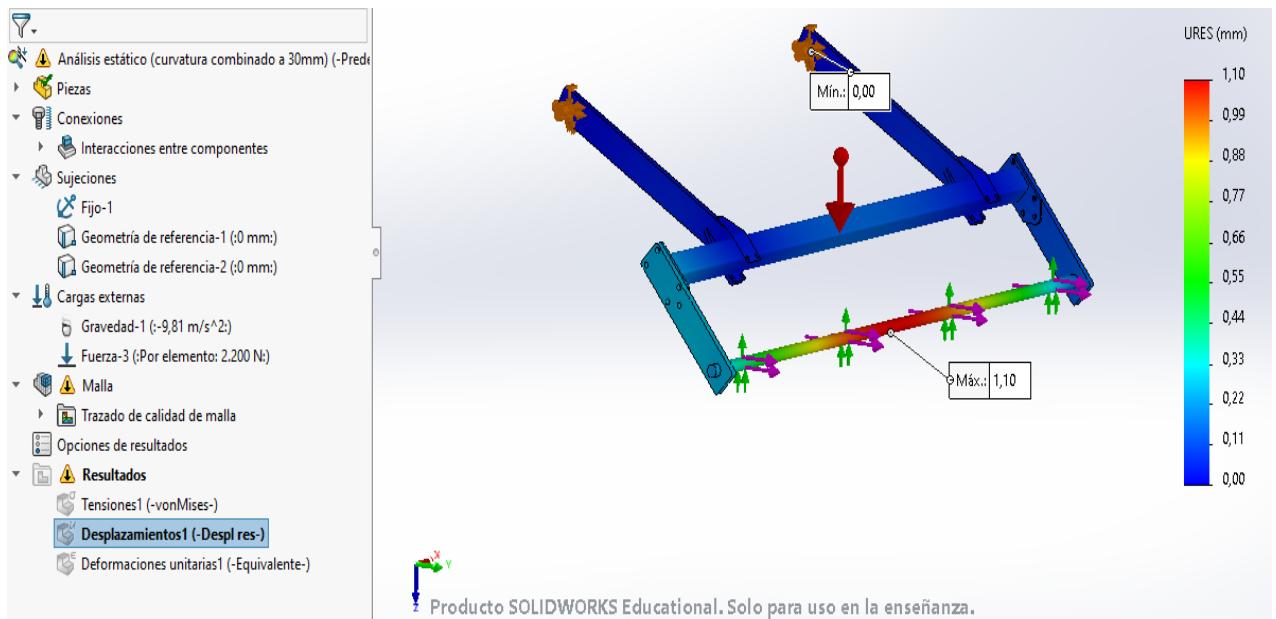


D.18: Desplazamientos con tamaño de malla 5 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

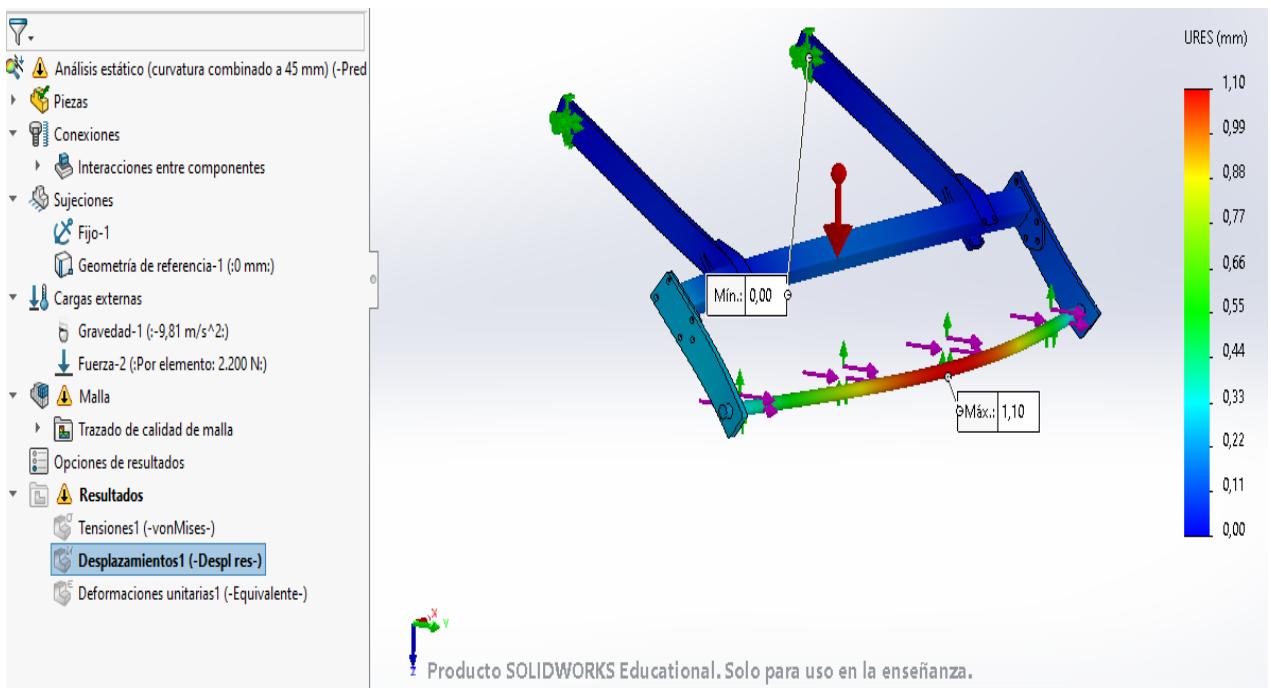


D.19: Desplazamientos con tamaño de malla 15 mm

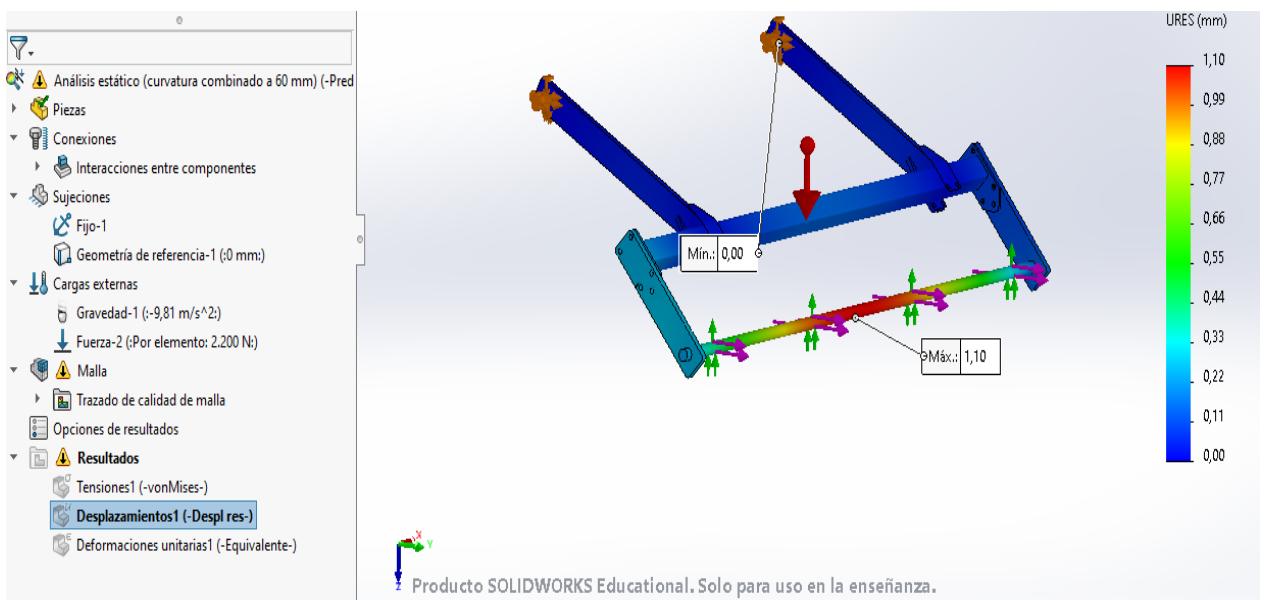


D.20: Desplazamientos con tamaño de malla 30 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

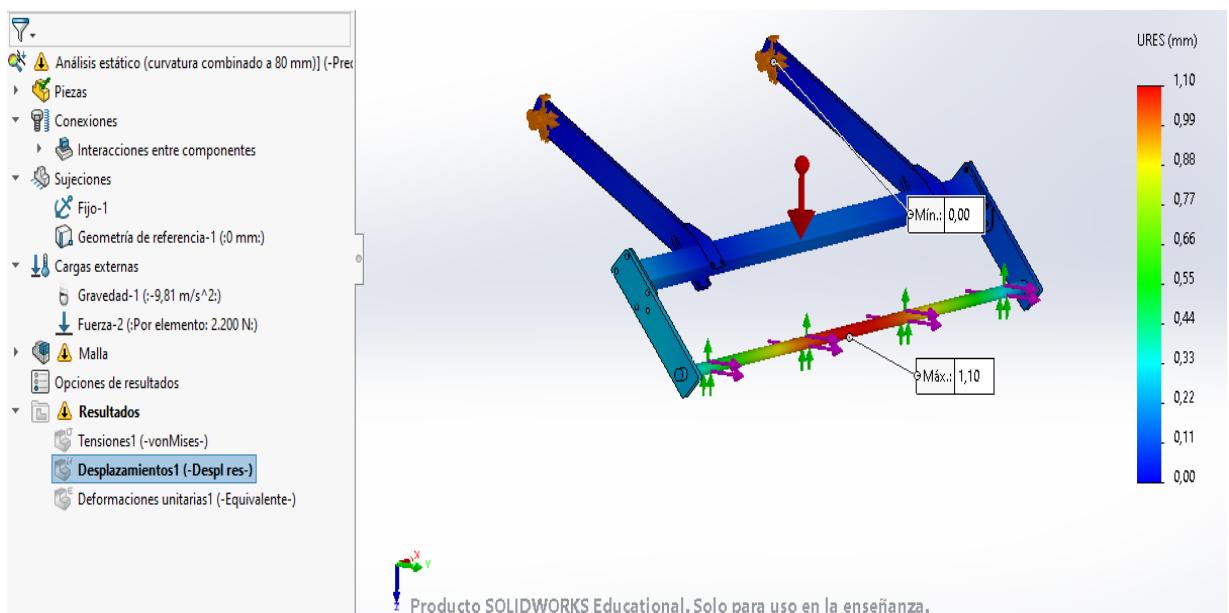


D.21: Desplazamientos con tamaño de malla 45 mm



D.22: Desplazamientos con tamaño de malla 60 mm

Diseño y optimización de una grada de discos



D.23: Desplazamientos con tamaño de malla 80 mm

Como se ha elegido el tamaño de malla 45mm, se ha representado su deformada, para ver cómo se deforma el modelo una vez se le apliquen las fuerzas y las condiciones de contorno. En el resto de imágenes, se ha mostrado el modelo sin deformaciones.

D.2. SECCIÓN 1 – CHASIS/BASTIDOR

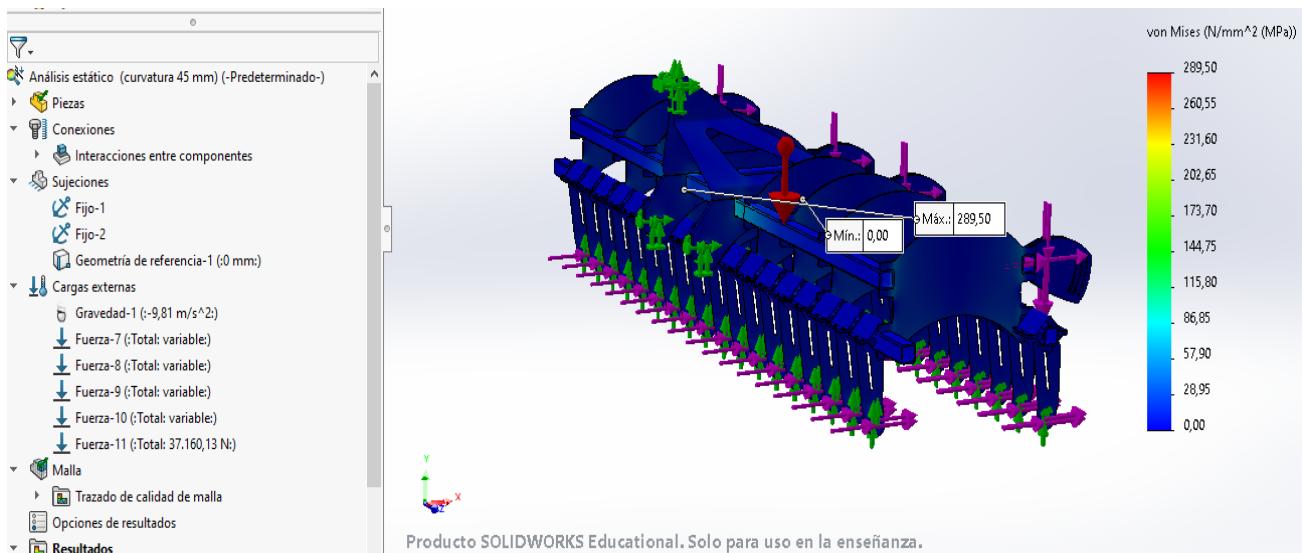
Para este modelo, como ya se ha comentado en otros apartados, se realizarán los cálculos con un tamaño de malla 45 mm, que es el elegido en el estudio de sensibilidad.

ANÁLISIS EN CURVATURA

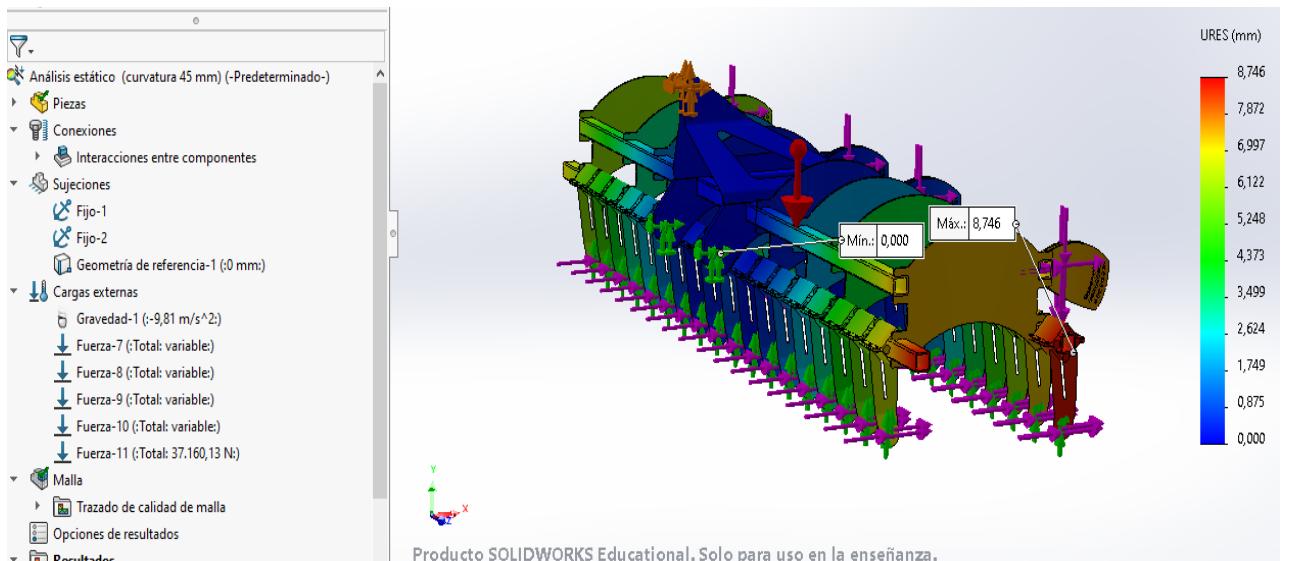
Se van a mostrar imágenes de los resultados de los modelos, de la grada sin deformar y deformada, con todas las definiciones de fuerzas y condiciones de contorno que se han aplicado en cada uno de los apartados del análisis de SolidWorks.

Diseño y optimización de una grada de discos

1. TENSIONES

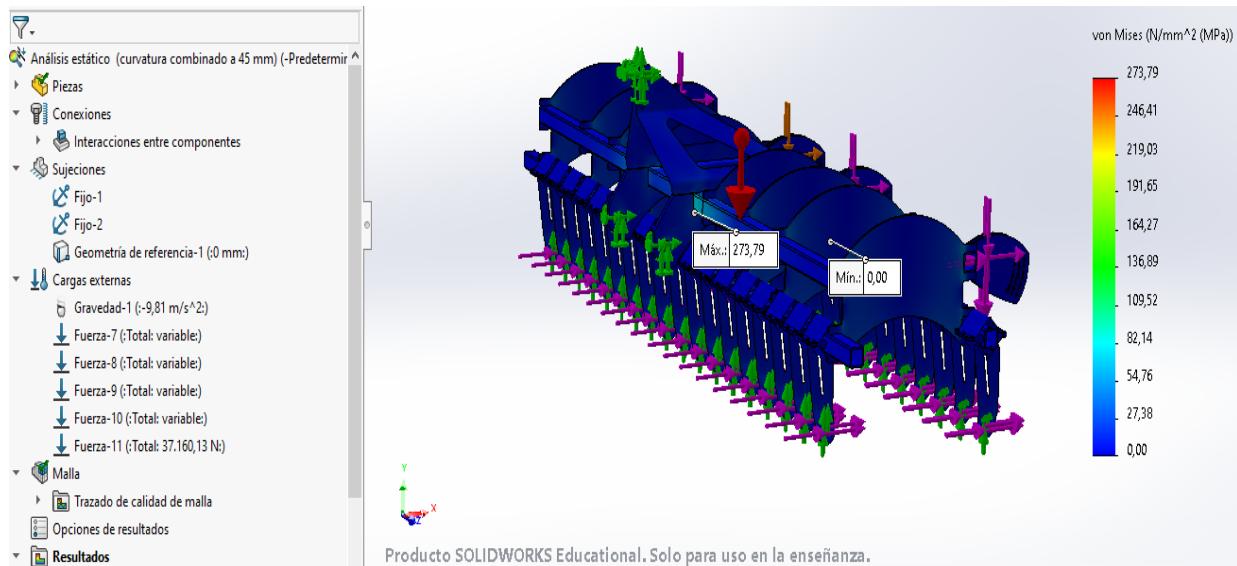


2. DESPLAZAMIENTOS

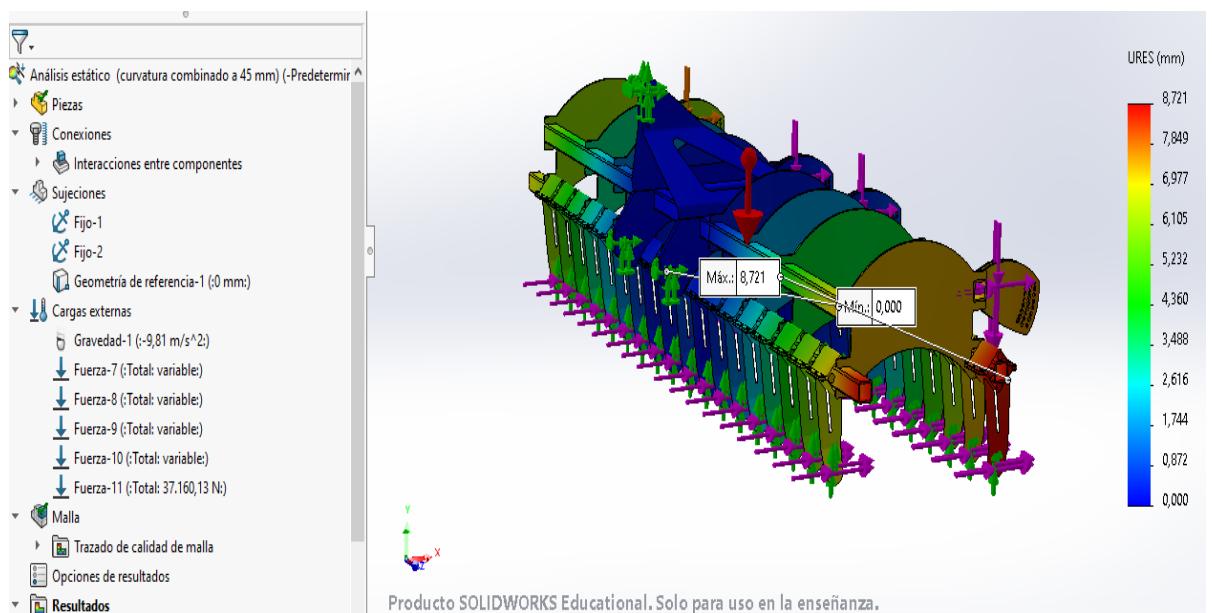


ANÁLISIS EN CURVATURA COMBINADO

1. TENSIONES



2. DESPLAZAMIENTOS

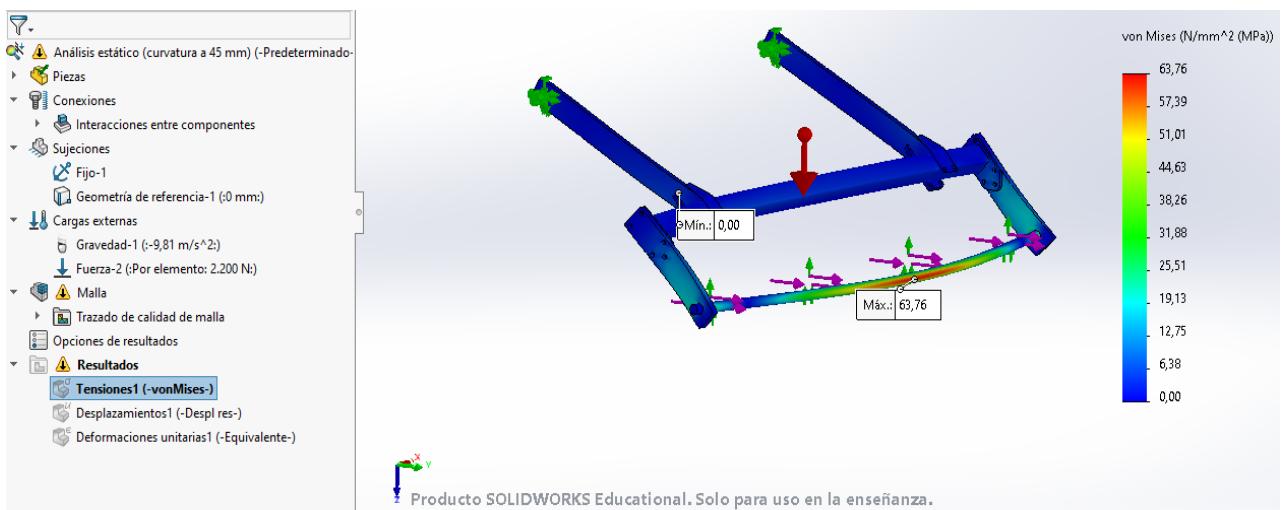


D.2 SECCIÓN 2 – RODILLO

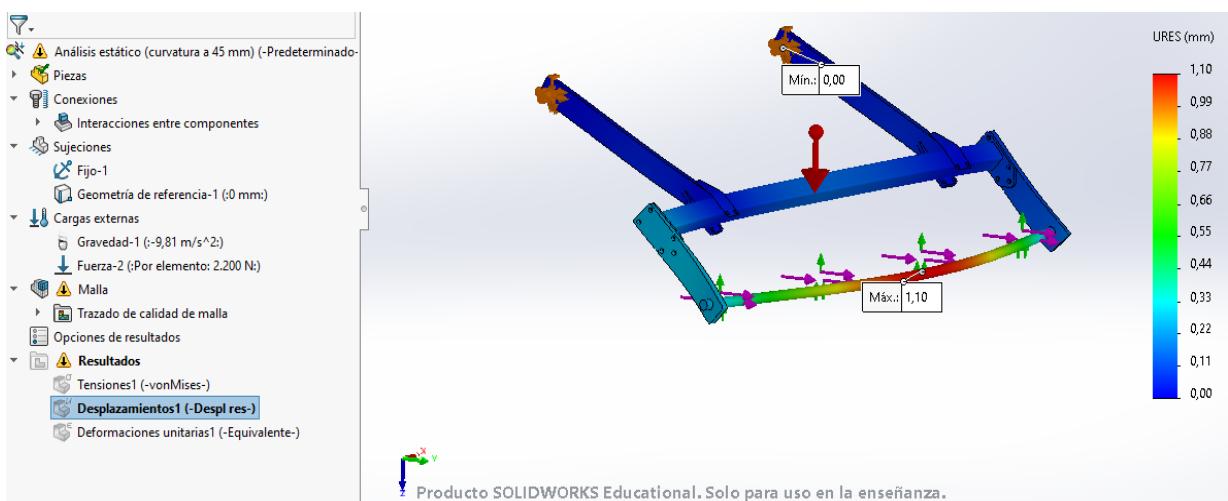
En el estudio de sensibilidad se ha visto que el tamaño de malla elegido es el de 45 mm, por lo que se van a volver a presentar las imágenes, en las cuales se presenta con su deformada, pero sólo con ese tamaño, que es el que he considerado como apropiado para trabajar.

ANÁLISIS EN CURVATURA

1. TENSIONES

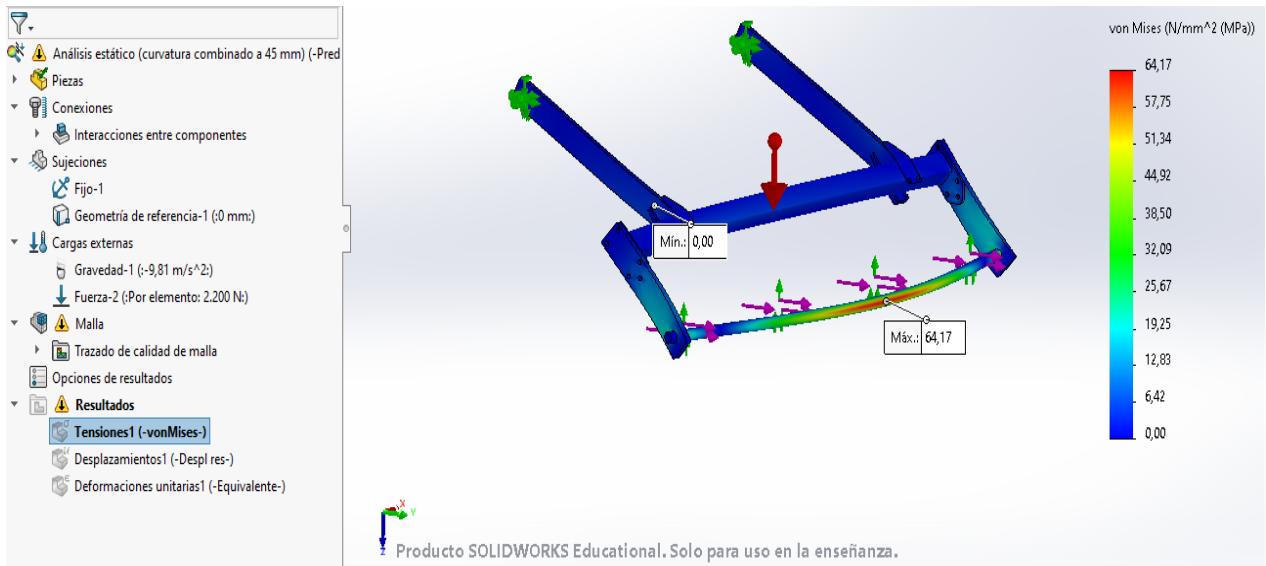


2. DESPLAZAMIENTOS

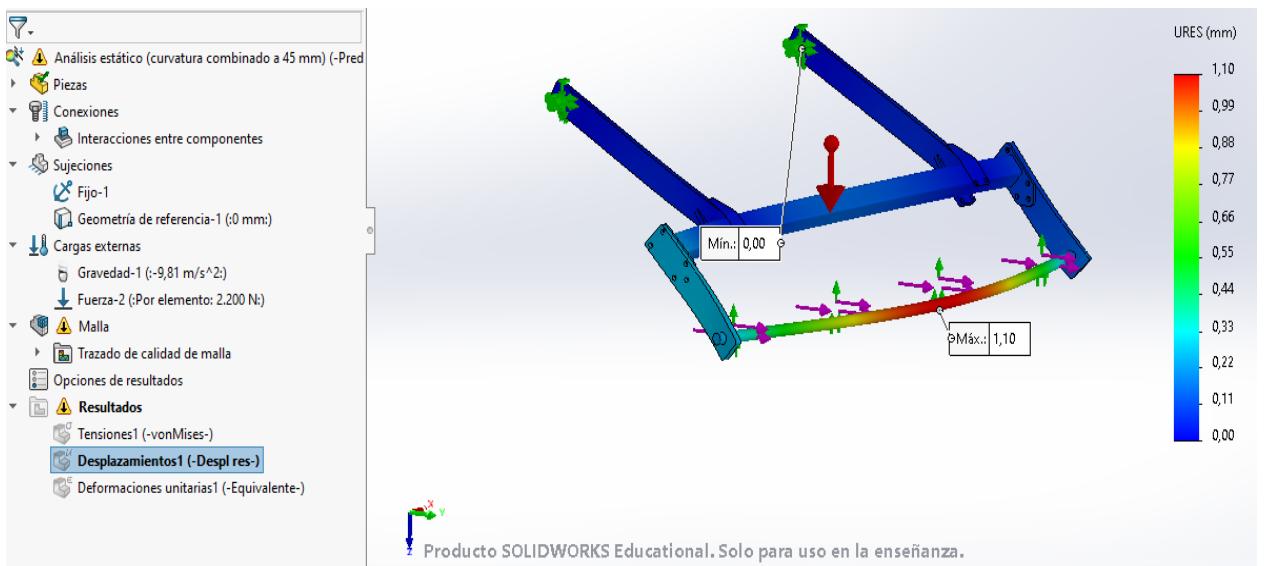


ANÁLISIS EN CURVATURA COMBINADO

1. TENSIONES



2. DESPLAZAMIENTOS



ANEXO E: RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE TENSIONES Y DESPLAZAMIENTOS DE TODOS LOS COMPONENTES QUE FORMAN LA GRADA DE DISCOS

Ahora que ya se tiene una visión global de resultados en los 2 modelos, tocará ir pieza a pieza analizando sus comportamientos, y ver si son los esperados, cumplen con las especificaciones o necesitan algún tipo de cambio. Se va a seguir con el mismo orden que en el anexo A, donde se han presentado todos los componentes:

E.2 SECCIÓN 1 – CHASIS/BASTIDOR

ANÁLISIS EN CURVATURA DEL CHASIS

Se van a detallar, gracias al menú de configuración de leyenda de los resultados, cuáles son los máximos y mínimos de los 2 parámetros analizados, que son las tensiones y los desplazamientos, y como se reparten a lo largo de toda la pieza.

1. TENSIONES

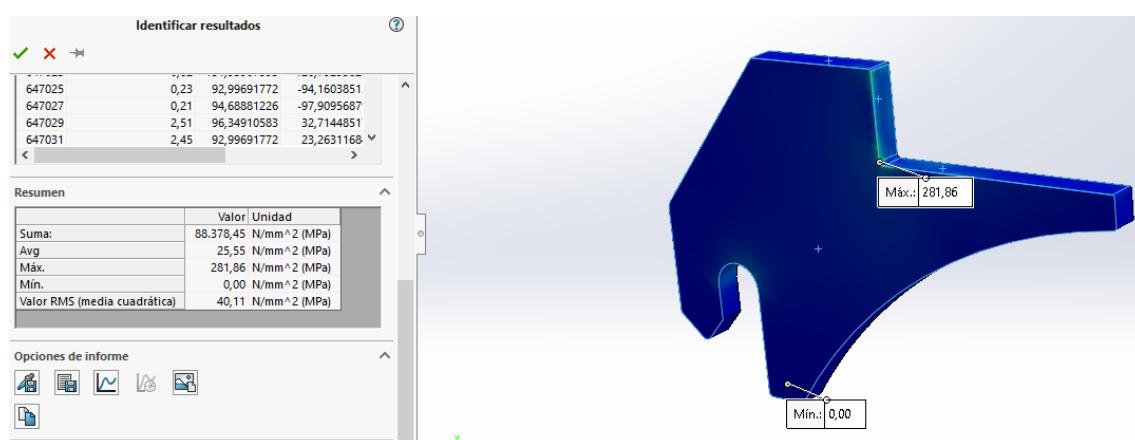


Figura 1: Enganche grada

Diseño y optimización de una grada de discos

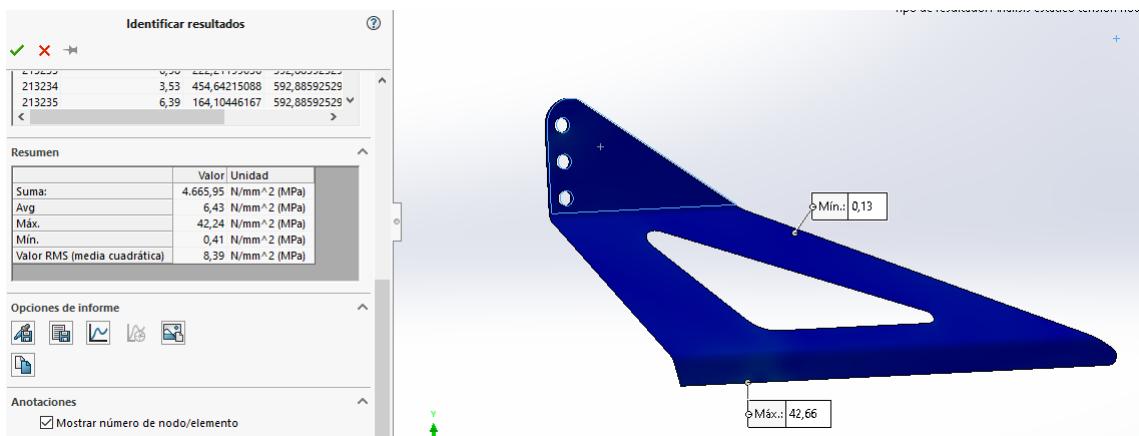


Figura 2: Piquete grada

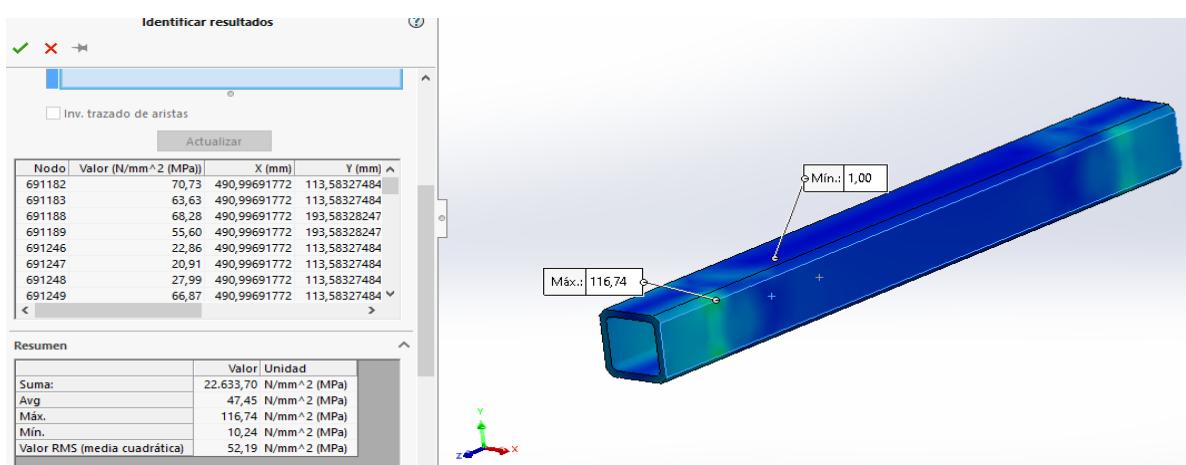


Figura 3: Perfil 100x100x10 de 1000 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

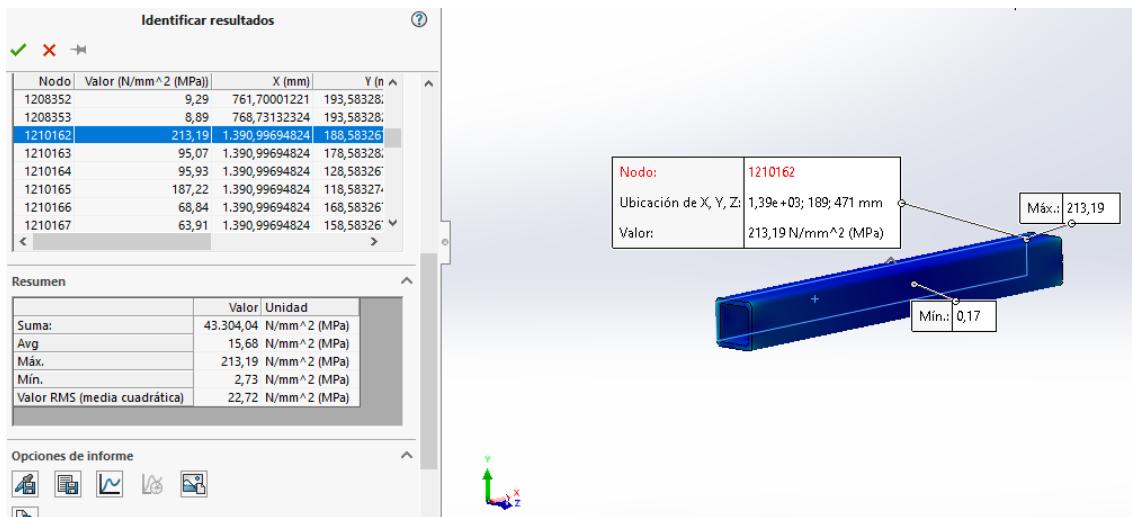


Figura 4: Puente del piquete 100x100x10 de 900 mm

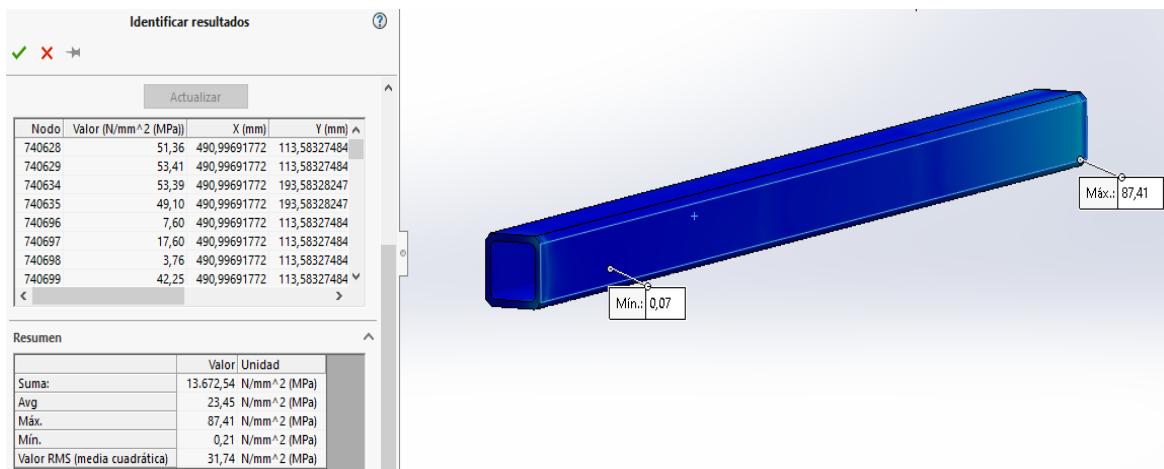


Figura 5: Perfil 100x100x10 de 1735 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

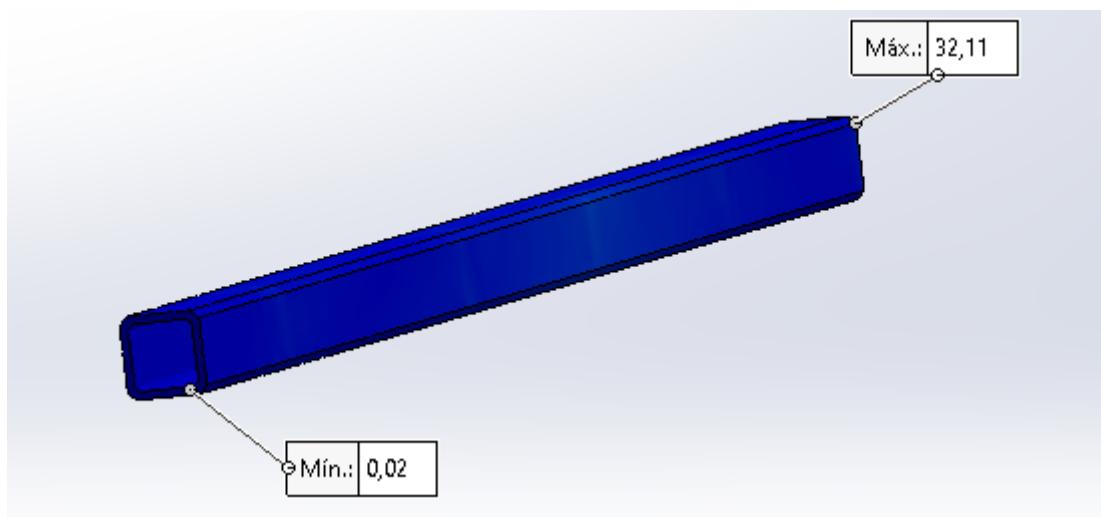


Figura 6: Perfil 100x100x10 de 2490 mm

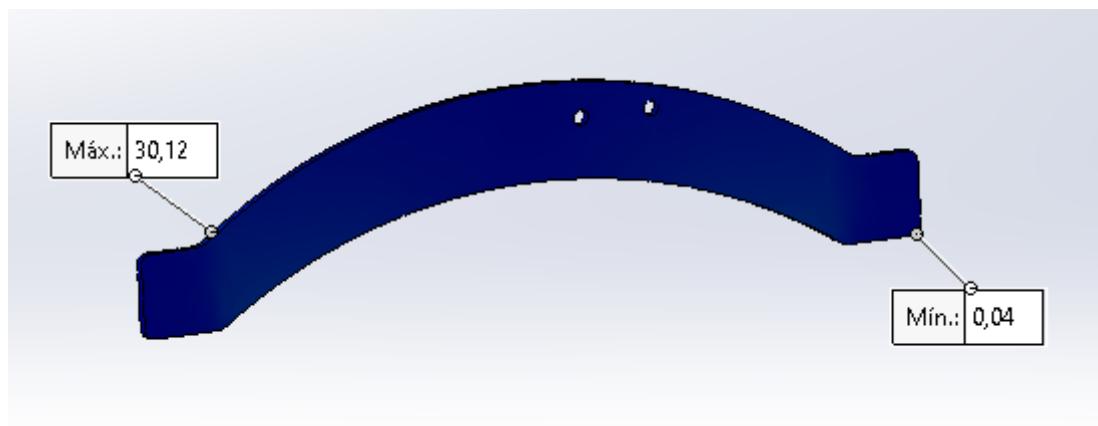


Figura 7: Unión perfiles exteriores

Diseño y optimización de una grada de discos

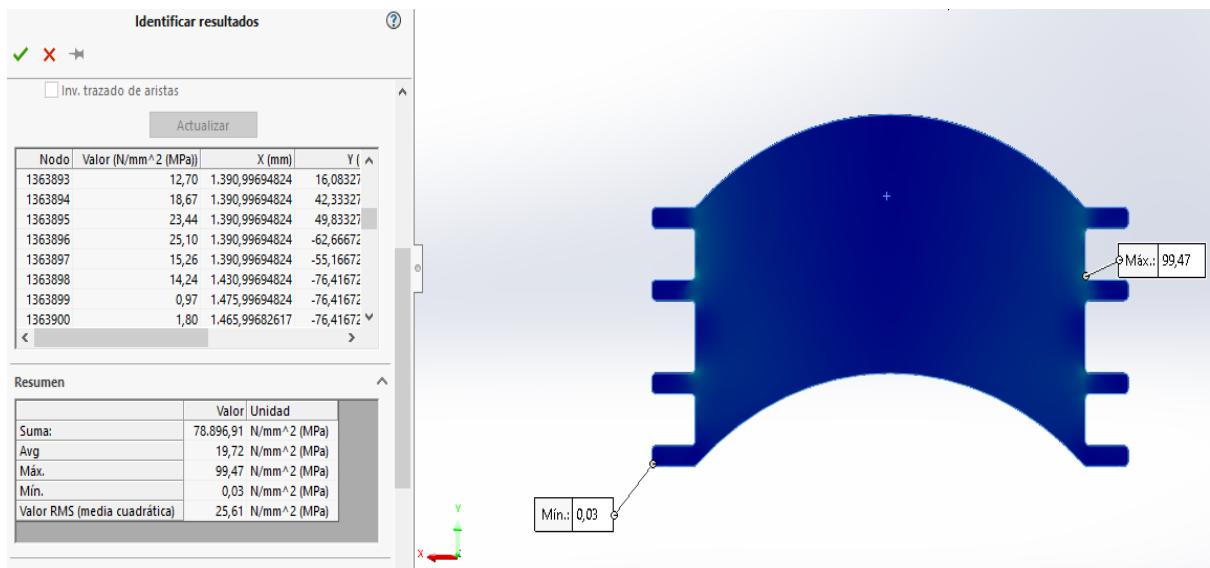


Figura 8: Soporte unión perfiles

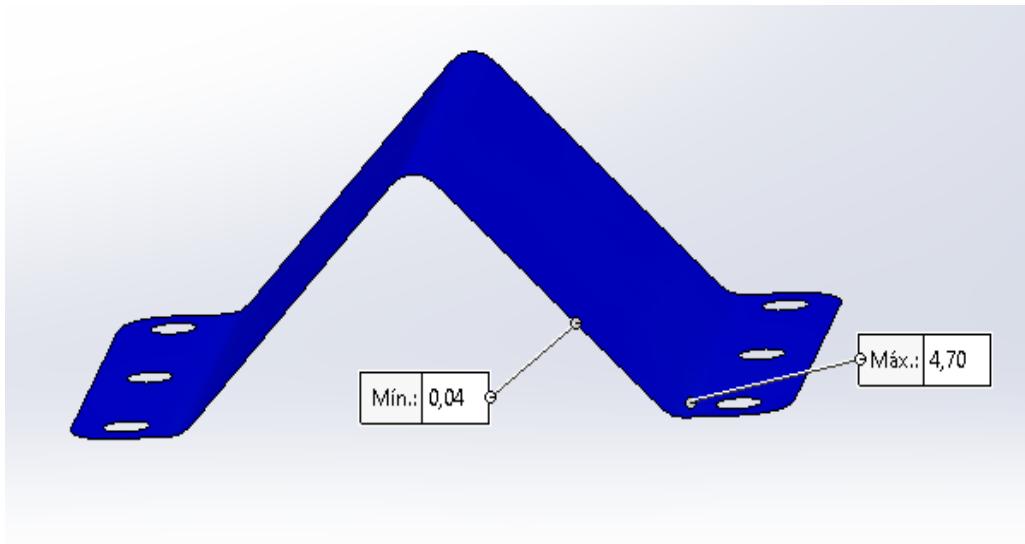


Figura 9: Soporte doblado parte superior

Diseño y optimización de una grada de discos

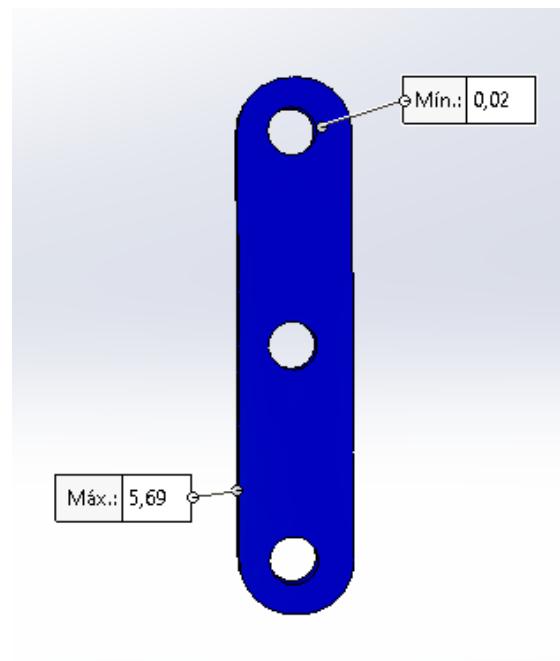


Figura 10: Separador bridas

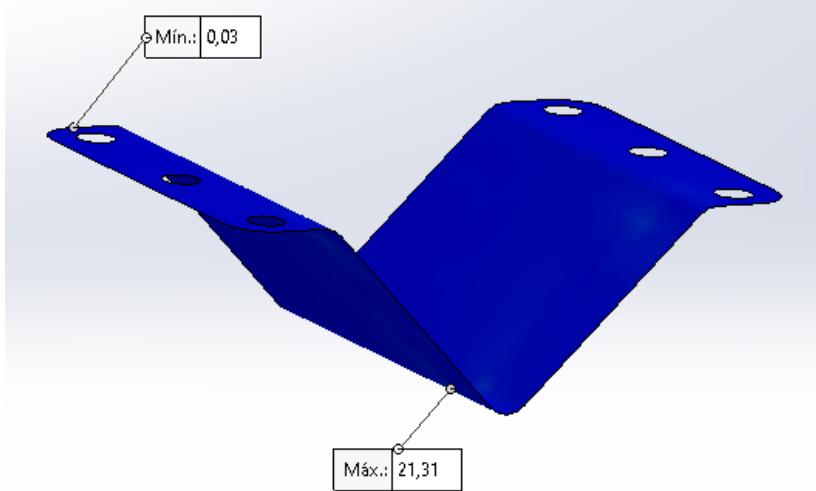


Figura 11: Soporte doblado parte inferior

Diseño y optimización de una grada de discos

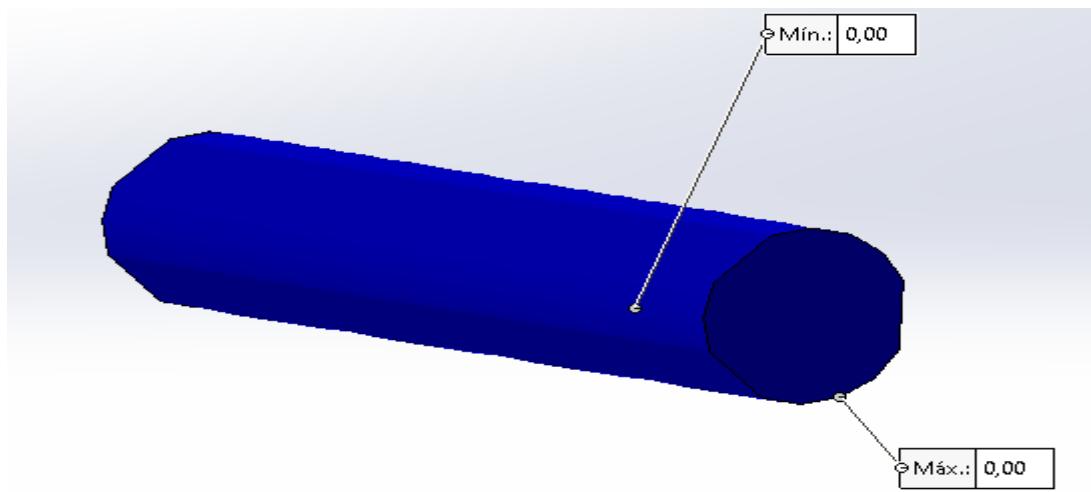


Figura 12: Elastómero

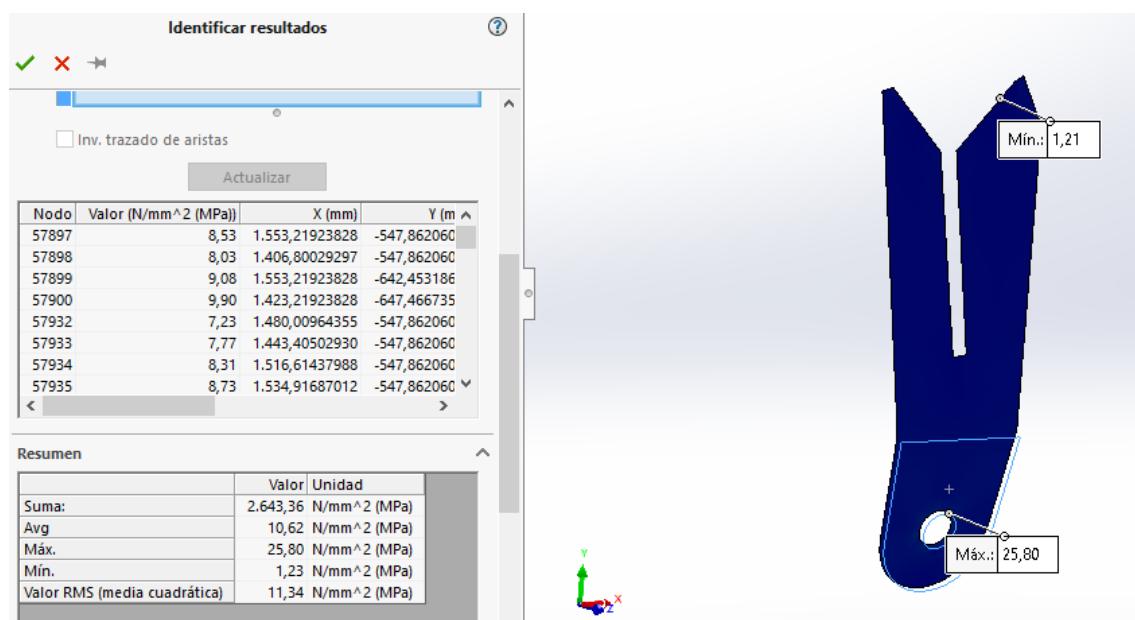


Figura 13: Brazo

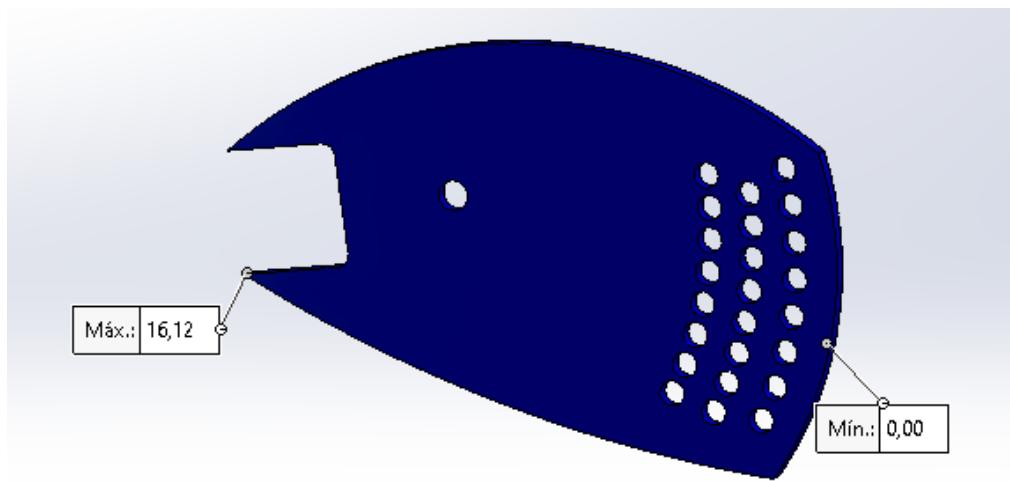


Figura 14: Cresta

2. DESPLAZAMIENTOS

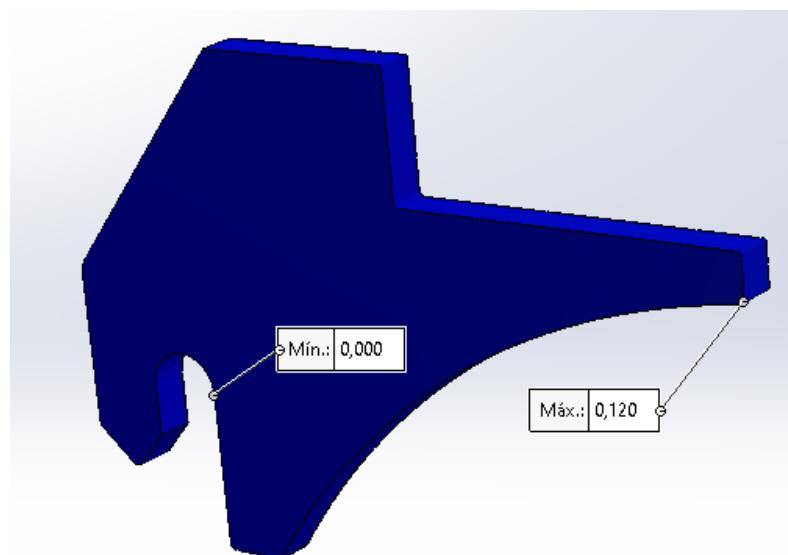


Figura 1: Enganche grada

Diseño y optimización de una grada de discos

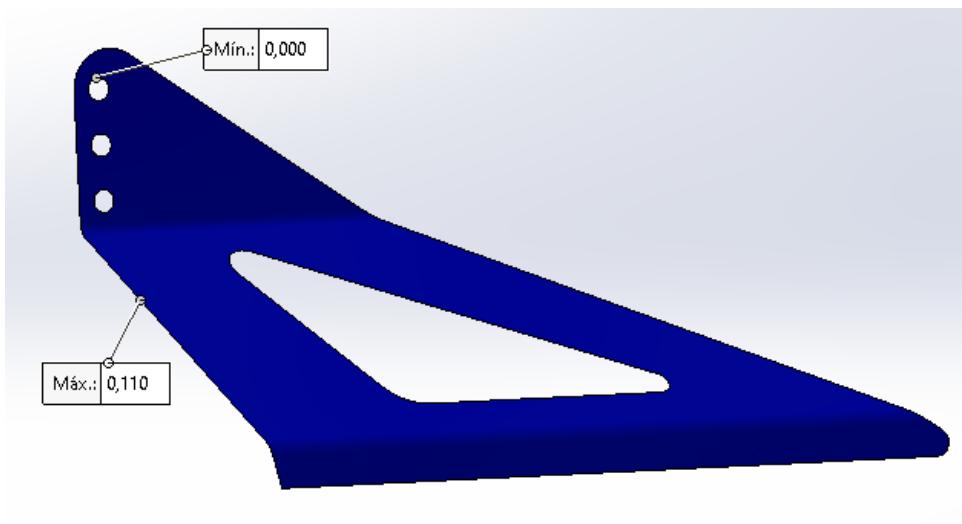


Figura 2: Piquete grada

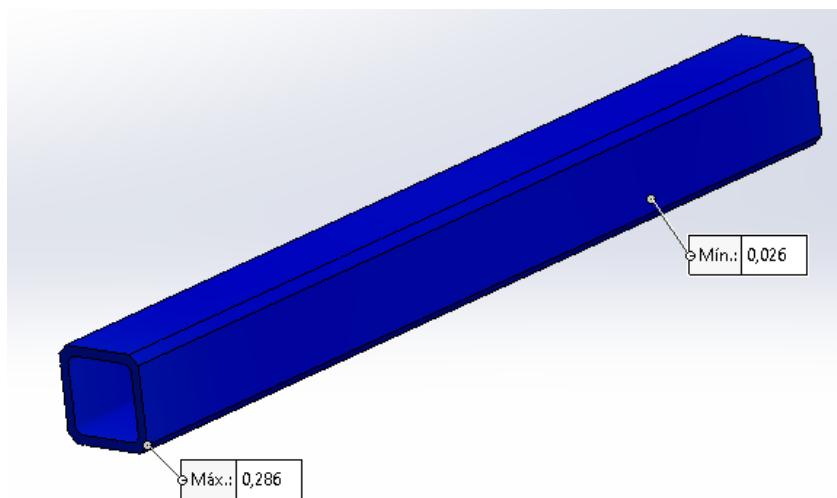


Figura 3: Perfil 100x100x10 de 1000 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

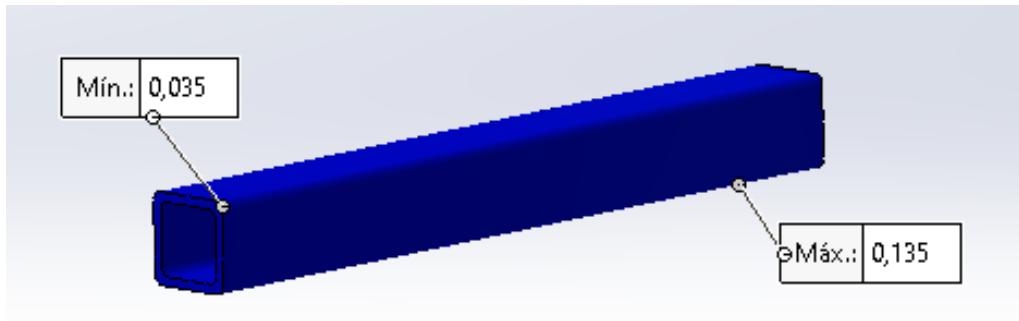


Figura 4: Puente del piquete 100x100x10 de 900 mm

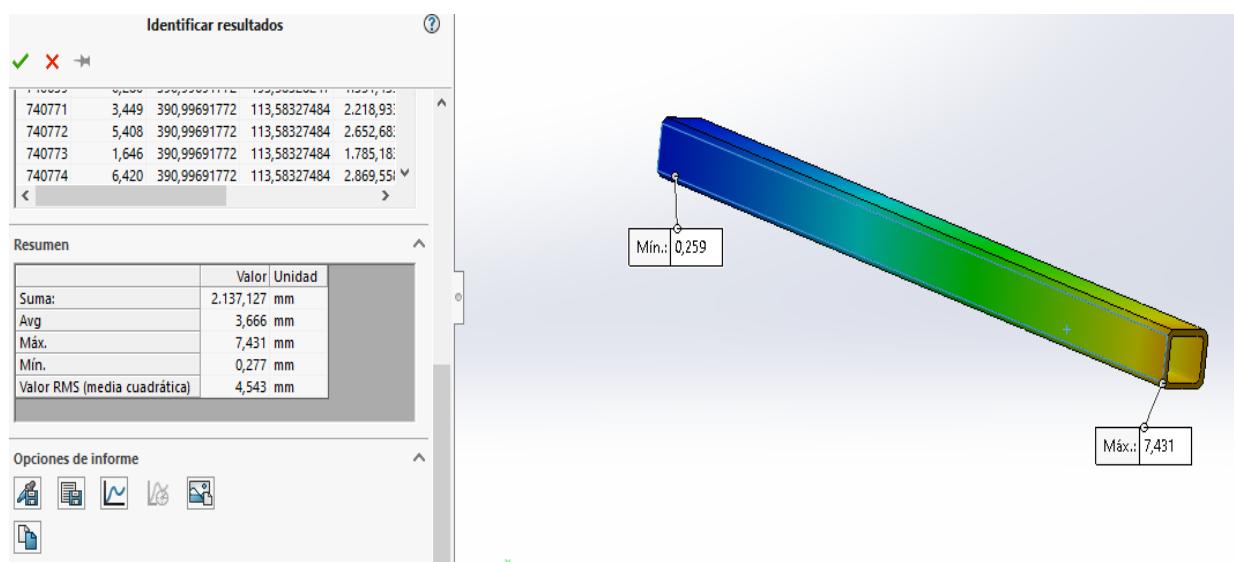


Figura 5: Perfil 100x100x10 de 1735 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

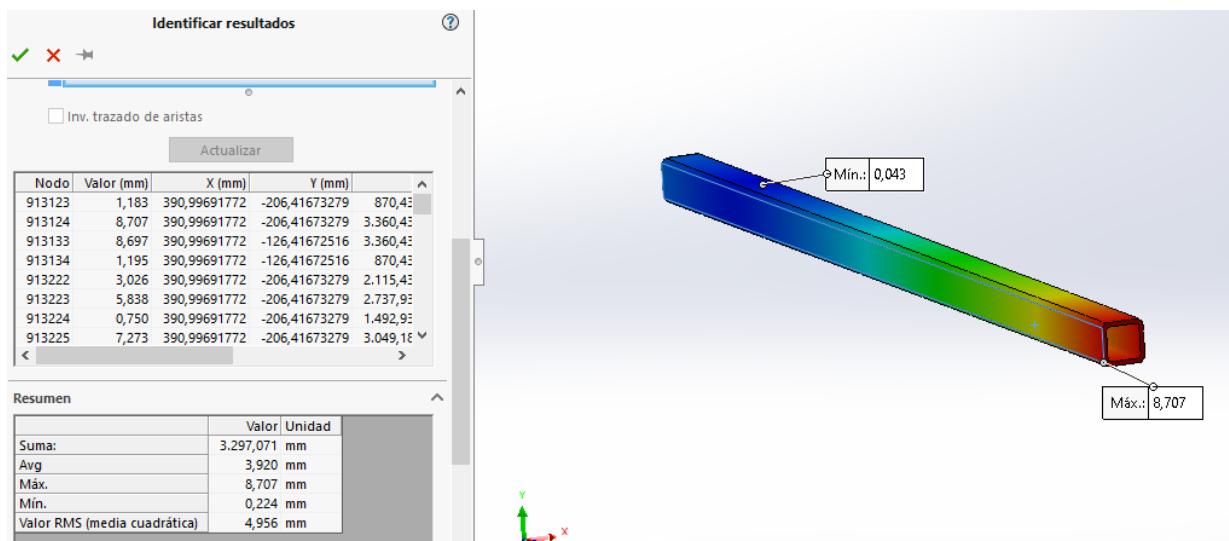


Figura 6: Perfil 100x100x10 de 2490 mm

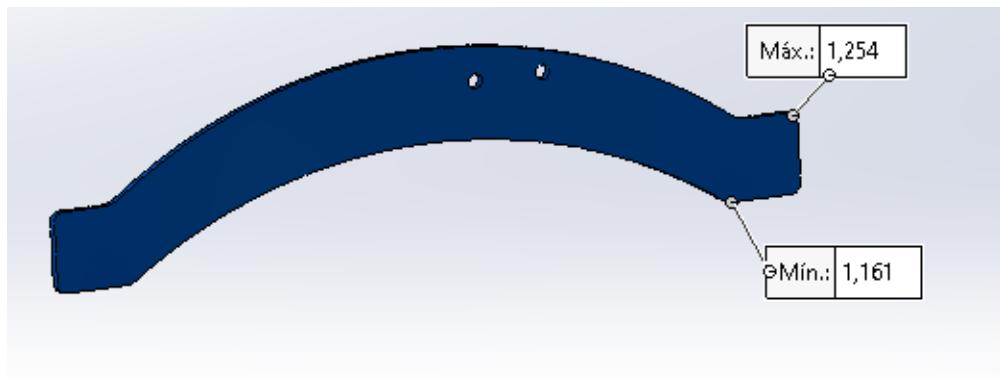


Figura 7: Unión exterior perfiles

Diseño y optimización de una grada de discos

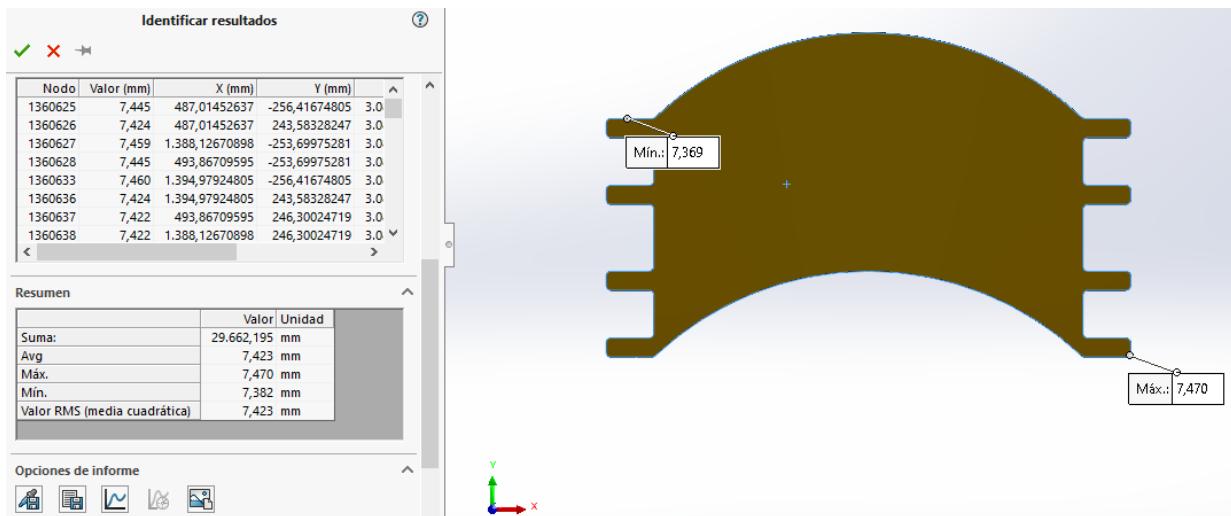


Figura 8: Soporte unión perfiles

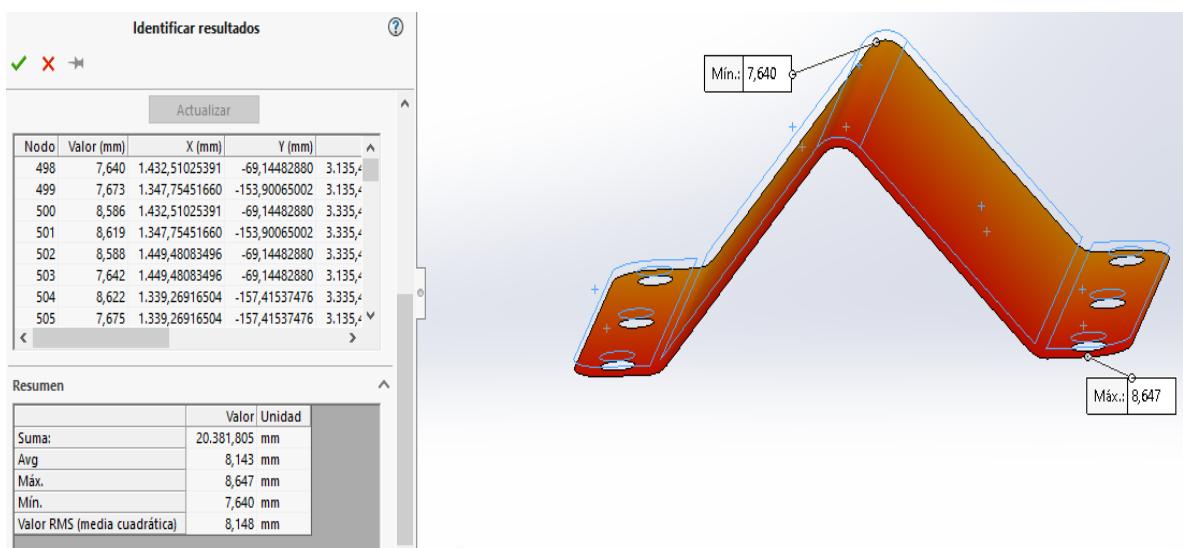


Figura 9: Soporte doblado parte superior

Diseño y optimización de una grada de discos

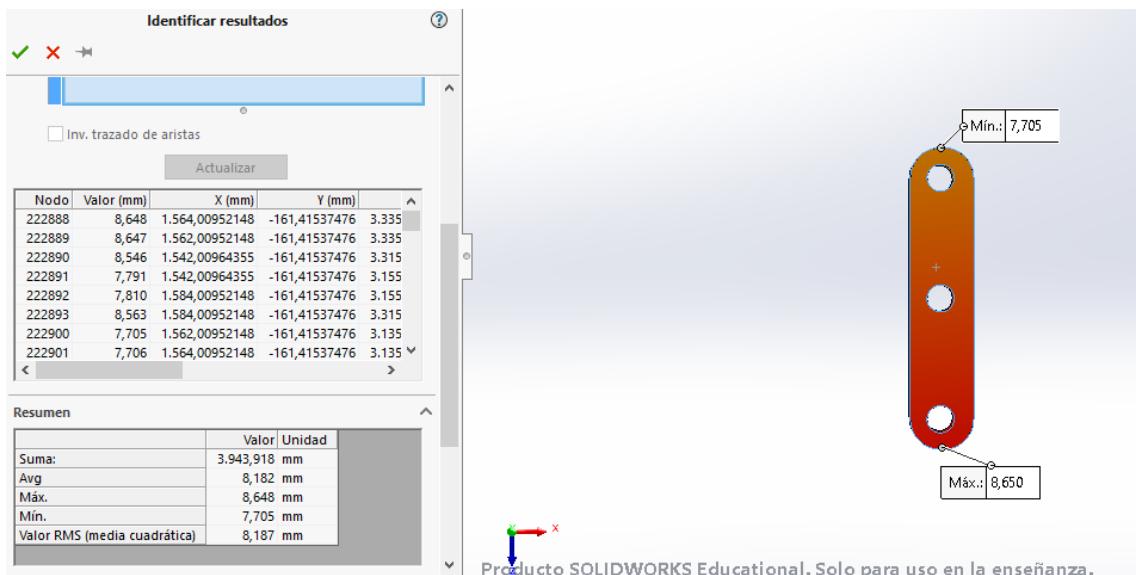


Figura 10: Separador bridas

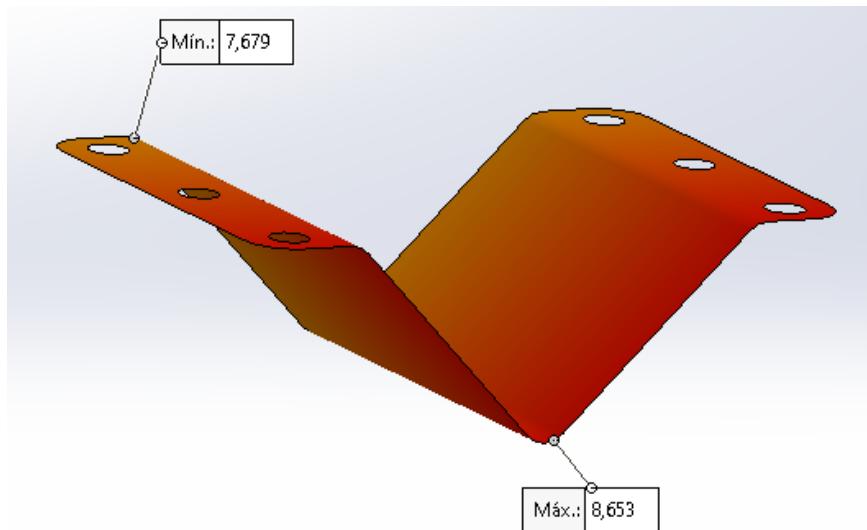


Figura 11: Soporte dobrado parte inferior

Diseño y optimización de una grada de discos

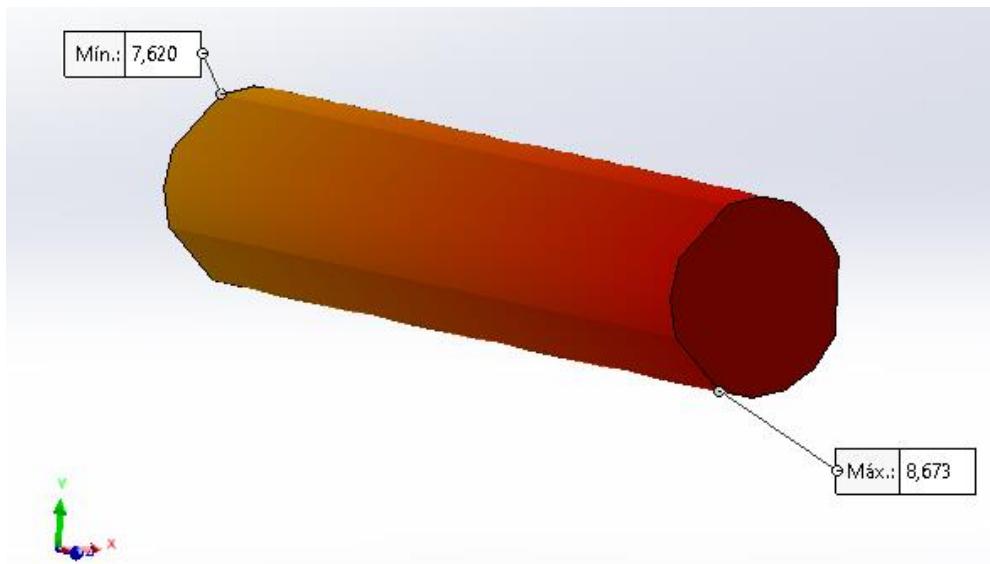


Figura 12: Elastómero

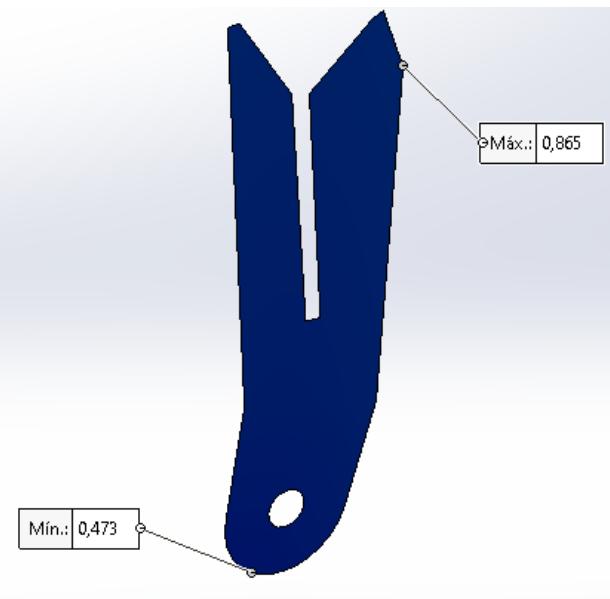


Figura 13: Brazo

Diseño y optimización de una grada de discos

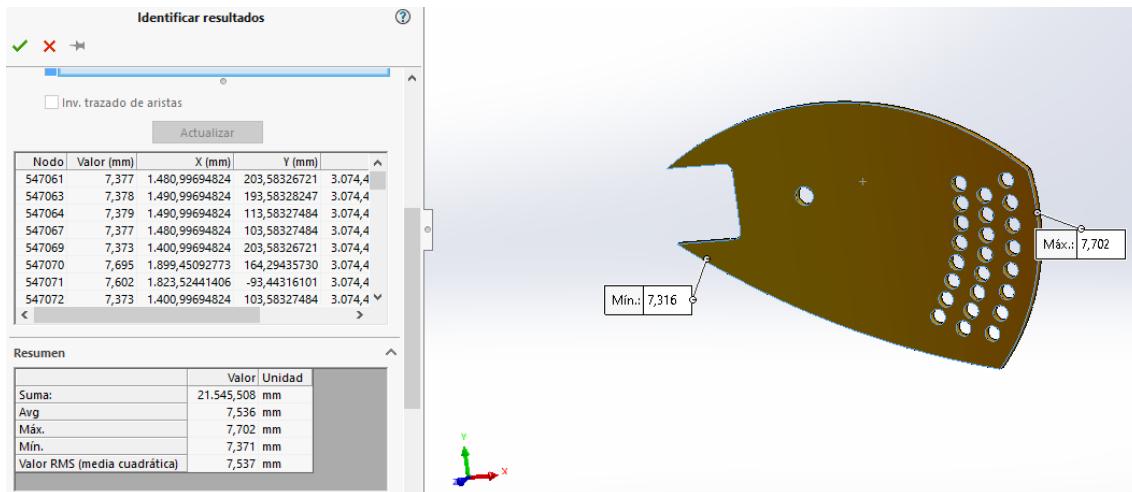


Figura 14: Cresta

ANÁLISIS EN CURVATURA COMBINADO DEL CHASIS

1. TENSIONES

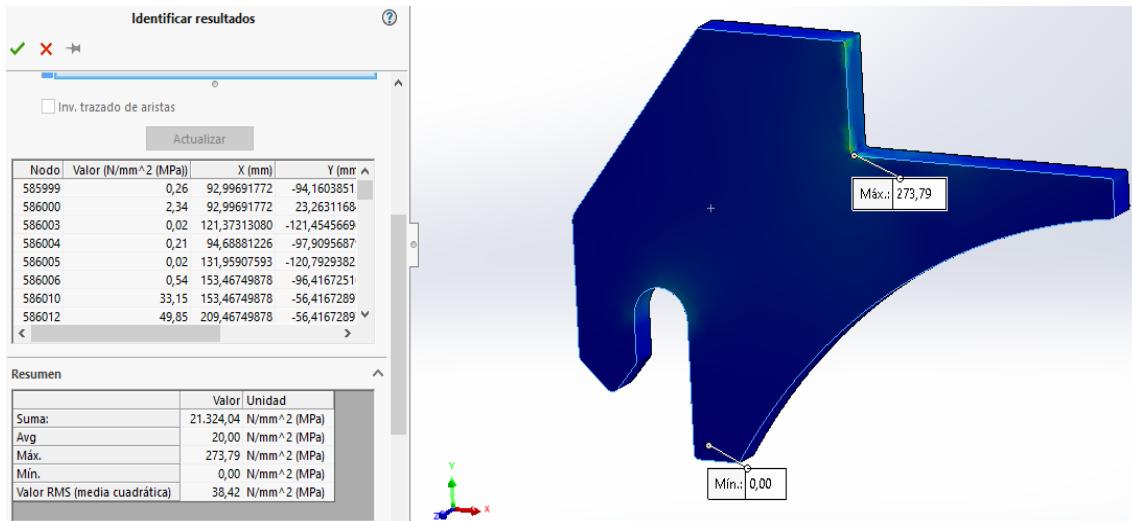


Figura 1: Enganche grada

Diseño y optimización de una grada de discos

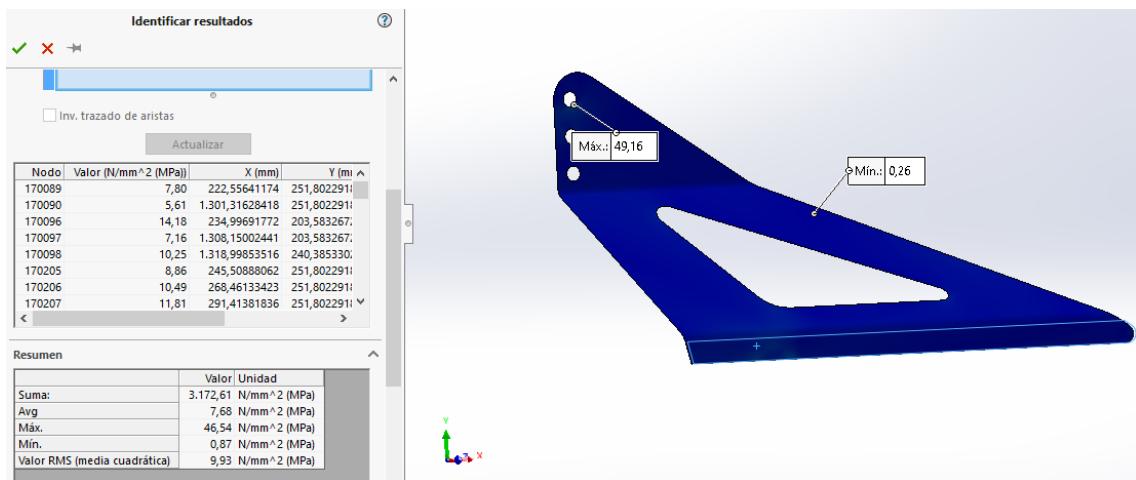


Figura 2: Piqueete grada

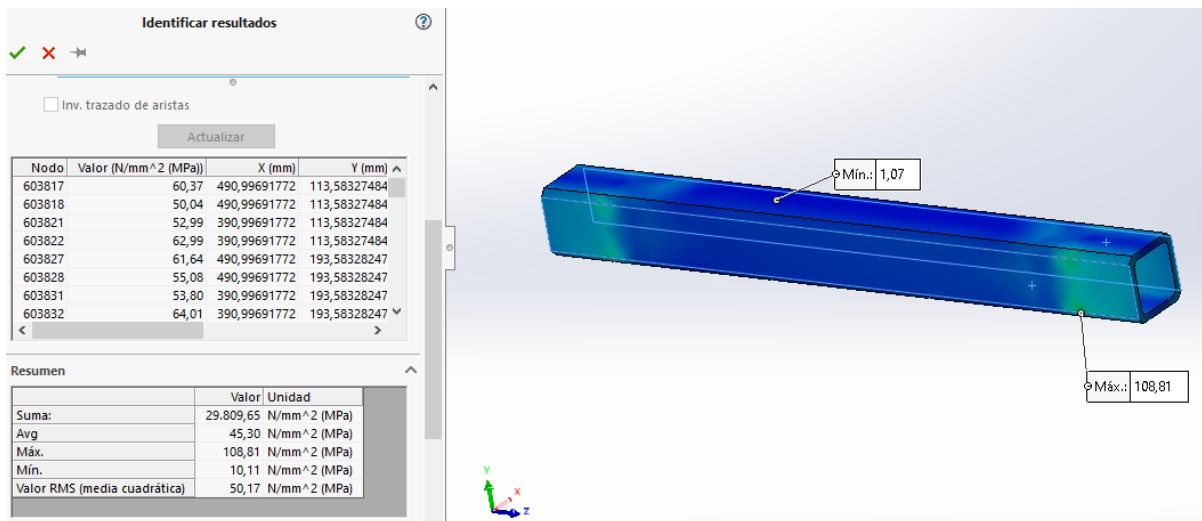


Figura 3: Perfil 100x100x10 de 1000 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

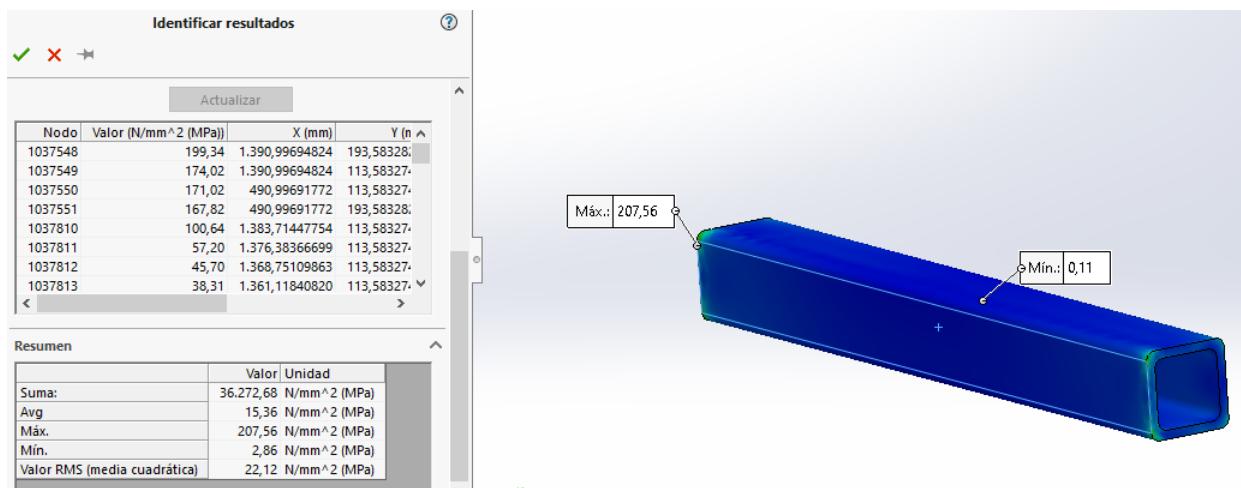


Figura 4: Puente del piquete 100x100x10 de 900 mm

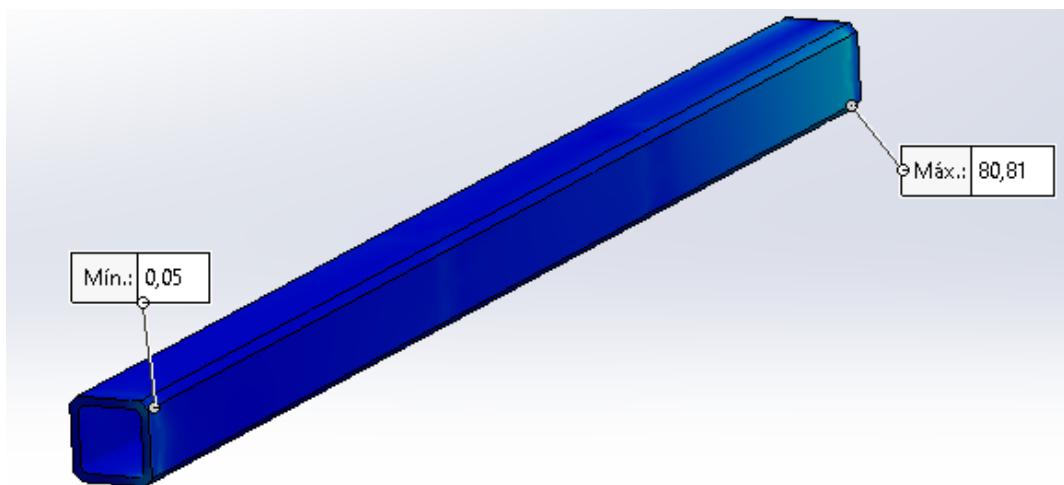


Figura 5: Perfil 100x100x10 de 1735 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

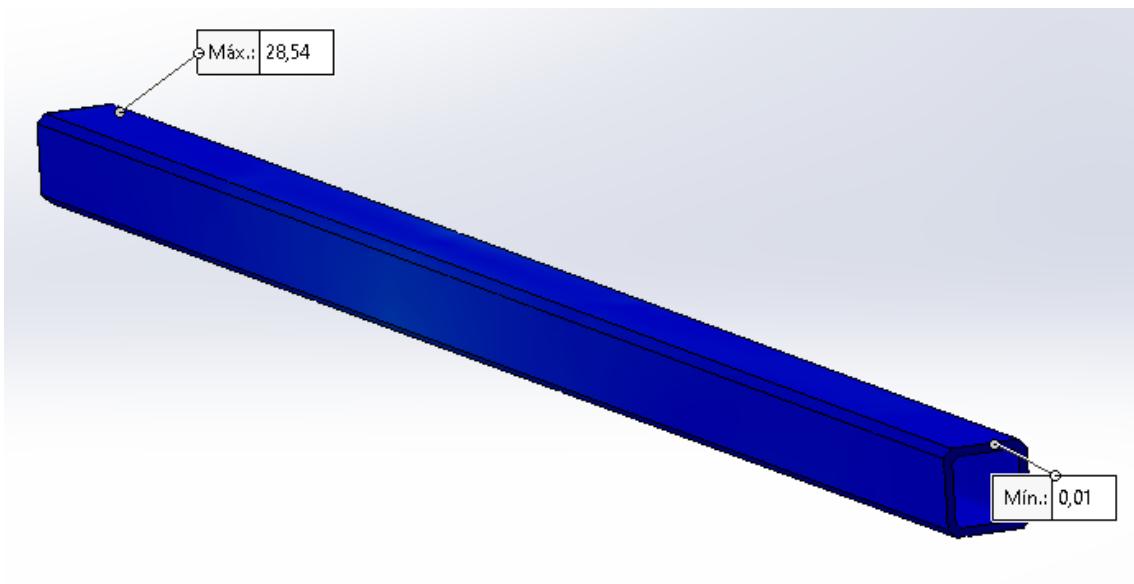


Figura 6: Perfil 100x100x10 de 2490 mm

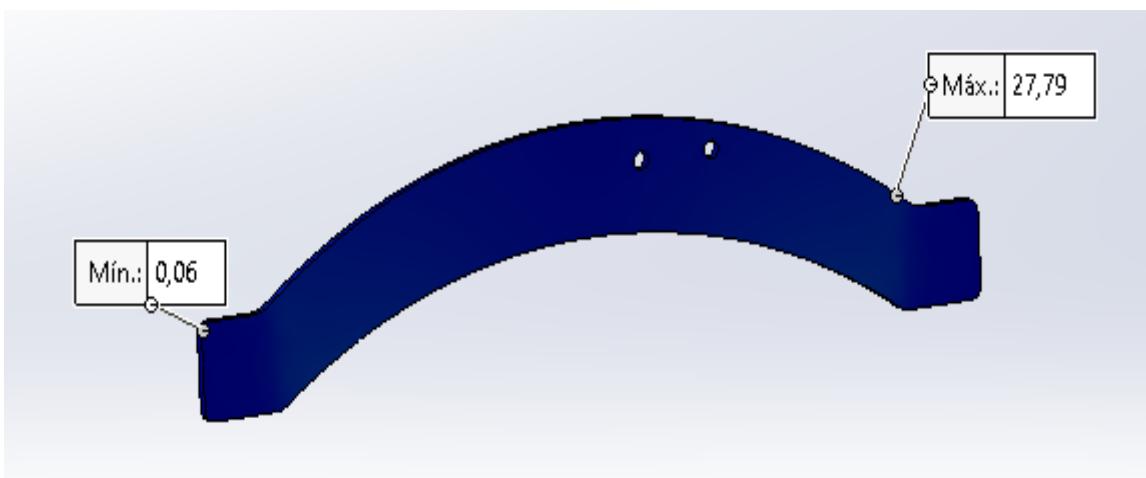


Figura 7: Unión exterior perfiles

Diseño y optimización de una grada de discos

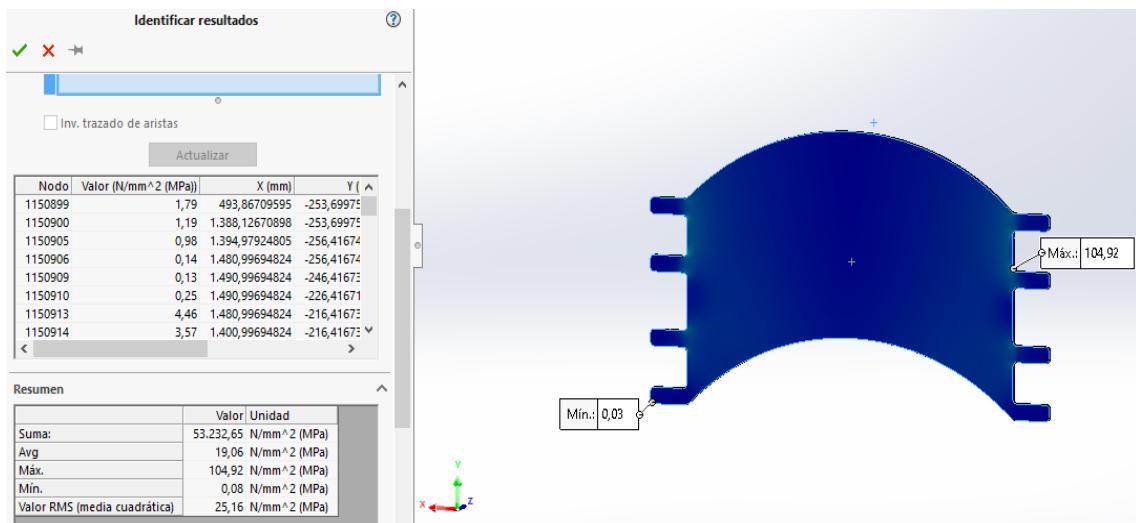


Figura 8: Soporte unión perfiles

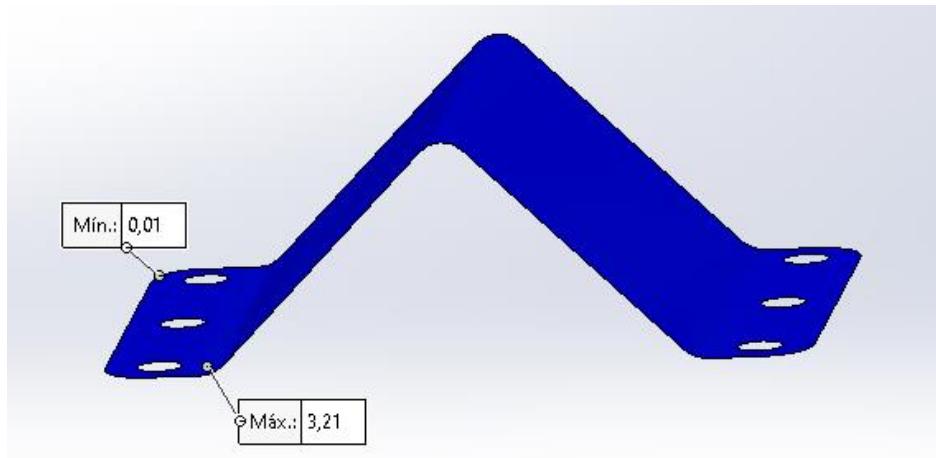


Figura 9: Soporte doblado parte superior

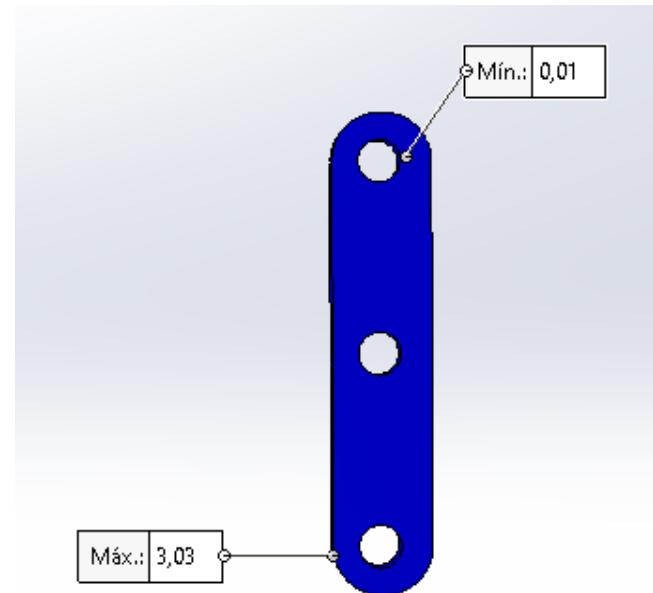


Figura 10: Separador bridas

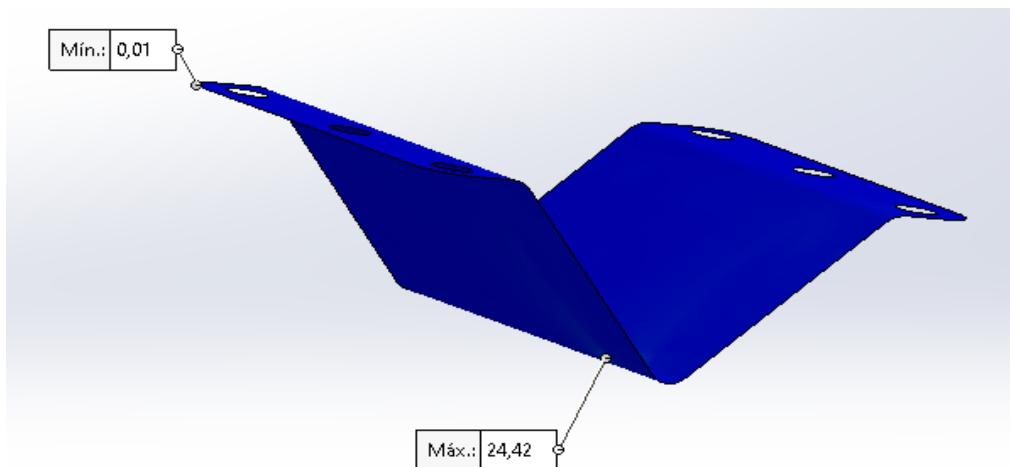


Figura 11: Soporte doblado parte inferior

Diseño y optimización de una grada de discos

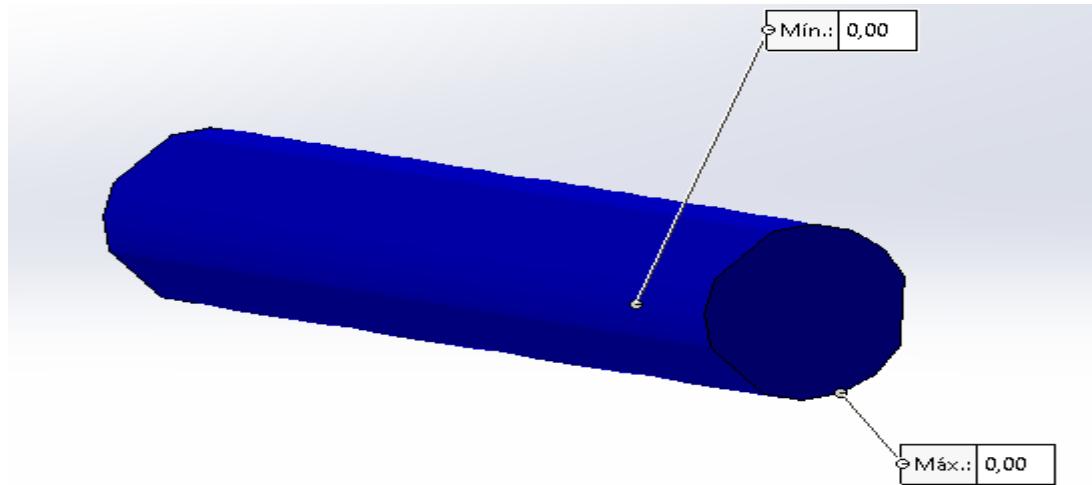


Figura 12: Elastómero

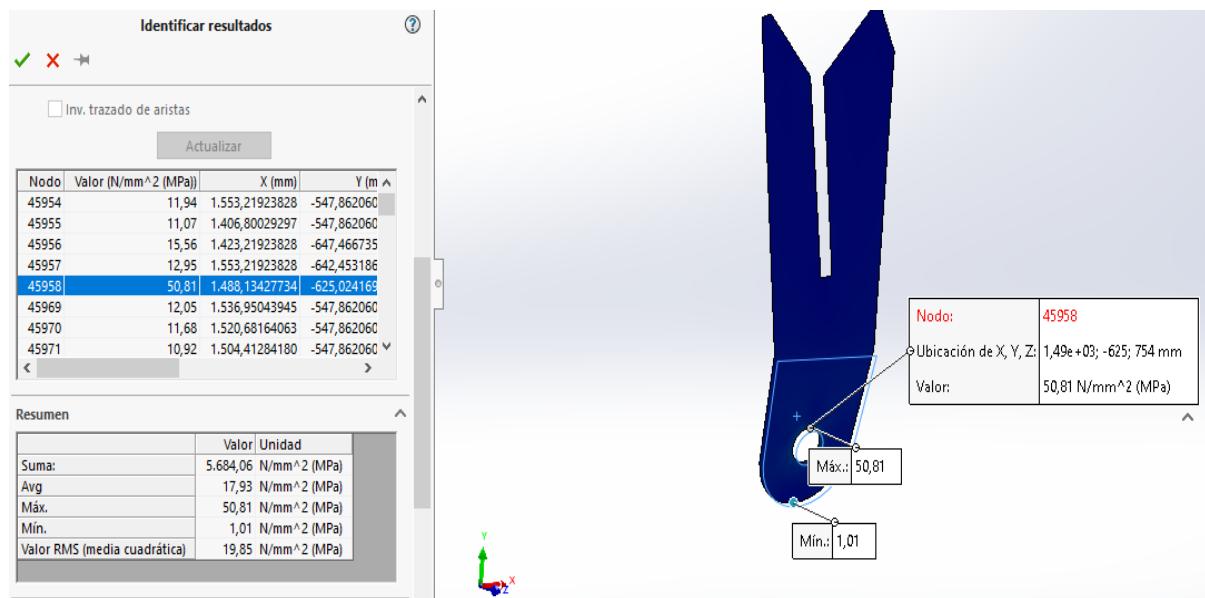


Figura 13: Brazo

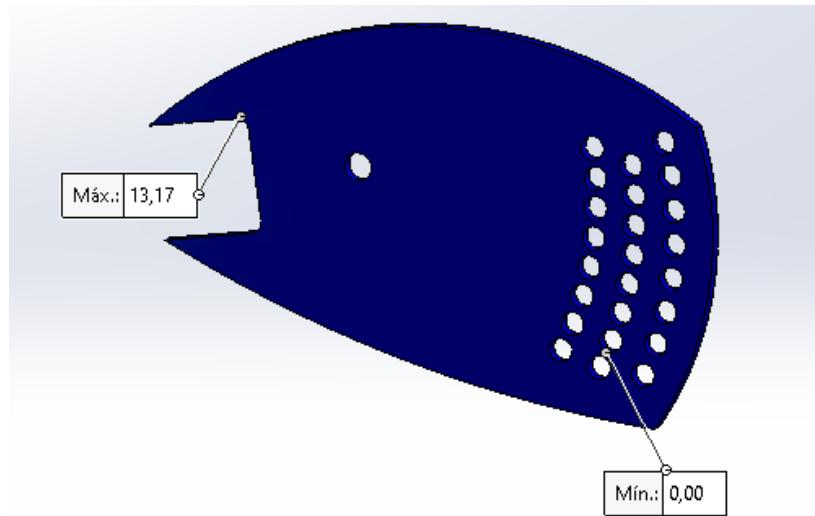


Figura 14: Cresta

2. DESPLAZAMIENTOS

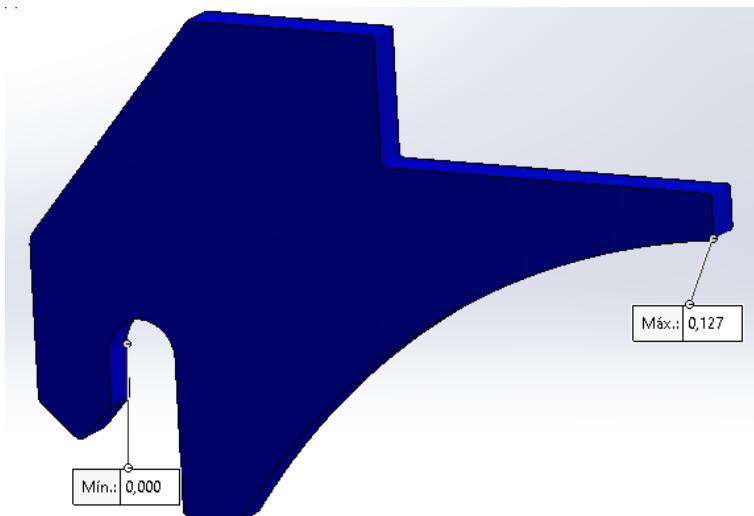


Figura 1: Enganche grada

Diseño y optimización de una grada de discos

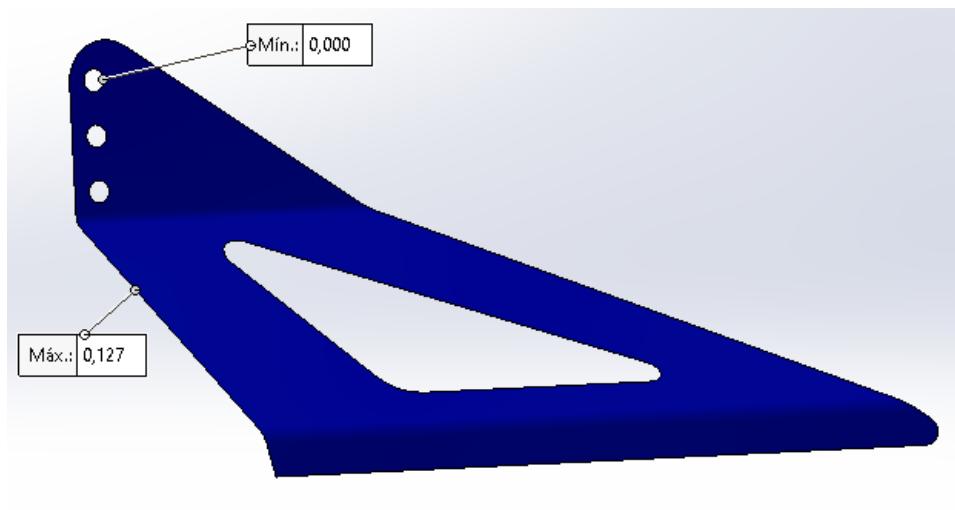


Figura 2: Piquete grada

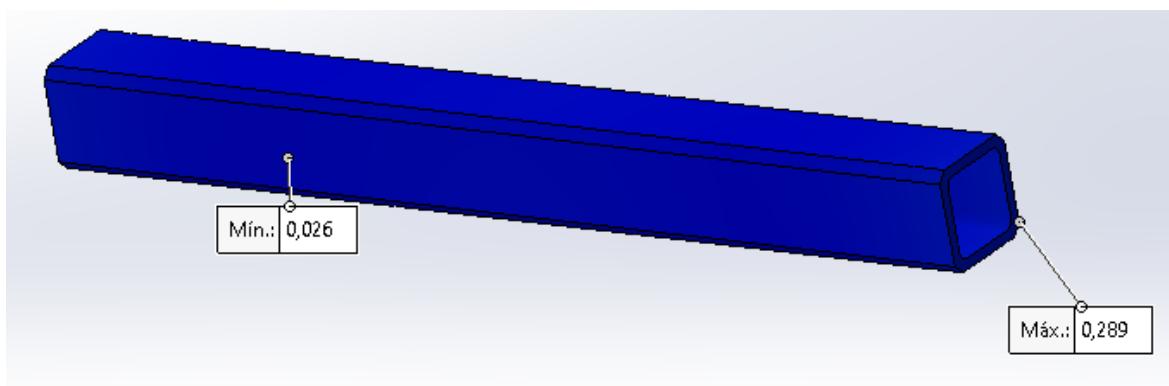


Figura 3: Perfil 100x100x10 de 1000 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

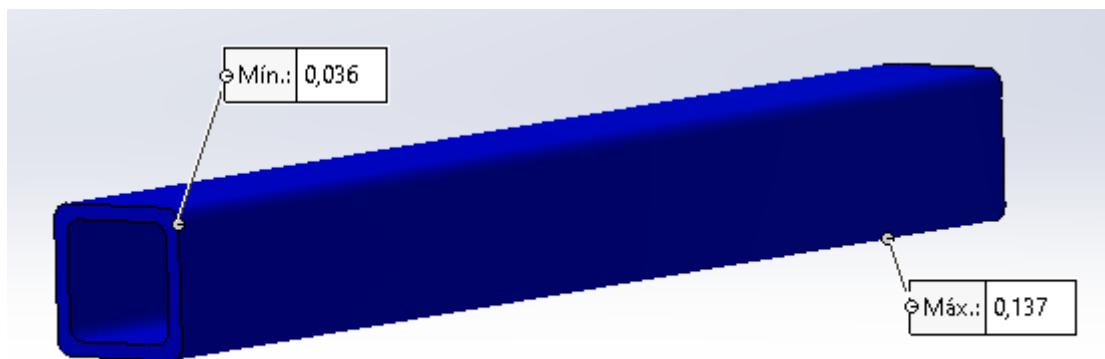


Figura 4: Puente del piquete 100x100x10 de 900 mm

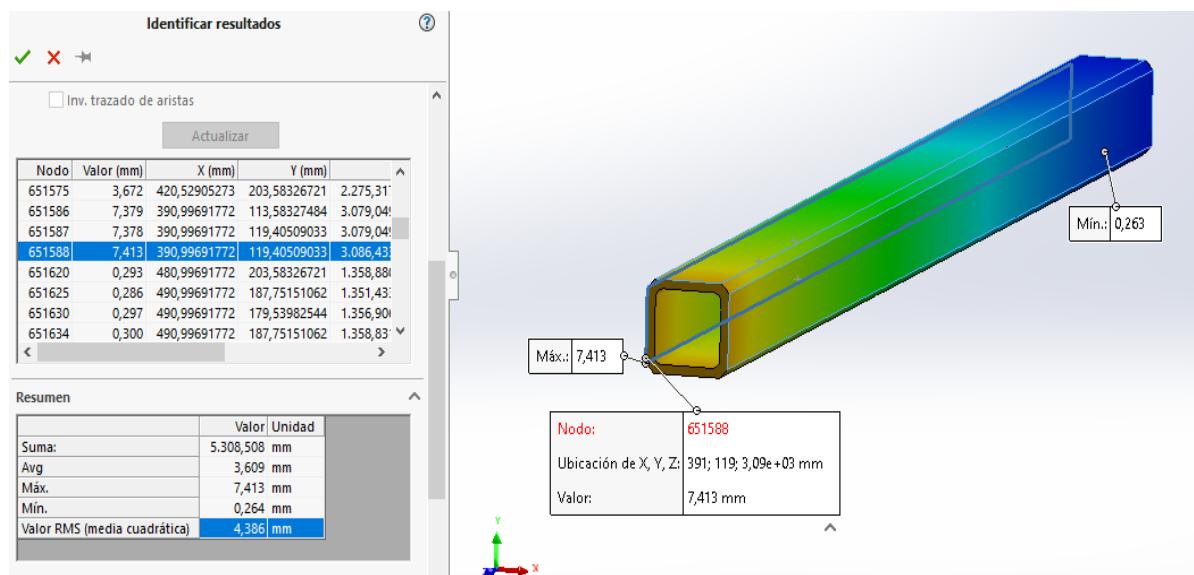


Figura 5: Perfil 100x100x10 de 1735 mm

Diseño y optimización de una grada de discos

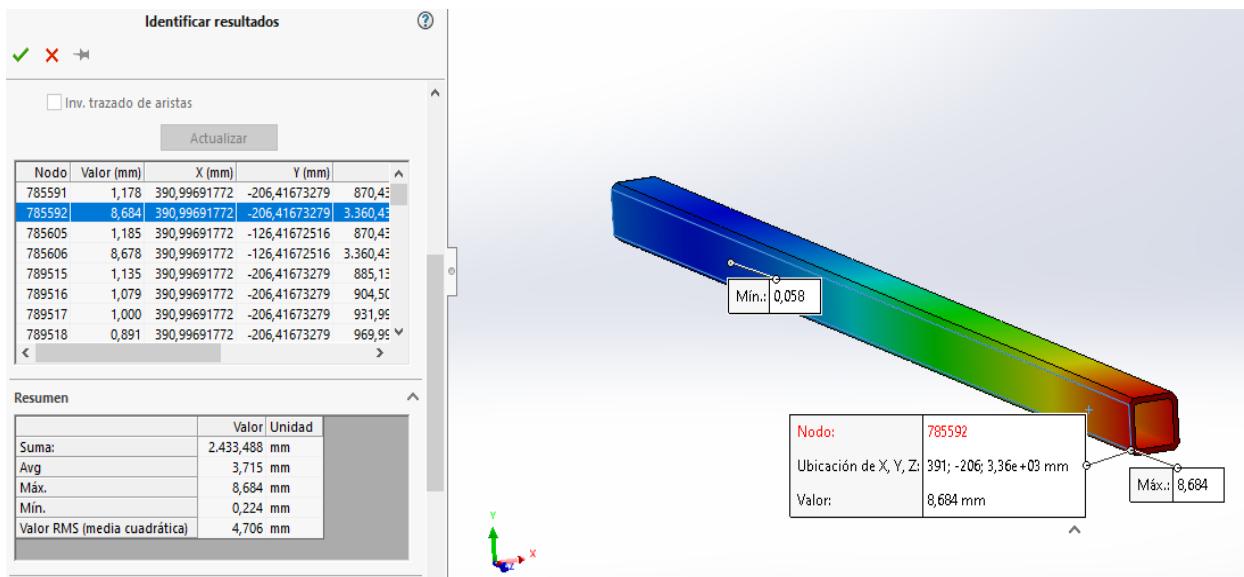


Figura 6: Perfil 100x100x10 de 2490 mm

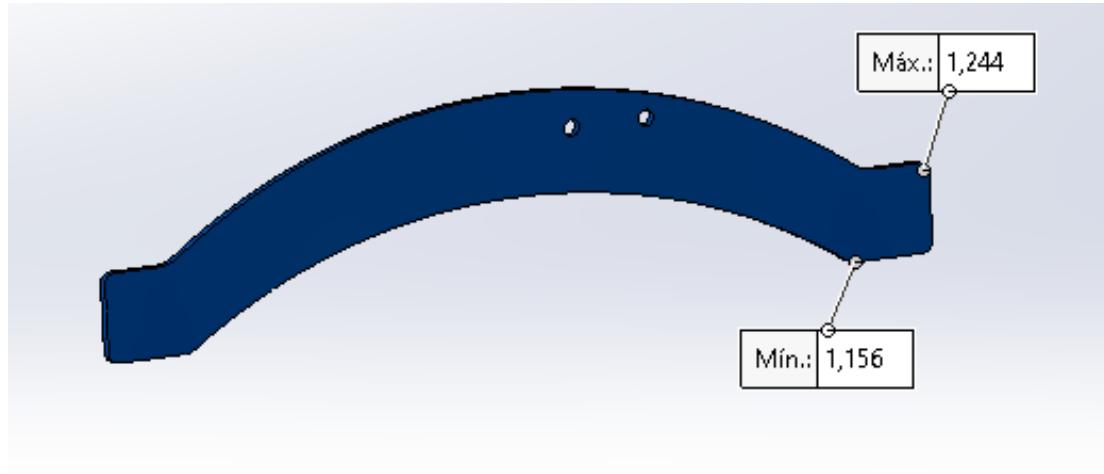


Figura 7: Unión exterior perfiles

Diseño y optimización de una grada de discos

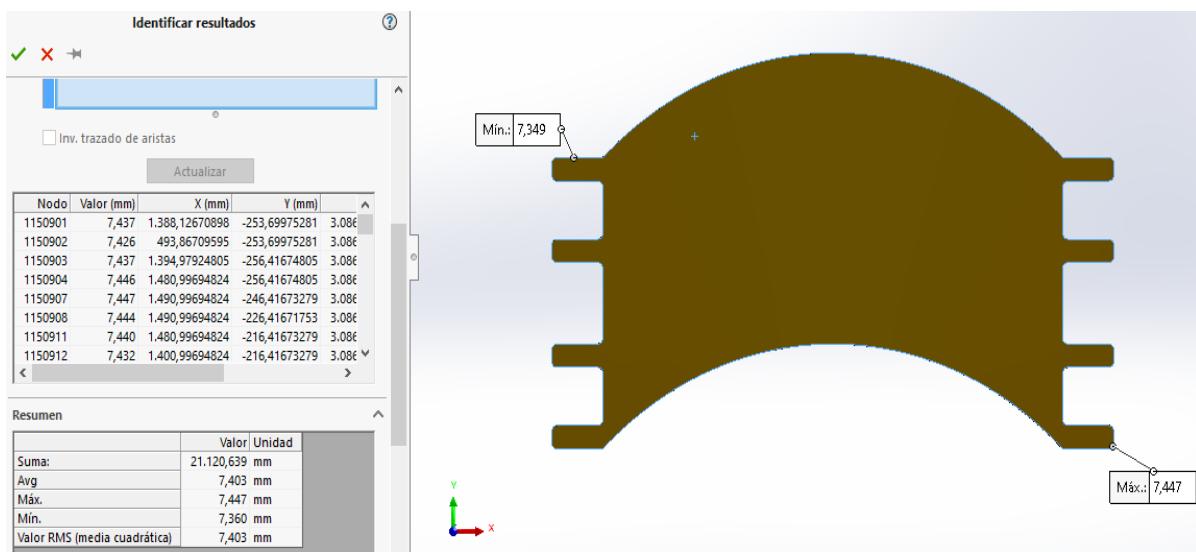


Figura 8: Soporte unión perfiles

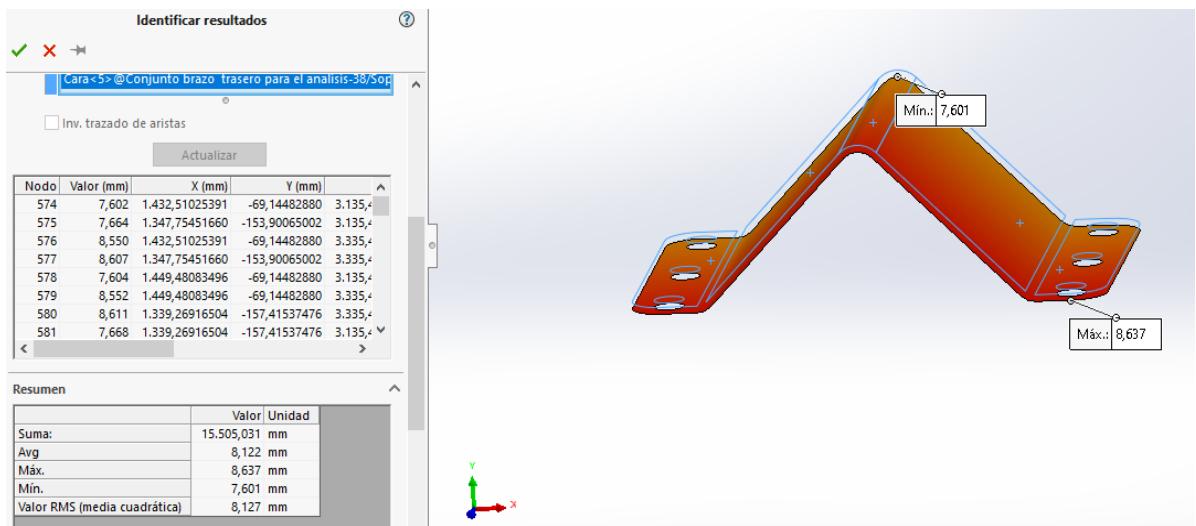


Figura 9: Soporte doblado parte superior

Diseño y optimización de una grada de discos

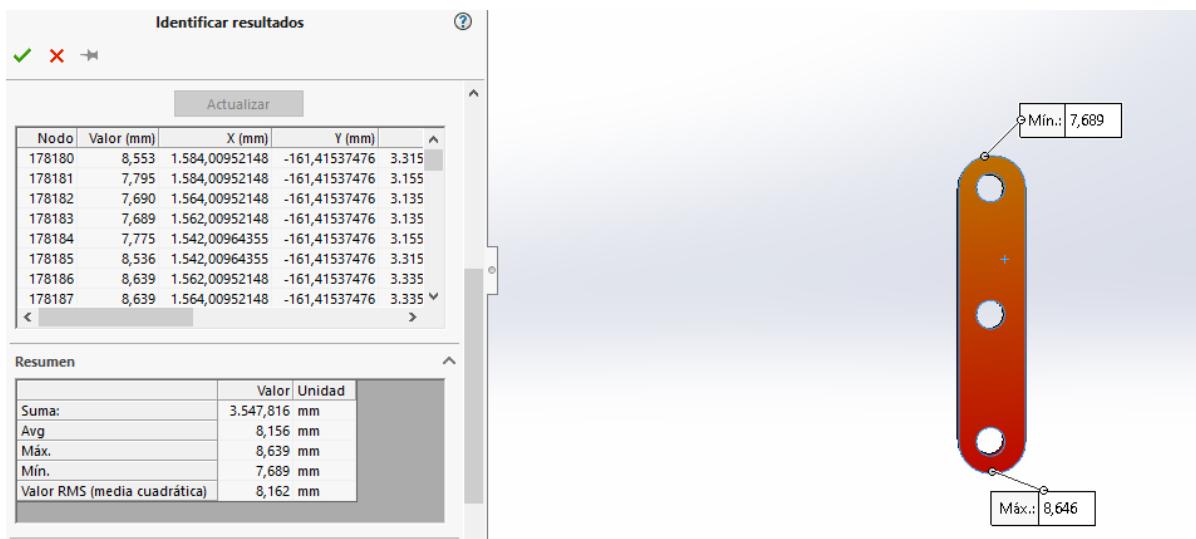


Figura 10: Separador bridas

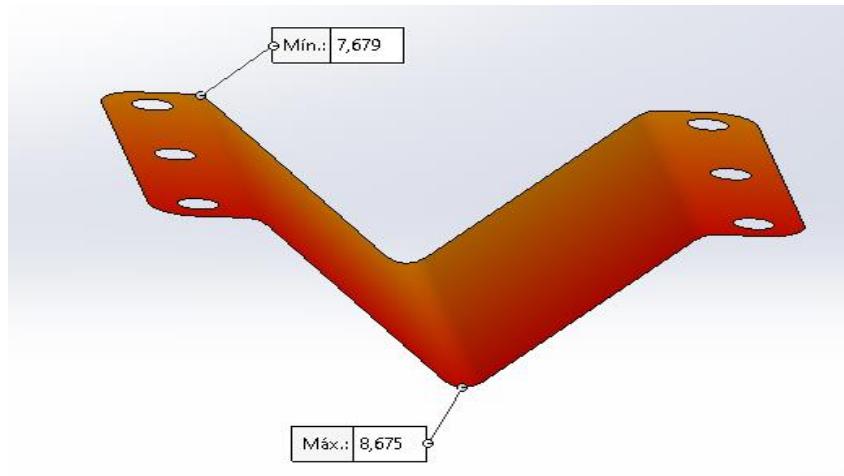


Figura 11: Soporte doblado parte inferior

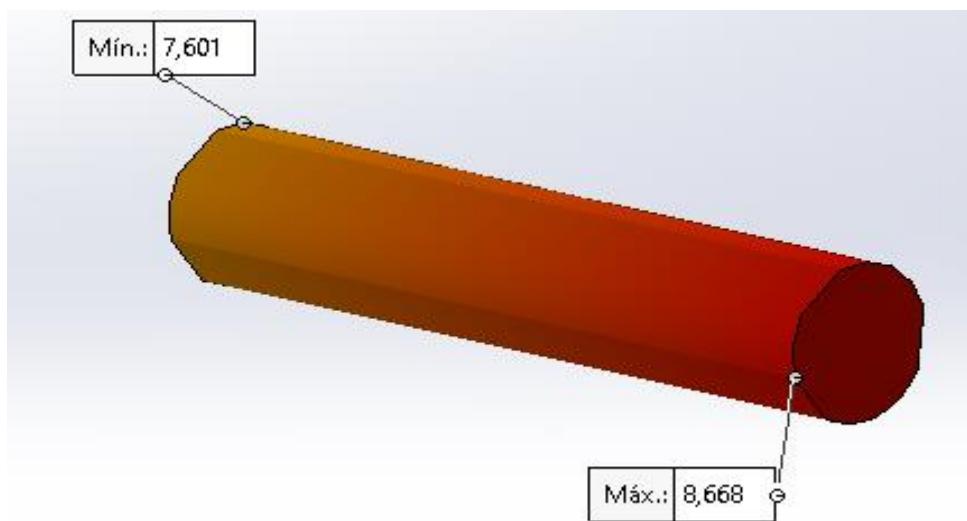


Figura 12: Elastómero

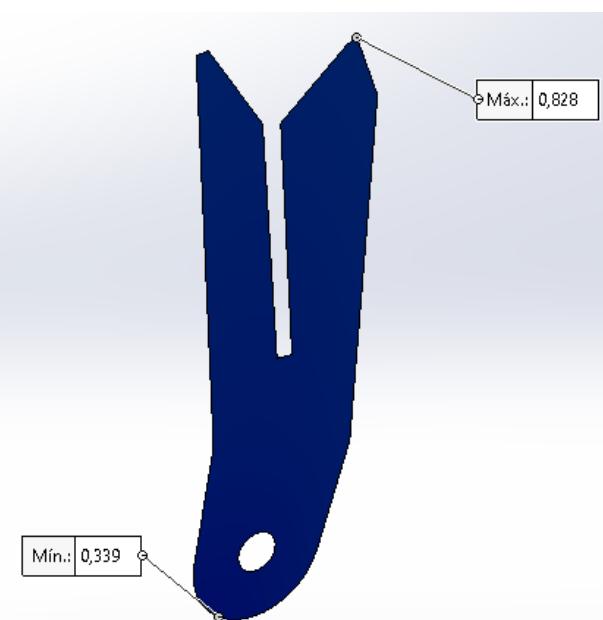


Figura 13: Brazo

Diseño y optimización de una grada de discos

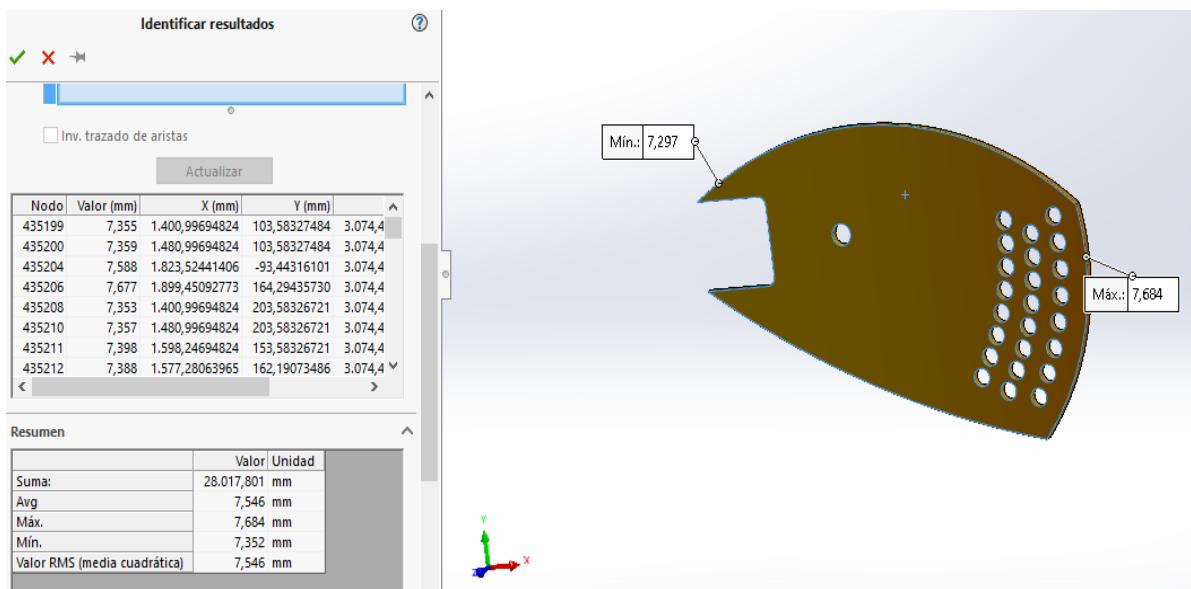


Figura 14: Cresta

RESUMEN CHASIS

Con toda esta información, se pueden sacar una serie de conclusiones a lo visto:

- En las piezas que se encuentras en las llamadas zonas críticas, las tensiones máximas se encuentras muy concentradas en determinados puntos, pero la media de ellas es relativamente baja
- La zona central es la que va enganchada al tractor y la que levanta toda la grada de discos. Cada vez que nos vamos alejando más de ella, los desplazamientos suben, con un crecimiento que podemos considerar exponencial, siendo el caso más desfavorable el brazo trasero más externo de la grada
- Como ya se nombró por encima, para ver el comportamiento real de los elastómeros, se tendría que llevar a cabo un análisis dinámico, y no estático. No se aprecian tensiones, ya que se trata de un análisis estático, pero vemos unos desplazamientos y deformaciones unitarias obtenidas por SolidWorks

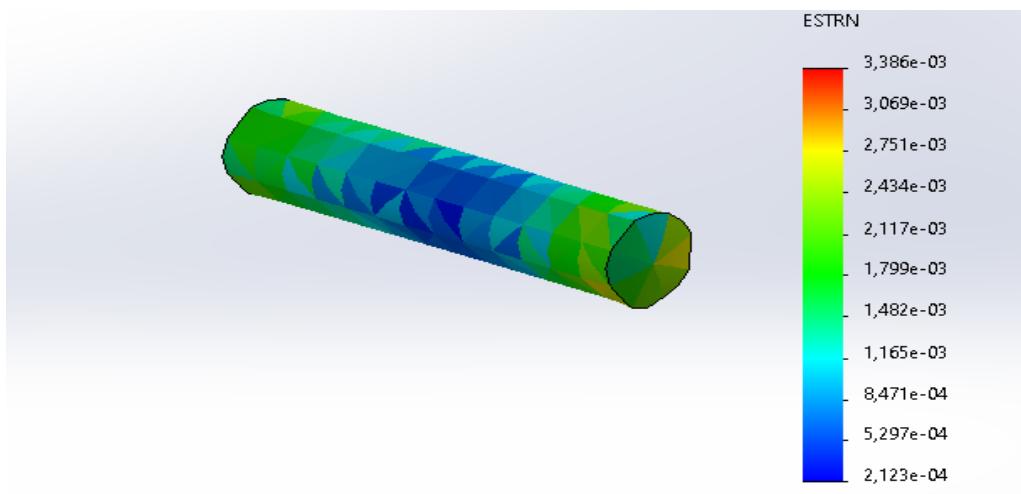


Imagen: Deformación unitaria que sufre el elastómero

E.3 SECCIÓN 2 – RODILLO

ANÁLISIS EN CURVATURA RODILLO

1. TENSIONES

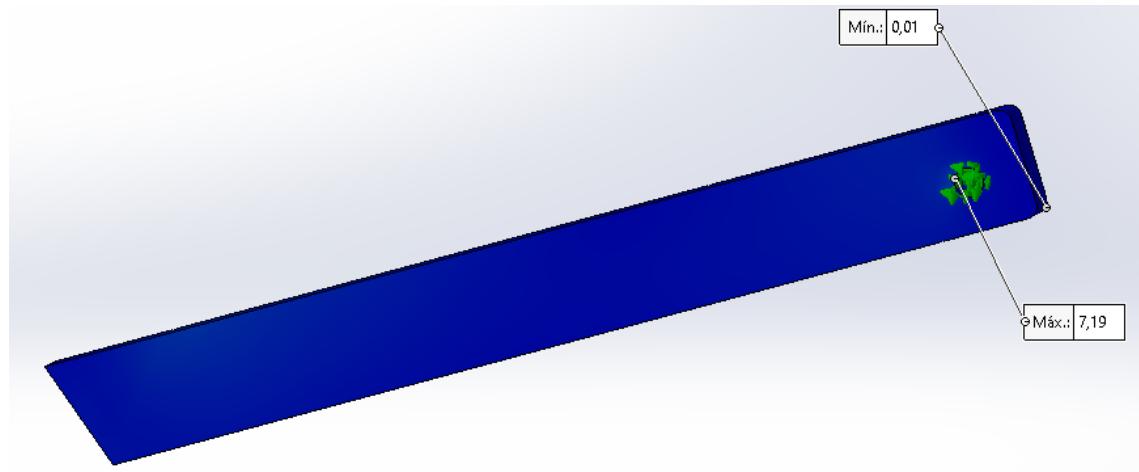


Figura 1: Tensiones máximas y mínimas en la barra de enganche

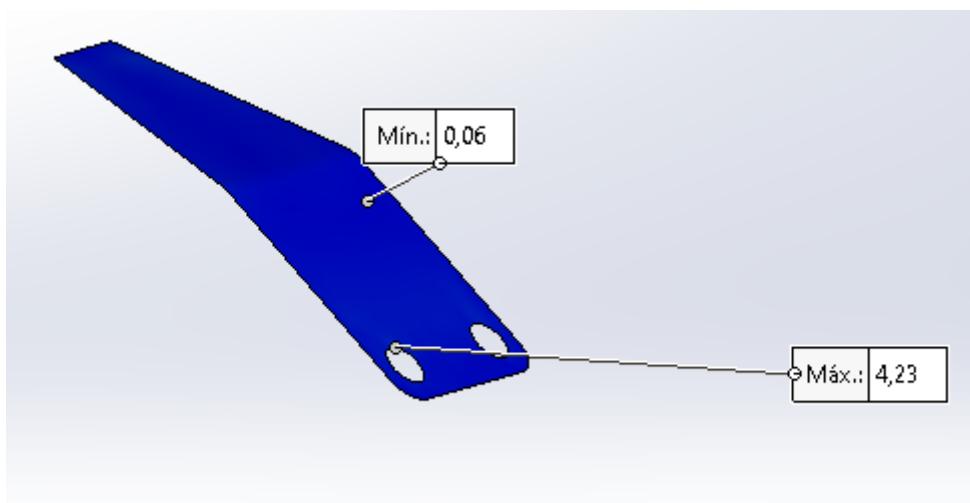


Figura 2: Tensiones máximas y mínimas en la sujeción del perfil-rodillo

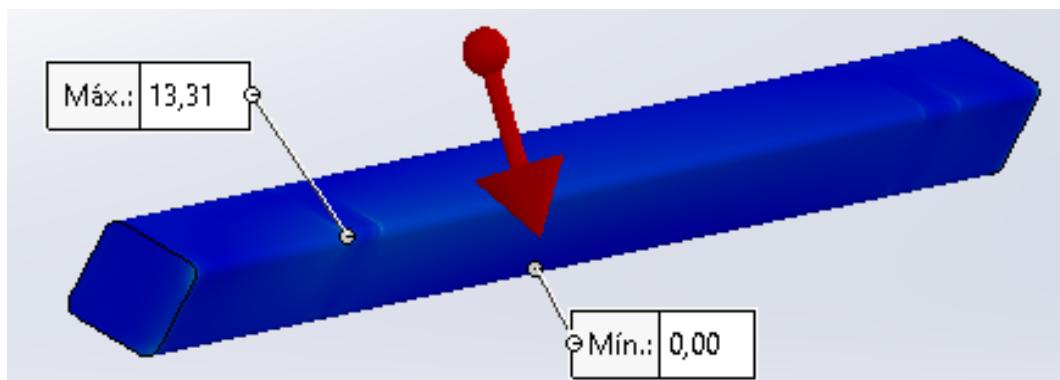


Figura 3: Tensiones máximas y mínimas en el perfil 80x80

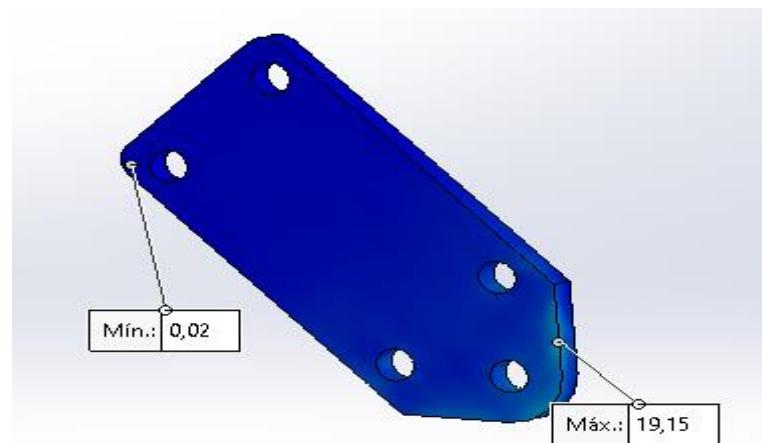


Figura 4: Tensiones máximas y mínimas en el soporte de la llanta

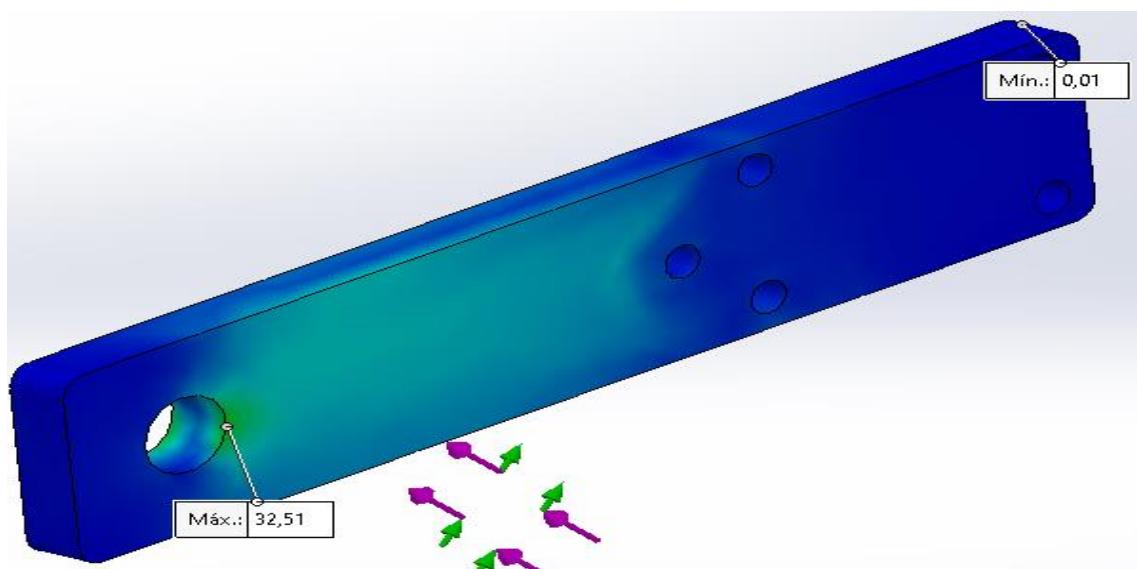


Figura 5: Tensiones máximas y mínimas en la llanta

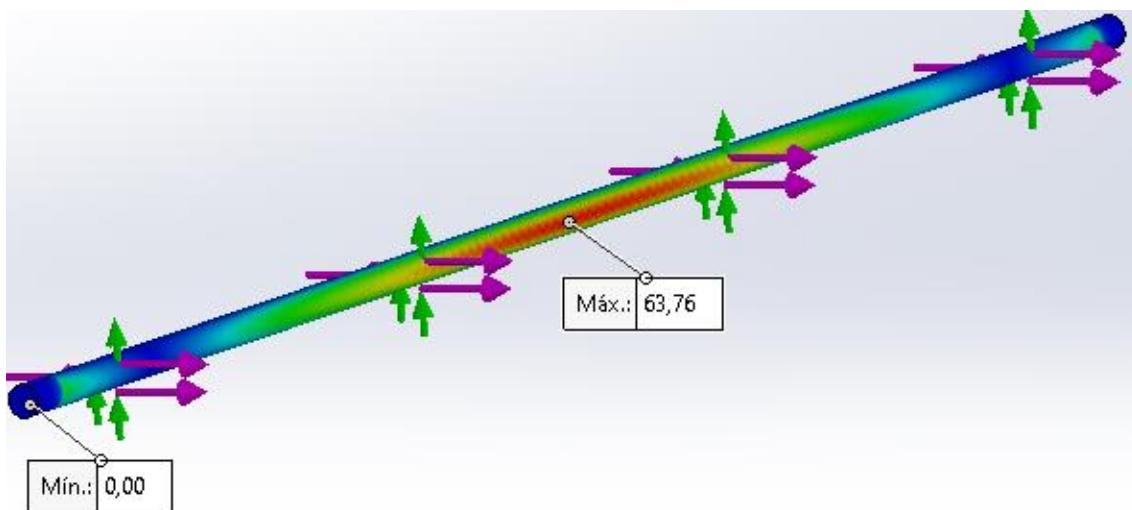


Figura 6: Tensiones máximas y mínimas en la varilla del rodillo

2. DESPLAZAMIENTOS

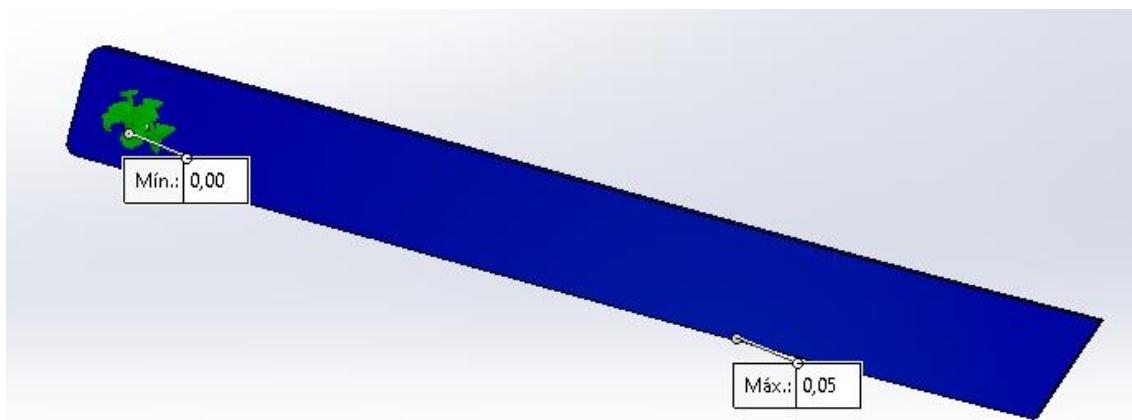


Figura 1: Desplazamientos máximos y mínimos en la barra de enganche

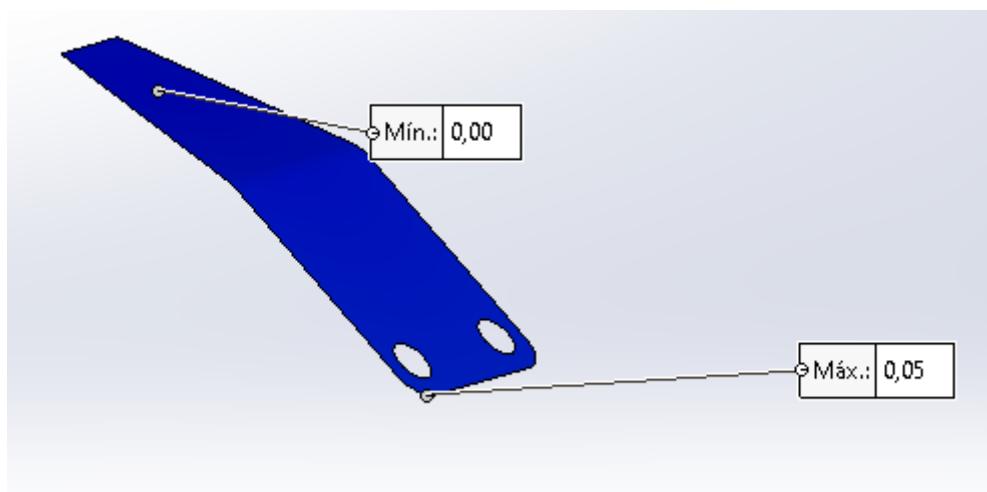


Figura 2: Desplazamientos máximos y mínimos en la sujeción del perfil-rodillo

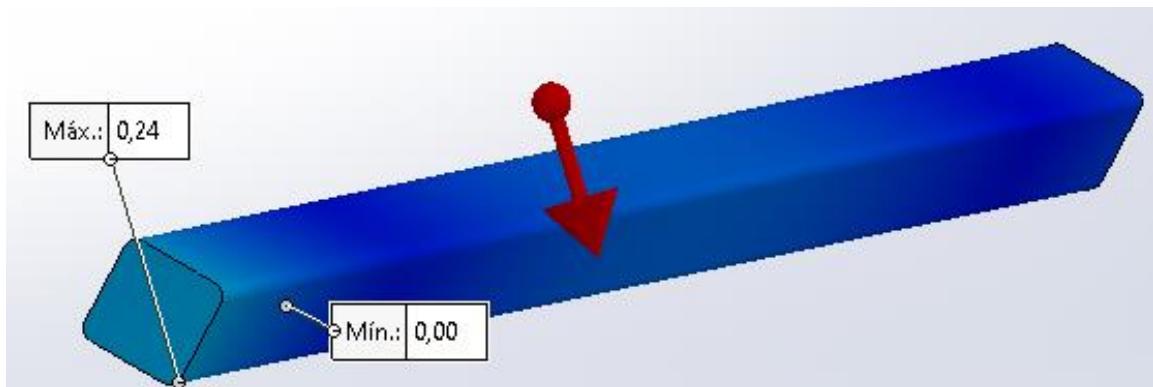


Figura 3: Desplazamientos máximos y mínimos en el perfil 80x80

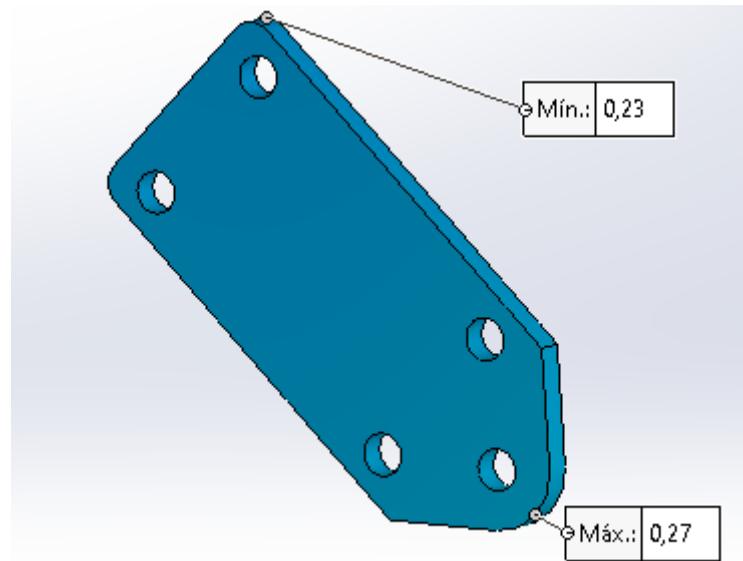


Figura 4: Tensiones máximas y mínimas en el soporte de la llanta

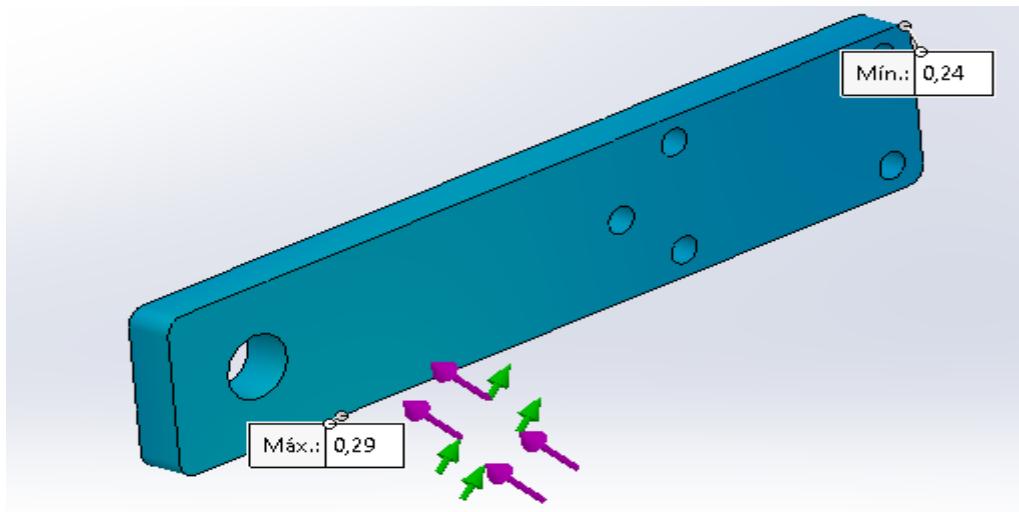


Figura 5: Desplazamientos máximos y mínimos en la llanta

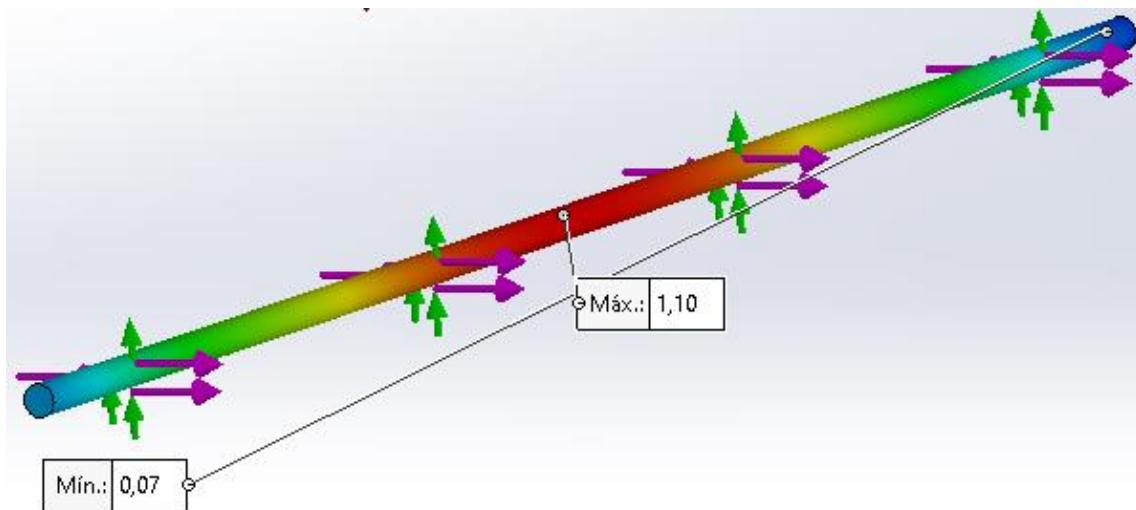


Figura 6: Desplazamientos máximos y mínimos en la varilla del rodillo

ANÁLISIS EN CURVATURA COMBINADO RODILLO

1. TENSIONES

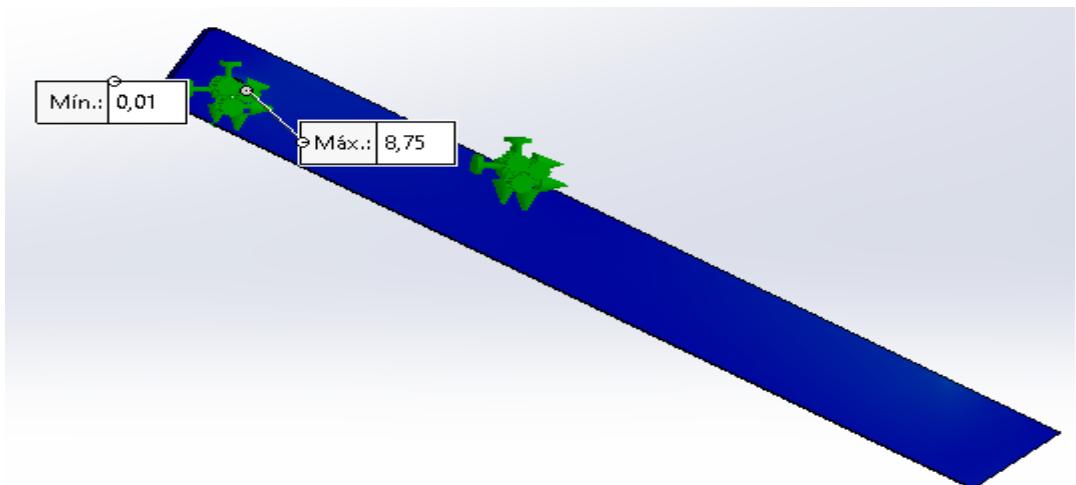


Figura 1: Tensiones máximas y mínimas en la barra de enganche

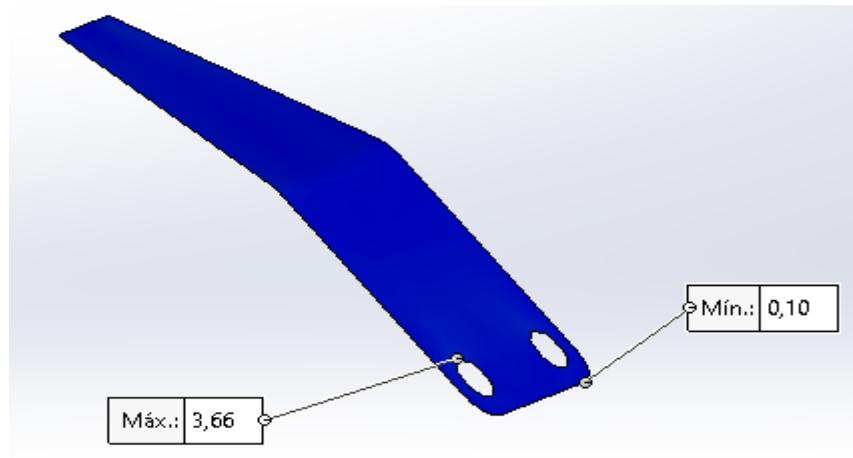


Figura 2: Tensiones máximas y mínimas en la sujeción del perfil-rodillo

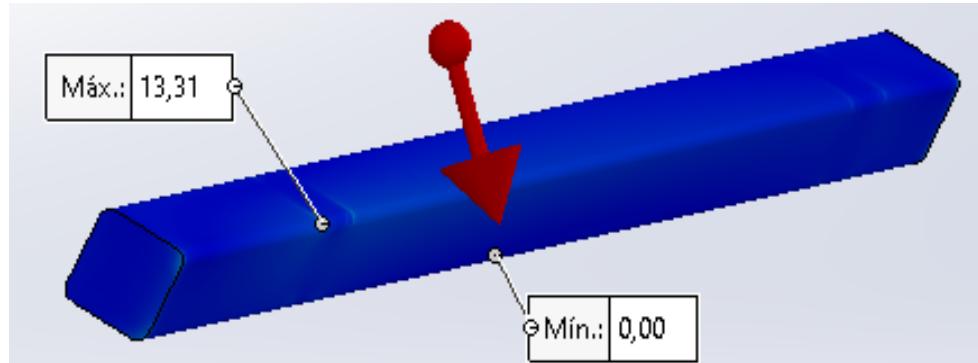


Figura 3: Tensiones máximas y mínimas del perfil 80x80

Diseño y optimización de una grada de discos

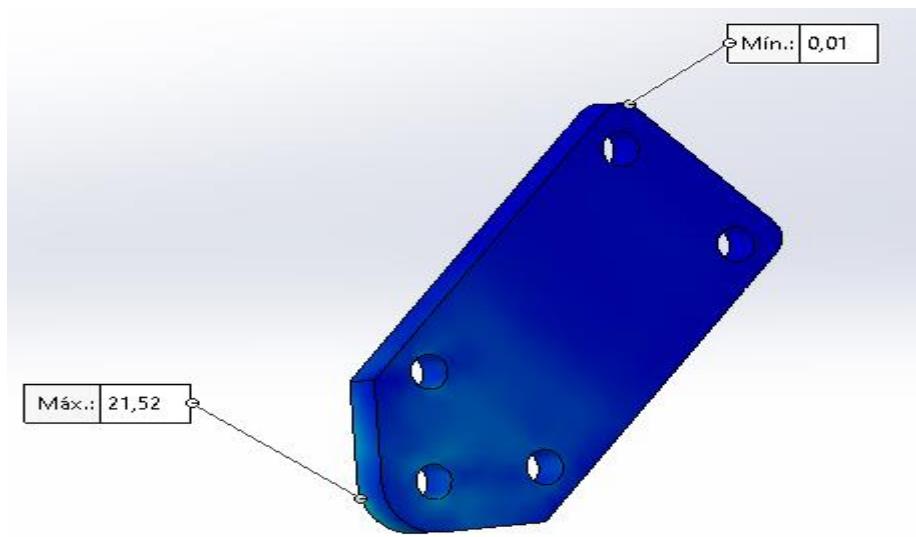


Figura 4: Tensiones máximas y mínimas del soporte rodillo

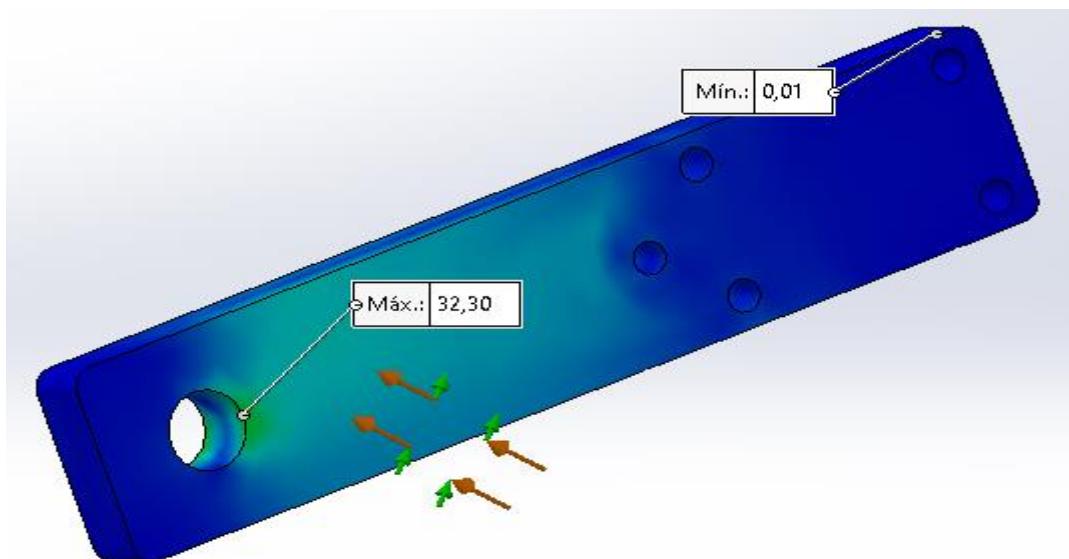


Figura 5: Tensiones máximas y mínimas de la llanta

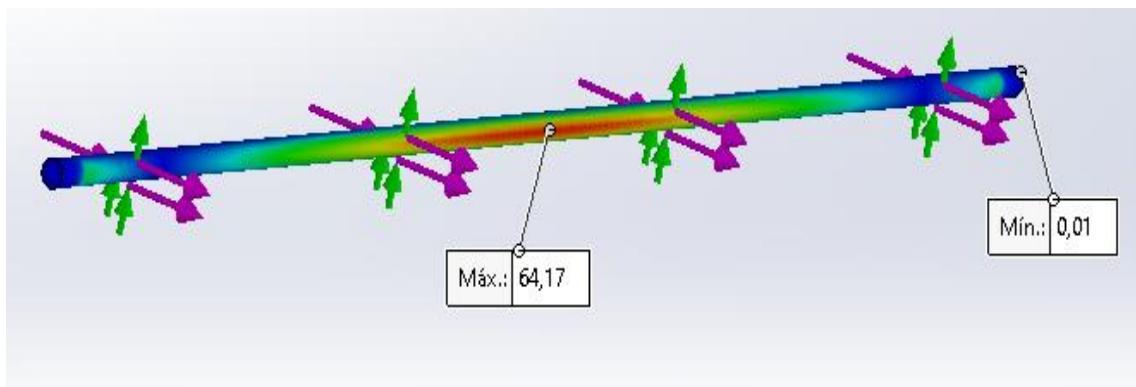


Figura 6: Tensiones máximas y mínimas de la varilla

2. DESPLAZAMIENTOS

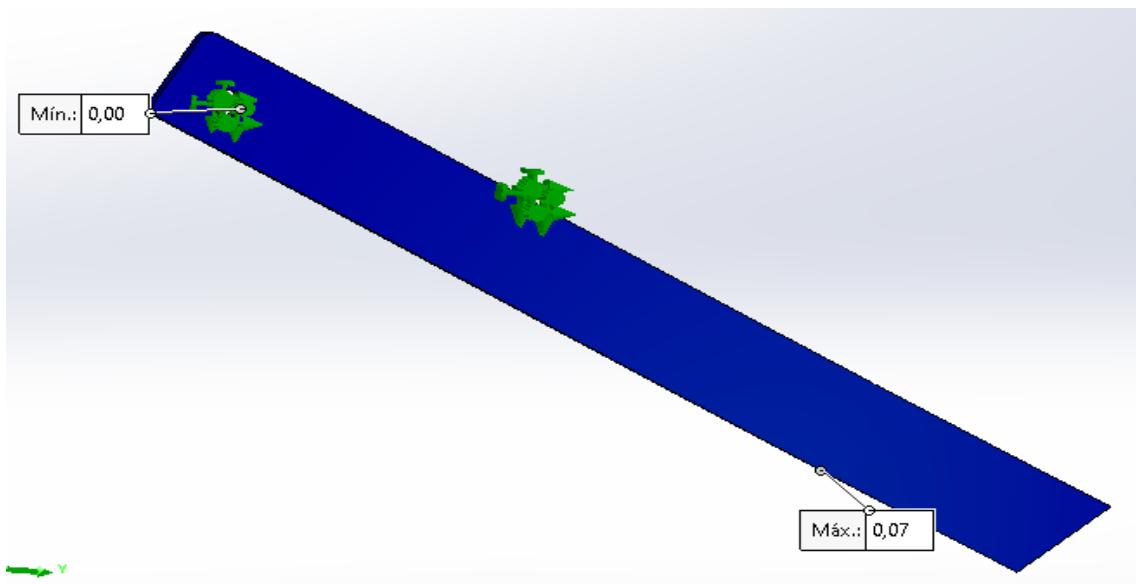


Figura 1: Desplazamientos máximos y mínimos en la barra de enganche

Diseño y optimización de una grada de discos

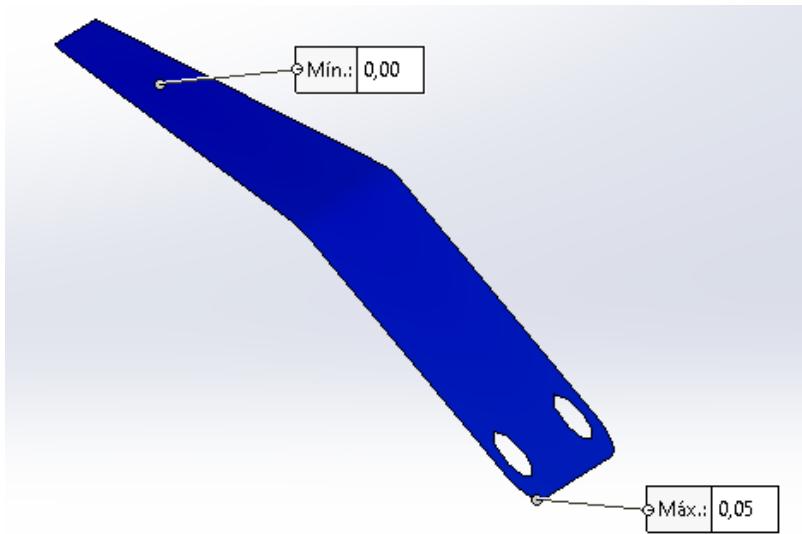


Figura 2: Desplazamientos máximos y mínimos en la sujeción perfil-rodillo

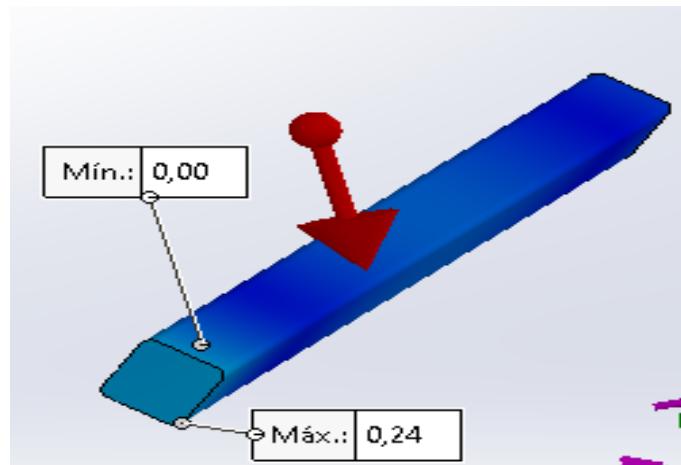


Figura 3: Desplazamientos máximos y mínimos del perfil 80x80

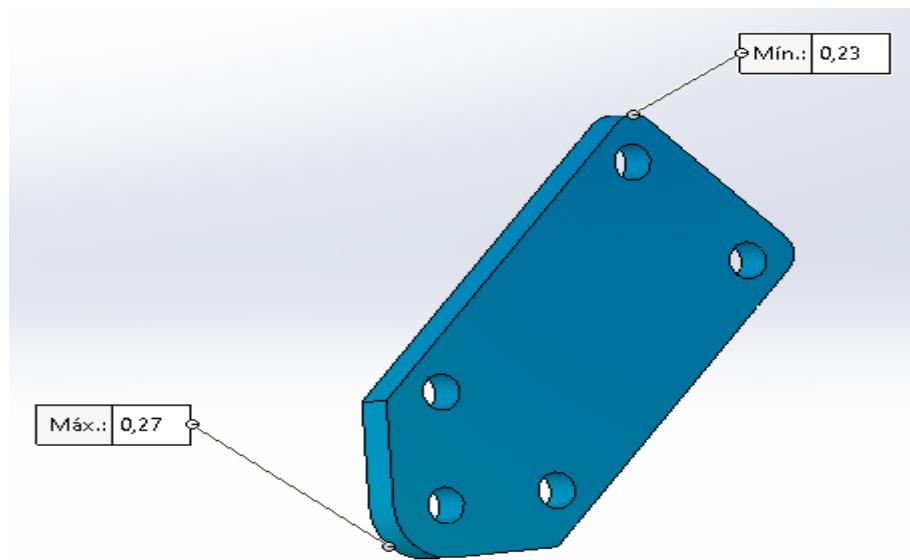


Figura 4: Desplazamientos máximos y mínimos del soporte rodillo

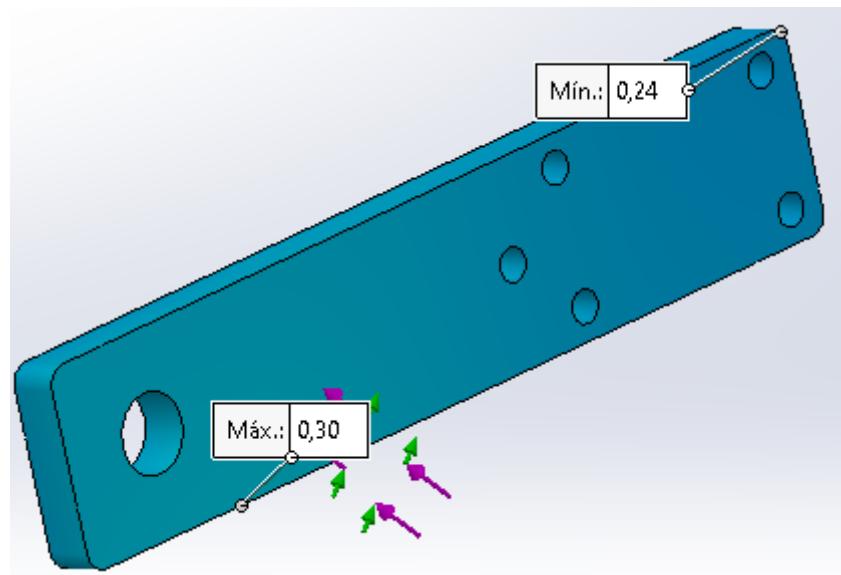


Figura 5: Desplazamientos máximos y mínimos de la llanta

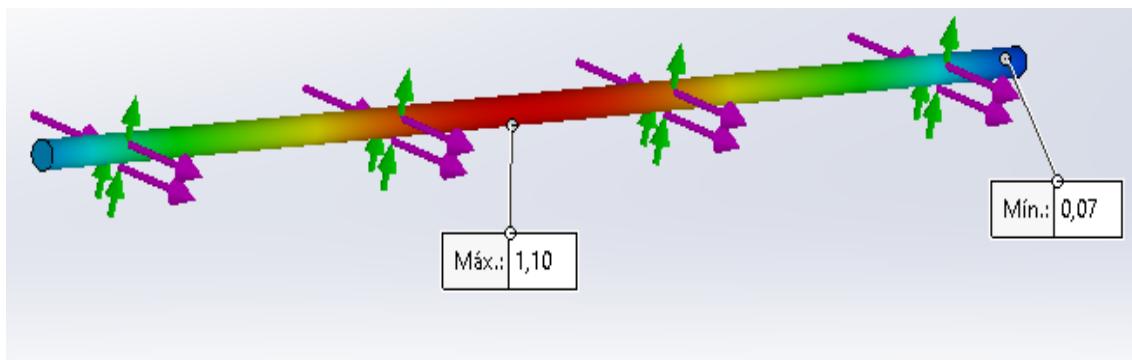


Figura 6: desplazamientos máximos y mínimos de la varilla

RESUMEN RODILLO

Se ha detallado elemento a elemento cuales son los puntos críticos que sufren cada uno de ellos con sus respectivos valores numéricos una vez se han aplicado una serie de fuerzas y condiciones de contorno. Ya se ha visto que las tensiones no son de unos ordenes de magnitud muy altos, obteniendo unos coeficientes de seguridad por encima de los establecidos como **correctos (3-5)**. Esto permite afirmar que tanto el material, que en este caso es un S355JR, como los espesores elegidos para cada una de las piezas, son los adecuados, y que no necesitan ningún tipo de refuerzo. En cuanto a los desplazamientos, son mínimos o nulos en todos los casos, excepto en la varilla, la cual va a estar en todo momento en contacto en el suelo. Este valor es del orden de 1 mm en el peor de los casos, lo cual tampoco es de especial preocupación.

ANEXO F: PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

La optimización del modelo es la segunda parte de mi trabajo, la cual no menos importante. Ya se ha visto que la máquina no sufre unas grandes tensiones y desplazamientos, pero cuenta con puntos en los cuales son más notorios y que se pueden mejorar.

Diseño y optimización de una grada de discos

F.1. SECCIÓN 1 – CHASIS/BASTIDOR

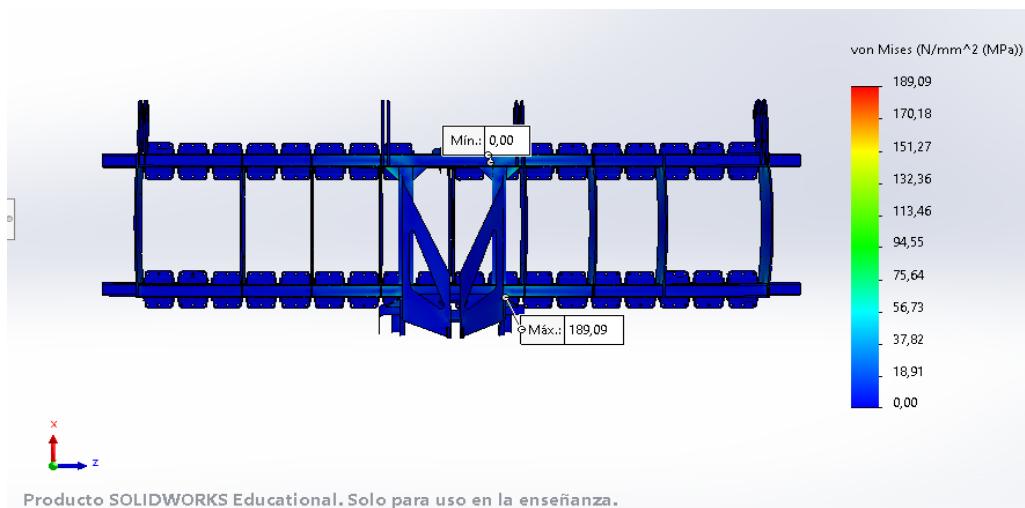


Imagen: Vista desde arriba de la grada de discos con todos sus refuerzos

Como se ha dicho en la memoria, se refuerza la zona del enganche mediante un cartabón 100x100x12 mm, además de un enganche concéntrico y uno lateral, para que no esté sometido a tanta tensión una vez se engancha al tripuntal del tractor.

Se ha conseguido un reparto de la tensión como yo deseaba, a costa de que suba unos 20 MPa en el perfil de 100x100x10 de 1000 mm, pero que tampoco supone nada significante, por lo que consideraremos que las mejoras son suficientes y que se adaptan a las exigencias establecidas.

Se podría reducir aún más las tensiones aumentando las dimensiones de los refuerzos, el espesor o cambiando el material, pero eso conllevaría también a un aumento del peso de la máquina, lo cual es innecesario. No se ha nombrado pero se va a seguir trabajando con el material S355JR, el cuál aporta todo lo que se necesita.

Ya que se trata también de una parte fundamental del modelo, se han querido mejorar los piques, que, aunque no estaban solicitados en exceso, con coeficientes de seguridad **superiores a 5**, no está de más intentar mejorarlo.

Se va a introducir unos refuerzos para los agujeros, que serán unas pletinas, para que el bulón tenga más apoyo cuando se enganche.

En cuanto a la estructura, vamos a meter una placa frontal, que reduzca esfuerzos tanto en piques como en el perfil central.

El material de todos los componentes será el S355JR.

1. TENSIONES

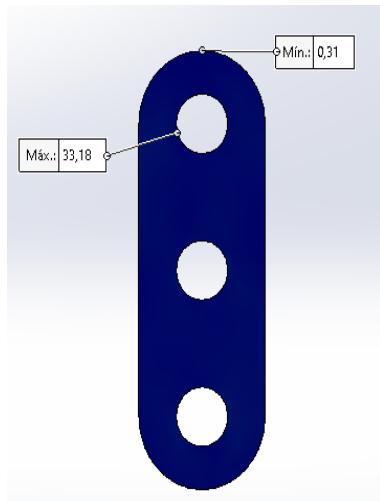


Figura 1: Refuerzo enganche bulones

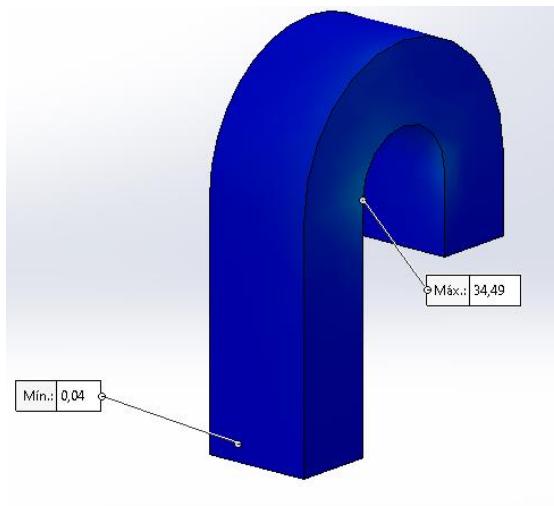


Figura 2: Refuerzo enganche concéntrico

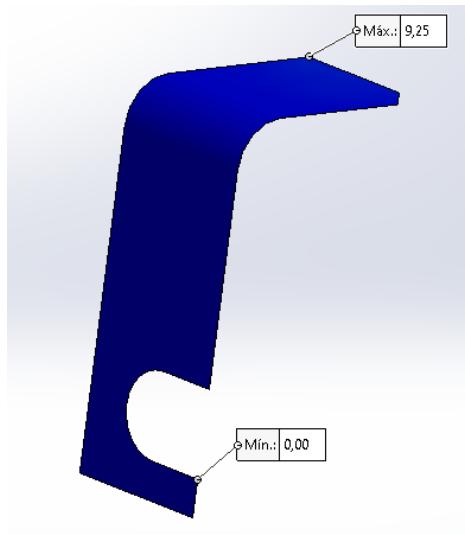


Figura 3: Refuerzo enganche lateral

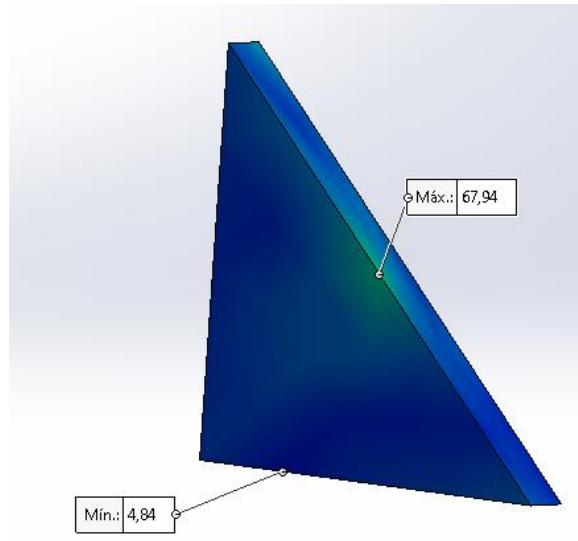


Figura 4: Cartabón 100x100x12 mm

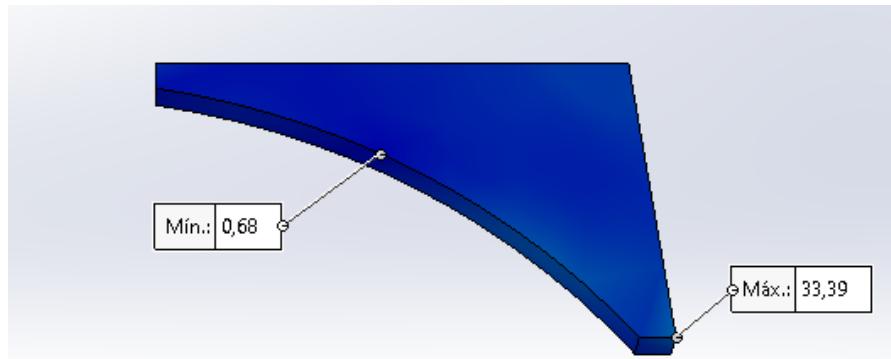


Figura 5: Cartabón enganche grada

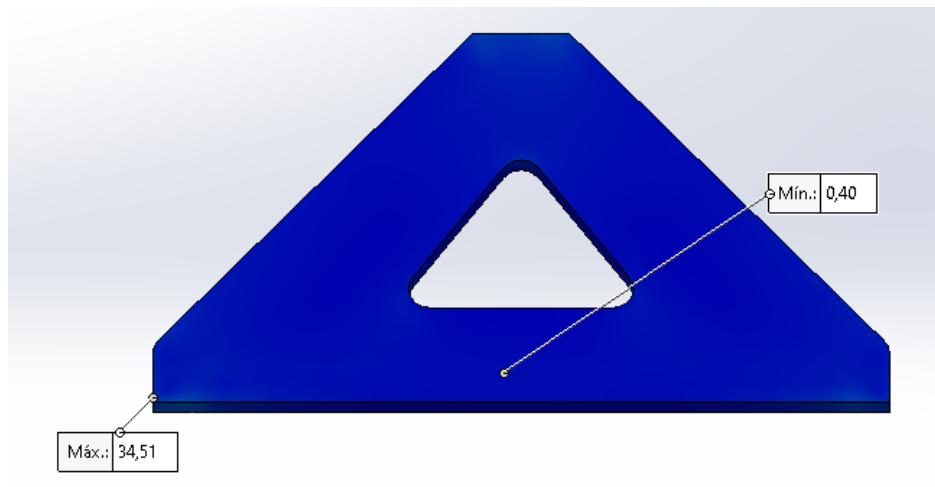


Figura 6: Refuerzo piquete

2. DESPLAZAMIENTOS

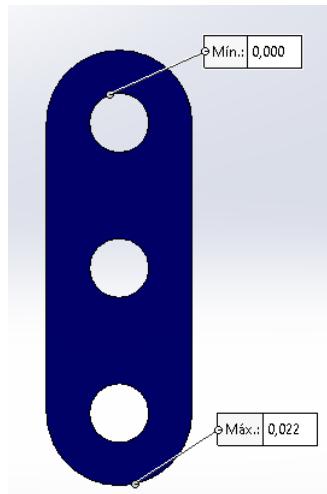


Figura 1: Refuerzo enganche bulones

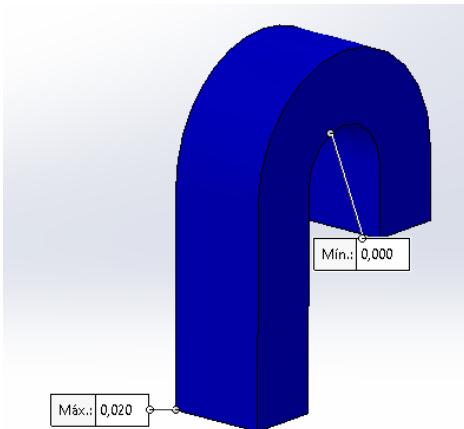


Figura 2: Refuerzo enganche concéntrico

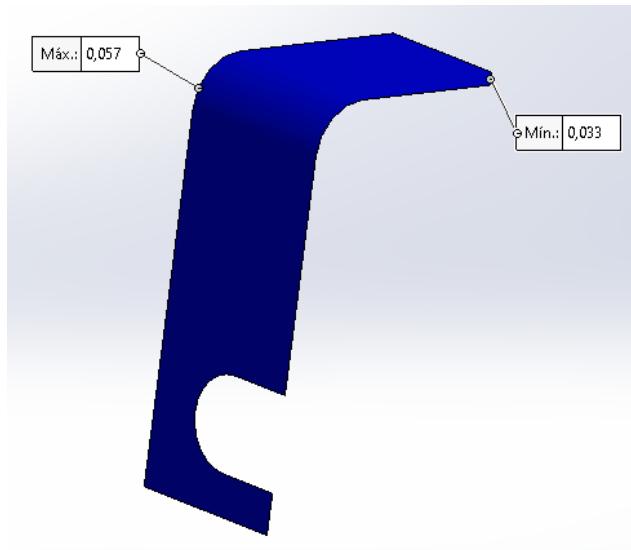


Figura 3: Refuerzo enganche lateral

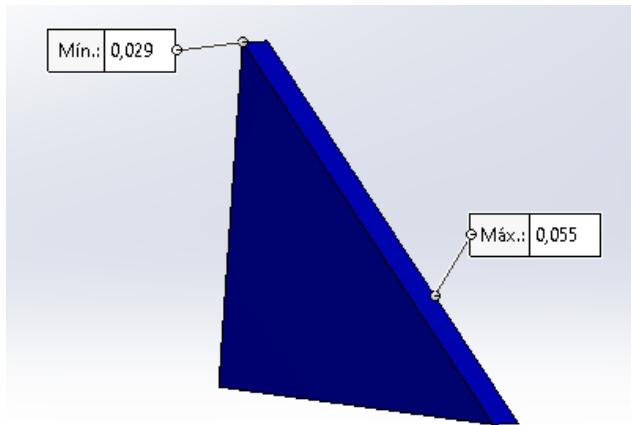


Figura 4: Cartabón 100x100x12 mm

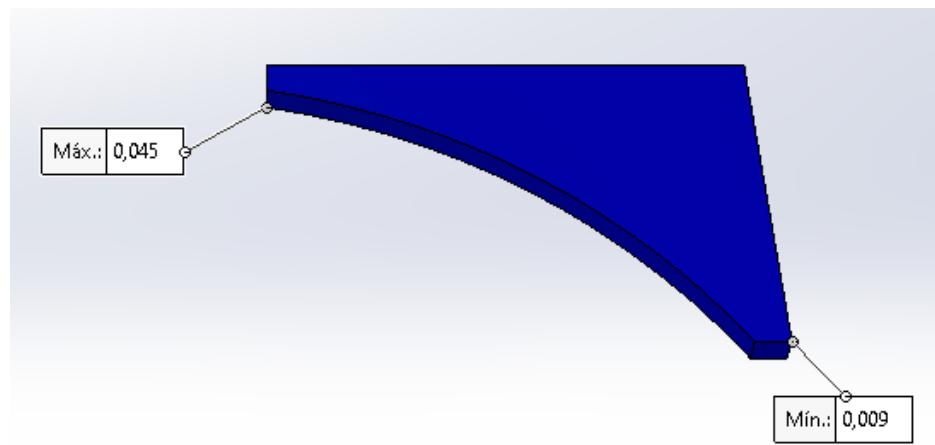


Figura 5: Cartabón enganche grada

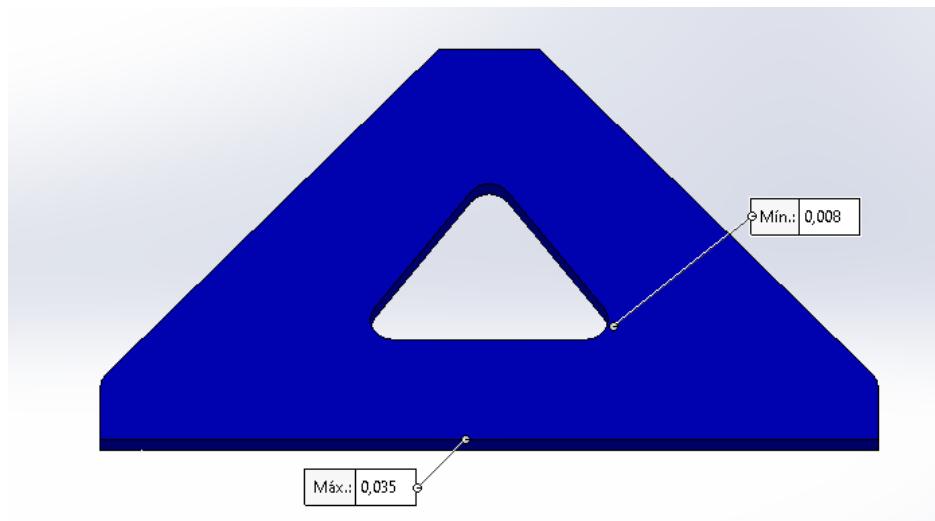


Figura 6: Refuerzo piquete

RESUMEN CHASIS

Se han mostrado todas las tensiones y desplazamientos que sufren los refuerzos introducidos.

En cuanto a tensiones, la más alta se da en el cartabón. Esta es de 68 MPa. Se encuentra en el mayor concentrador de tensiones de la grada de discos, por lo que es lógico que

Diseño y optimización de una grada de discos

soporte la tensión más alta de todos los refuerzos. En el resto de piezas, las tensiones máximas rondan los 30 MPa, lo cual no es muy significante.

En cuanto a los desplazamientos, al igual que sin refuerzos, en esta zona del enganche, los desplazamientos son nulos.

F.2 SECCIÓN 2 - RODILLO

El rodillo es el otro modelo a optimizar en el proyecto. En la memoria, ya se ha visto que solo había que modificar la varilla, debido a que el desplazamiento era muy alto. Ya se ha mostrado cuál era su solución junto con su resultado en forma de imagen, por lo que no habrá que resaltar más en este apartado.