



Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

DISEÑO DE UN BASCULANTE PARA UNA
MOTOCICLETA DE COMPETICIÓN MOTOSTUDENT
CUARTA EDICIÓN

Autor:

JOSE MARIA RIPOLL ROMERO

Director:

Dr. FRANCISCO MORENO GÓMEZ

ESCUELA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
Zaragoza, Noviembre 2016



Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

DISEÑO DE UN BASCULANTE PARA UNA
MOTOCICLETA DE COMPETICIÓN MOTOSTUDENT
CUARTA EDICIÓN

Autor:

JOSE MARIA RIPOLL ROMERO

Director:

Dr. FRANCISCO MORENO GÓMEZ

ESCUELA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
Zaragoza, Noviembre 2016

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

D./Dª. Jose Maria Ripoll Romero

con nº de DNI 53766402-S en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

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

Grado

, (Título del Trabajo)

DISEÑO DE UN BASCULANTE PARA UNA MOTOCICLETA DE LA COMPETICION

MOTOSTUDENT CUARTA EDICION

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

Zaragoza, 24/11/2016


Fdo: JOSE MARIA RIPOLL ROMERO

Diseño de un basculante para una motocicleta de la competición Motostudent cuarta edición

Resumen

El proyecto abordado en este documento trata sobre el estudio de diseño de un basculante para una motocicleta de la competición Motostudent cuarta edición. El cual ha sido diseñado y creado por y para el equipo de estudiante de la Universidad de Zaragoza de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura inscritos en esta competición con el nombre de Motostudent Unizar.

Se realiza un seguimiento de los hitos alcanzados día a día para conseguir el prototipo que finalmente será implantado en la motocicleta.

El estudio aborda una comparativa de los diferentes materiales y tipos de basculantes. Dos modelos de chapa delgada uno en acero de alta resistencia y otro en aluminio mientras que el tercero es una mejora del basculante tubular creado para la motocicleta del equipo Motostudent Unizar en la tercera edición de la competición.

Los diseños han sido realizados mediante la herramienta de diseño asistido por ordenador “Solidworks 2015” y posteriormente ensayados con la misma herramienta por el medio de elementos finitos (MEF) que el programa CAD incorpora.

Para la elección del mejor diseño creado en este proyecto se han tenido en cuenta no solo los factores estructurales sino que también se ha estudiado los medios de fabricación al alcance del equipo así como los costes de dicha fabricación.

El basculante aquí estudiado es un pieza dentro de un ensamblaje de más de 1.000 elementos por lo que es imprescindible contar con los demás miembros del equipo y sus diferentes departamentos; que en mayor o en menor medida están ligados con el diseño y la fabricación, de tal forma que el basculante creado pueda integrarse adecuadamente con el resto de elementos.

Agradecimientos

En primer lugar, he de decir que este proyecto no hubiera sido posible sin todos y cada uno de los integrantes del equipo MotoStudent Unizar, con los que durante 730 días he compartido aspiraciones, la nave como segunda casa, sufrimientos, cavilaciones, discusiones, miles de hora sin dormir, aprendizaje, crecimiento pero sobretodo, hemos compartido un sueño. El sueño de poder montar una moto desde cero. Gracias a todos ellos por permitirme aportar mi pequeño grano de arena y formar entre todas una montaña gigante de la que me siento realmente orgulloso.

Por supuesto, no hay equipo sin un líder. Francisco Moreno Gómez, gracias de corazón por no haber sido un jefe de grupo, por no habernos visto como 10 alumnos más. Gracias por haber sido un compañero con el que poder trabajar mano a mano y sacar de nosotros todo lo que ni siquiera sabíamos que teníamos. No eres un profesor cualquiera, y para el equipo, MotoStudent siempre llevará tu nombre.

Por último, gracias a toda la gente que nos ha visto caer una y otra vez, que nos ha visto desesperarnos cuando el trabajo no salía, que nos ha visto correr porque no llegábamos a la fecha. Habéis visto de todo, menos a nosotros. Apenas aparecíamos por casa y aún así nos habéis seguido apoyando como el primer día. Porque, desde luego, fuisteis vosotros, amigos y familia, los que cuando falló la moto en la competición estuvisteis ahí para ponernos el hombro y, sin ninguna palabra, permitirnos un sitio en el que después de todo seguir sintiéndonos seguros. La “mañica” más vuestra que nuestra.

TABLA DE CONTENIDOS:

1. Objeto.....	1
2. Competicion Motostudent.....	2
3. Historia del basculante.....	3
4. Tipos de Basculante.....	4
• Basculante Doble brazo.....	5
• Basculante monobrazo.....	6
5. Análisis de materiales.....	8
• Acero.....	8
• Aluminio.....	9
6. Simulaciones.....	11
• Condiciones de contorno.....	11
• Tipo de cargas.....	12
7. Diseños de basculantes.....	16
• Dimensiones.....	16
• Rígidez.....	16
• Peso.....	16
Diseños preliminares.....	17
• Chapa de Acero.....	17
• Tubular.....	20
• Chapa de Aluminio.....	20
Diseños definitivos.....	21
• Chapa de Acero.....	21
• Tubular.....	24
• Chapa de Aluminio.....	26
8. Comparación de diseños definitivos.....	27
9. Conclusiones.....	30
Bibliografía.....	31

1. Objeto

El Objeto de este proyecto final de grado consiste en diseñar un basculante para una motocicleta de competición que cumpla los requisitos marcados tanto por el equipo Motostudent Unizar como por la competición Motostudent.

El basculante de una motocicleta es un elemento estructural que junto con el chasis y el subchasis marcan el bastidor del vehículo. Dada la importancia estructural del bastidor es de vital importancia que el diseño del basculante siga unos requisitos rigurosamente estudiados. Estos estándares son las geometrías de la motocicleta así como el sistema de suspensión que está íntimamente ligado al basculante pues marcará muy de cerca el comportamiento en competición.

Ya que la motocicleta es un conjunto de muchos ensamblajes y subensamblajes es importante reconocer la necesidad de un trabajo en equipo, puesto que las modificaciones realizadas sobre la pieza en cuestión influirán directamente sobre el resto de componentes diseñados por otros integrantes del grupo y viceversa.

A continuación se realiza el estudio necesario para llevar a cabo el diseño y fabricación de un basculante para una motocicleta de la competición Motostudent cuarta edición. Desde el estudio del primer basculante creado en la historia hasta la actualidad; los materiales más utilizados para esta pieza en el mundo de la competición así como para el uso comercial, y los materiales al alcance del equipo Motostudent Unizar y de los problemas de diseño encontrados a lo largo de todos los basculantes hasta llegar al definitivo.

2. Competición Motostudent

Motostudent es una competición internacional bianual en la que participan distintas universidades de todo el mundo. El objetivo es diseñar y desarrollar un prototipo de motocicleta de competición a partir de un kit básico dado, así como un proyecto industrial de fabricación en serie y un proyecto de innovación.

La competición está promovida y desarrollada por la fundación Moto Engineering Foundation (MEF). Dicha fundación fomenta el desarrollo tecnológico en el sector del motociclismo en líneas de investigación, ensayos técnicos y formación.

La cuarta edición se ha caracterizado por la existencia de dos categorías:

- Motostudent Petrol: prototipos de 250cc y 4 tiempos.
- Motostudent Electric: prototipos 100% eléctricos.

Una vez elegido una de las dos categorías en las que se va a participar valorando las ventajas del equipo para ver en cuál se puede destacar más se puede empezar el proyecto. La competición general consta de dos fases entre las cuales se reparte al 50% la asignación de puntos que cada equipo obtiene para la clasificación final.

La primera fase, MS1, comprende el proyecto de innovación y el proyecto industrial. En cuanto a la innovación se trata de conseguir un diseño nunca visto en MotoStudent e incorporarlo al prototipo. Por otro lado, el industrial hace referencia a la elaboración precisa y detallada de un proceso de fabricación de 600 motocicletas de competición por año, con un coste unitario menor de 4850€ para la de gasolina y 9750€ para la eléctrica.

La segunda fase, MS2, reúne todo lo relacionado con el prototipo: verificaciones técnicas y dinámicas, pruebas de aceleración, frenada y gymkana, así como un fin de semana completo de competición con entrenamientos libres y clasificatorios y, finalmente, una carrera entre los prototipos.

La prueba de velocidad en la que participan todos las motocicletas inscritas en la competición que hayan podido pasar correctamente las pruebas anteriormente expuestas se lleva a cabo en el circuito internacional de Motorland, Aragón.

3. Historia del basculante

El basculante no fue inventado como parte móvil del bastidor hasta el año 1913, anteriormente el chasis y el basculante se consideraban un elemento rígido, ahora llamado suspensión rígida.

La primera suspensión trasera, la cual hace que el basculante sea móvil, la introdujo BMW y Norton con el sistema Plunger, aunque sus limitaciones eran evidentes, ya que la incorporación de dos muelles arruinó el efecto de la triangulación trasera. También se suma a las desventajas que el movimiento rectilíneo de la rueda tensaba considerablemente la cadena en los extremos de su recorrido limitando de esta manera el movimiento de la rueda.



Figura 1: Sistema de suspensión Plunger

Aunque se redujo notablemente la resistencia del tren trasero de las motocicletas fue un gran avance ya que se conseguía un contacto total de la rueda con el firme debido a que las irregularidades del asfalto las absorbía la suspensión trasera con la rotación del basculante.

La siguiente fábrica en conseguir mejoras fue Moto Guzzi, el cual se decantó por triangular sus basculantes al introducir la suspensión trasera en 1935 consiguiendo victorias en el TT Seniors aunque posteriormente cambiaron el diseño del basculante a uno de tubos soldados de gran diámetro dando como resultado una resistencia igual a la torsión y más rígido lateralmente.

Los basculante de doble brazo fabricados en aquella época fueron evolucionando para mejorar sus deficiencias de resistencia, esto se consiguió diseñando nuevas formas como la triangulación superior o inferior, aumentando las secciones resistentes así como mejorando los materiales utilizados.

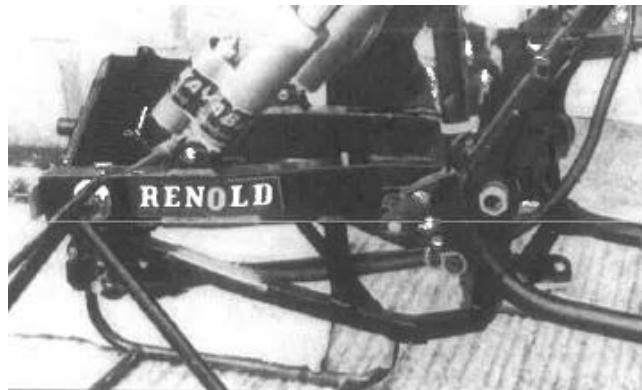


Figura 2: basculante doble brazo vigas rectas y dos amortiguadores

A medida que la resistencia aumentaba no era necesario el uso de dos amortiguadores como se venía utilizando años anteriores y fue el Doug Hele quien en 1952 diseñó una motocicleta de 250cc con un solo amortiguador disminuyendo por ende el peso del conjunto.

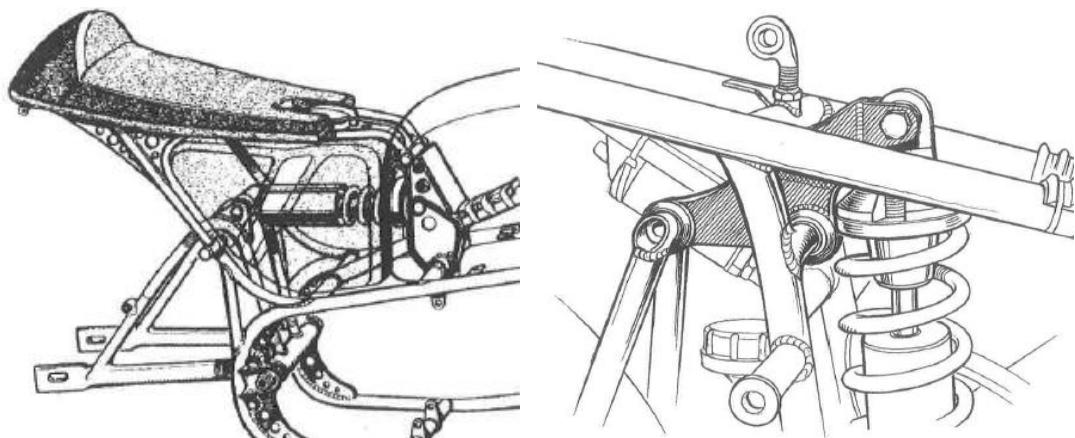


Figura 3 y 4: ejemplos motocicletas de un solo amortiguador

A raíz de esta motocicleta se fueron creando avances en los tipos de amortiguador resultando más progresividad en el sistema de suspensión trasera. El primer fabricante en incluir piezas móviles al sistema de suspensión fue Kawasaki en 1970 para sus modelos de competición: las bieletas. Este hecho marcó una tendencia que hasta hoy en día sigue funcionando y mejorándose en el mundo de la competición.

4. Tipos de basculante

Los tipos de basculante han sido muy variopintos a lo largo de la historia, cada fabricante ha seguido una línea de trabajo diferente, esto ha provocado que en la actualidad se conozcan varias formas de abordar el diseño de un elemento tan importante para una motocicleta. Para su mejor estudio se pueden dividir en dos categorías.

- **Basculantes de doble brazo:**

Es el tipo de basculante más utilizado en todas las motocicletas, incluidas las de competición.



Figura 5: basculante Aprilia RS 125

Dentro de esta categoría se pueden encontrar diferentes formas entre las cuales cabe destacar la doble viga, utilizada en la mayoría de las motocicletas de uso cotidiano.

En lo referente a las motocicletas deportivas o de competición se utilizan los basculantes triangulados; y, aún en este grupo, se encuentran los triangulados superior y los inferiores. Estos tipos de basculantes aportan una gran resistencia a la torsión y a la flexión de la pieza, pudiendo hacer una reducción de peso considerable del componente en concreto.



Figura 6: Basculante Yamaha YZF R6R

En el mundo de la competición de motocicletas deportivas se ha utilizado el basculante triangulado superior durante muchos años, aunque la tendencia ha cambiado esta última década evolucionando a basculantes triangulados inferiores. Dicho cambio es debido a la distribución de pesos ya que la triangulación inferior tiene el centro de gravedad mucho más bajo que el anterior, beneficiando así al movimiento dinámico resultante de la motocicleta.

- **Basculantes monobrazo:**

Los basculantes monobrazo son usualmente utilizados en scooter y ciclomotores por su sencillez en los componentes de la estructura. Aunque está demostrada su calidad inferior respecto a los de doble brazo se pueden utilizar también en motos deportivas y de competición gracias a una gran ventaja: su facilidad para la extracción de la llanta. Fue Andre de Cortanze quién, remarcando este dato, empezó a implementarlo para las carreras de resistencia ya que en este tipo de competiciones es ventajoso realizar los cambios de rueda en el menor tiempo posible.



Figura 8: Ejemplo basculante monobrazo

La mayoría de las motos con basculantes monobrazo utilizan una transmisión por cadena o por correa; sin embargo, la transmisión por cardán con este basculante sería lo ideal ya que el eje del cardán le da una resistencia extra al conjunto del tren trasero pudiendo así reducir el peso del basculante. Aunque sería lo óptimo para un mejor funcionamiento, no se usa en scooters y ciclomotores por enriquecer el coste del producto final alejándose de esta manera de los objetivos del comprador de este tipo de vehículos.



Figura 9: Basculante monobrazo tubular

5. Análisis de materiales

Para la construcción de los basculantes de competición los materiales más utilizados son, en primer lugar, el aluminio, seguido por el acero y los materiales compuestos. En el estudio realizado para este trabajo se ha decidido utilizar el acero y el aluminio.

- Acero:

Es el primer metal a estudiar y comprobar su viabilidad. Debido al coste reducido del propio material seguido por la gran resistencia que aporta.

Es esencial definir el mercado que existe del acero y cuál está al alcance del equipo Motostudent Unizar. Las dos objetivos clave de una pieza diseñada para la competición son: un peso reducido y un elevado índice de resistencia a las solicitudes que la pieza soportará en condiciones normales de funcionamiento.

Los aceros estudiados son aceros avanzados de alta resistencia (advanced high strength sheet steel (AHSS)) ya que estos materiales tienen una tensión de rotura superior a los 700Mpa lo que permite reducir la sección transversal de la pieza y así reducir considerablemente el peso. Otro factor a tener en cuenta de estos materiales es su ductilidad y la facilidad para la soldadura, lo cual es una ventaja para el proceso de fabricación.

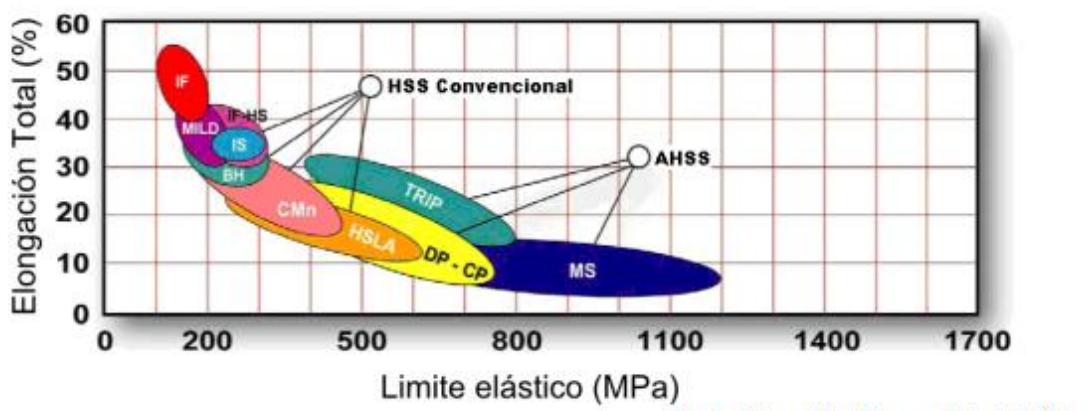


Figura 10: Diagrama de diferentes tipos de aceros

Otro acero que consideración es una aleación de Cromo (Cr) y Molibdeno (Mo), denominada 41XX (high-strength low-alloy: HSLA) y muy utilizada también en

la industria del automóvil y en elementos estructurales de diferentes medios de transporte. Gracias al ratio de resistencia-peso tan elevado es ideal para piezas en las que la resistencia elevada y el bajo peso son imprescindibles. La resistencia de este material alcanza uno límites elásticos de 500 a 600Mpa, llegando a los 760Mpa de tensión de rotura. Además, aportan una fácil soldabilidad, lo que no dificulta la técnica de trabajo y manipulación.

- Aluminio:

El aluminio es uno de los materiales más utilizados en la competición automovilística debido a su baja densidad (aproximadamente 2,7g/cm³), lo que permite reducir notablemente los pesos. Asimismo, gracias a su sencillez de mecanización, se pueden realizar formas complejas que con el acero no se podrían llegar a conseguir o el coste se elevaría bastante.

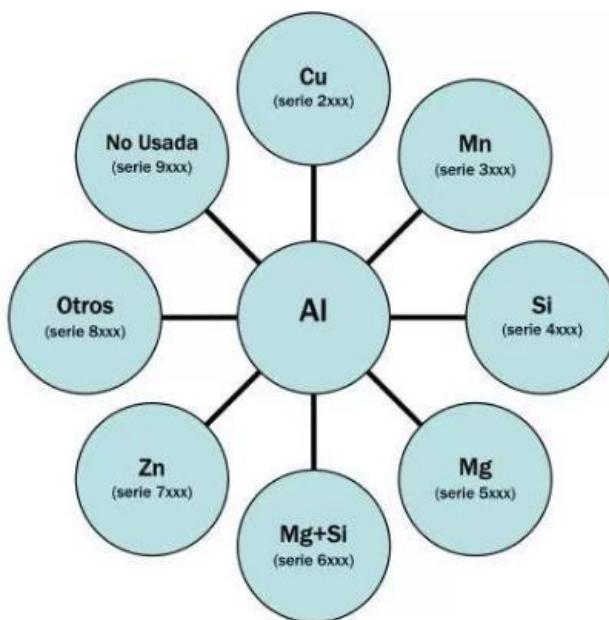


Figura 11: Clasificación de las aleaciones de aluminio

Para la solicitud que deseamos elegimos los aluminios de la denominación 6XXX y 7XXX.

La serie 6XXX de aluminio se refiere a una aleación de Magnesio (Mg) y Silicio (Si), tienen buena formabilidad, soldabilidad, maquinabilidad y resistencia a la corrosión. Aun sabiendo que su resistencia mecánica es menor que la serie 7XXX, con un tratamiento térmico adecuado se puede conseguir límites elásticos de 260Mpa y un límite de rotura de 340Mpa.

La aleación de aluminio de la serie 7XXX tiene como componente, a parte del propio aluminio, el Zinc (Zn). La principal ventaja de este material es su alta resistencia a la fatiga y como desventaja la imposibilidad existente de aplicarle técnicas de soldadura. A pesar de ello, alcanza unos valores de resistencia mucho más elevados que la serie 6XXX. Sometido a tratamiento térmico se pueden llegar a medir valores límite elásticos máximos de 435Mpa y un límite de rotura cerca de los 500Mpa.

6. Simulaciones:

Para realizar el cálculo de solicitudes mediante elementos finitos se ha utilizado el programa de diseño asistido por ordenador SolidWorks 2015.

- **Condiciones de contorno:**

Antes de proceder con el cálculo de las simulaciones se ha de estudiar las condiciones de contorno que más se aproximan a la realidad. Para este proceso se han tenido en cuenta diferentes configuraciones con anclajes empotrados y sistemas de un grado de libertad testados en diferentes elementos del basculante.

En la parte delantera del basculante van alojados los rodamientos que hacen de nexo de unión para transmitir los esfuerzos por todo el bastidor. A los laterales de estos rodamientos se encuentran unos casquillos de nylatron cuya función es reducir la fricción con el chasis. Dada la reducción de la fricción la primera condición de contorno simula una unión de tipo bisagra fija, pues los rodamientos tienen un grado de libertad que les permite girar en torno a su eje.

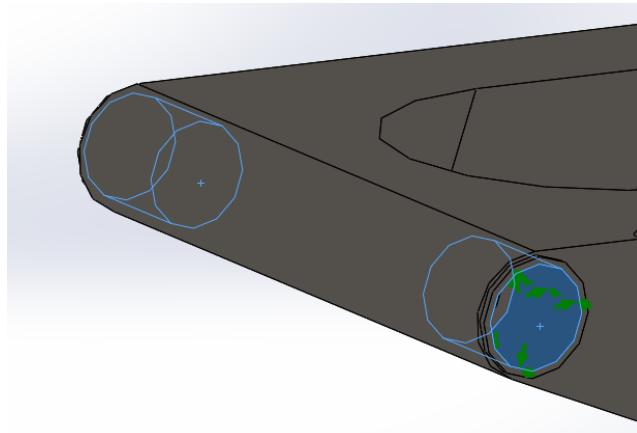


Figura 12: Condición de contorno en eje del basculante

La siguiente condición de contorno se encuentra en el sistema de suspensión, esta se encarga de limitar la traslación. En consiguiente, la condición más aproximada en nuestro diseño CAD es una limitación de desplazamiento en el eje vertical, permitiendo rotar en el eje de la amortiguación.

El eje de la suspensión es un tornillo M10 con calidad 10,9 y longitud de 42mm, que provoca que sea un elemento con mínima deformación en comparación al resto del basculante. Es por esto por lo que se trata como un sólido rígido para simplificar el estudio.

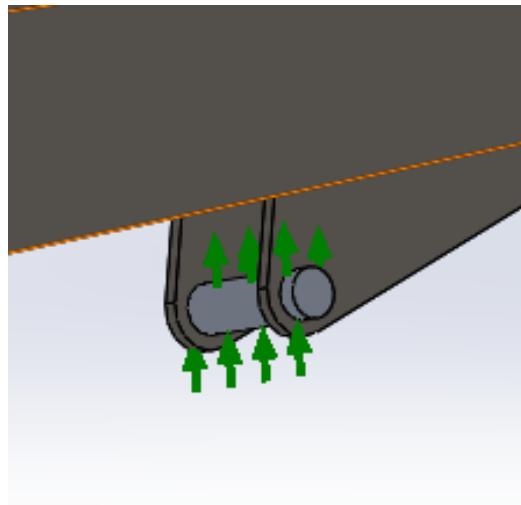


Figura 13: Condición de contorno en el sistema de suspensión

La última consideración que se ha tenido en cuenta se encuentra en el eje de la rueda trasera. El eje se convierte en un elemento de elevada resistencia gracias a los casquillos separadores, a la llanta y al par de apriete que se le aplique al eje trasero. En caso de no poseer tal resistencia, la rueda y la dinámica de la moto no se comportarían como se espera teniendo que sobredimensionar el eje. Debido a esto el eje de la rueda trasera se emplea como si fuese un sólido indeformable.

- **Tipos de cargas:**

Las cargas aplicadas a los diseños vienen introducidas en la parte posterior del basculante, debido a que es ahí donde se producen las fuerzas provocadas por la rueda en contacto con el pavimento.

Para conseguir el mejor rendimiento de un basculante se debe someter a diferentes tipos de cargas, estas diferencias vienen concebidas por los distintos estados en los que se encuentra una motocicleta en un circuito. Los estados que analizamos son: aceleración máxima, paso por curva con inclinación máxima y velocidad constante y, por último, salida de curva. Estas situaciones han sido elegidas para su estudio ya que son las más extremas en cuanto a esfuerzos sufridos.

La aceleración máxima de una motocicleta se crea con el vehículo completamente parado y acelerando hasta su velocidad máxima en el menor tiempo posible. Ello provoca diferentes tipos de fuerzas sobre la rueda trasera: la primera es la distribución de pesos dado que el cien por cien del peso tanto de la motocicleta como del piloto se sitúan en el tren trasero; y, la otra gran

fuerza que aparece en este estudio es el tiro de la cadena pues el motor entrega su par máximo en esta situación y por consecuencia se debe tener muy presente el alto valor de esta fuerza que llevará a la flexión del basculante a la vez que a la contracción.

En segundo lugar, el ensayo de paso por curva a velocidad constante y con ángulo de inclinación máxima debe ser estudiado por las fuerzas de torsión que se generan en ese punto. En este estudio las fuerzas creadas por la cadena como la de tracción son nulas; en cambio, se generan una fuerza lateral a lo largo del eje de la rueda trasera y otra generada por el descentramiento de la huella. Dicha huella crea un momento flector sobre el eje que se traduce en uno torsor sobre el basculante. Por simplificación de fuerzas y momentos, este instante creado por la rueda se traduce en dos fuerzas una en cada extremo del trasero del basculante.

Por último, se estudia la simulación de esfuerzos creados en la salida de la curva. Se caracteriza por ser un punto crítico ya que la motocicleta se encuentra con cierta inclinación a la vez que se actúa sobre el acelerador. De esta manera, se unen los dos casos anteriores por el conjunto de fuerzas creadas por la cadena y por el descentramiento de la rueda sumándole el rozamiento lateral que sufre.

Las fuerzas con las que se ha trabajado en las simulaciones vienen dadas por el equipo de dinámica dentro del equipo Motostudent Unizar. Por consiguiente, las fuerzas para este estudio son:

- Aceleración máxima:

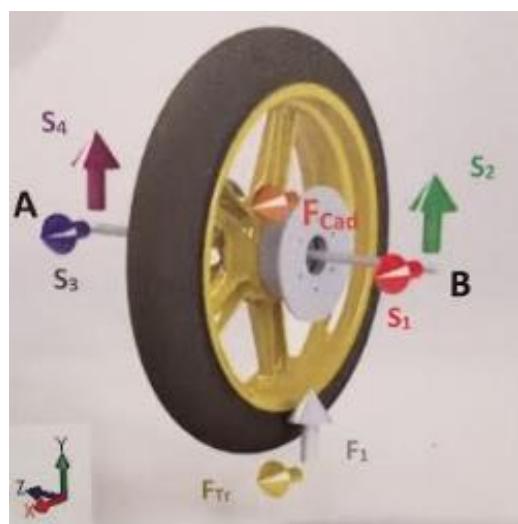


Figura 14: Fuerzas creadas en la condición de aceleración máxima

$$\text{Fuerza de tracción} = F_{\text{Tr}} = 1412,29 \text{N}$$

$$\text{Peso} = F_1 = 1666 \text{N}$$

Fuerza del tiro de cadena = $F_{cad} = 4686\text{N}$

Reacción horizontal en el lado izquierdo = $S_1 = 4863,3\text{N}$

Reacción vertical en el lado izquierdo = $S_2 = 1051\text{N}$

Reacción horizontal en el lado derecho = $S_3 = 1230\text{N}$

Reacción vertical en el lado derecho = $S_4 = 860,4\text{N}$

Coeficiente de seguridad = $C_s = 1,5$

Las fuerzas que se introducen en las simulaciones de elementos finitos serán las siguientes:

$S_1 = 7295\text{N}$

$S_2 = 1576,5\text{N}$

$S_3 = 1845\text{N}$

$S_4 = 1290,5\text{N}$

➤ Paso por curva:

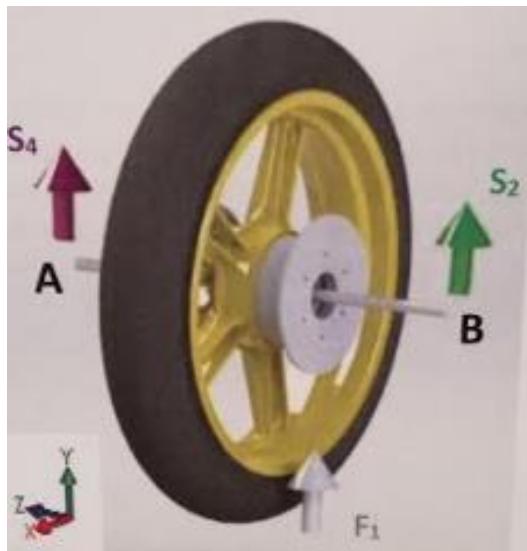


Figura 15: Fuerzas creadas en la condición de paso por curva

$S_2 = 1389,9\text{N}$

$S_4 = 632,8\text{N}$

$F_i = 1000\text{N}$

Debido a la inclinación que tiene la motocicleta durante el paso por curva se crea una fuerza lateral en el basculante.

➤ Salida de curva:

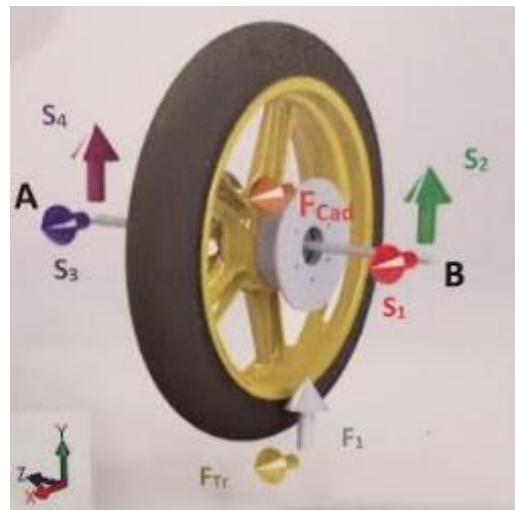


Figura 16: Fuerzas creadas en la condición de salida de curva

$$S_1 = 5238\text{N}$$

$$S_2 = 2250\text{N}$$

$$S_3 = 1005,15\text{N}$$

$$S_4 = 1078,35\text{N}$$

$$F_L = 1000\text{N}$$

7. Diseños de basculantes

Para empezar con los diseños de basculantes y poder seguir una línea de trabajo se debe comenzar por definir unas características previas.

- **Dimensiones:**

Las dimensiones básicas para el diseño del basculante serán: la distancia entre el eje que une el chasis con el basculante y el eje de la rueda trasera, la distancia en el eje horizontal y vertical del eje del basculante al eje de la suspensión. Estas distancias irán determinadas por el grupo de diseño de geometrías del equipo, quien previamente ha realizado un estudio de comportamiento de la motocicleta para poder elegir la longitud óptima.

Mientras que la anchura del basculante viene determinada por dos condicionantes. El primero es la distancia entre el plano de simetría de la moto y el plano paralelo a la cadena el cual limitará la anchura de la parte trasera; la anchura delantera viene determinada por la anchura del motor y un acuerdo mutuo entre el diseño del chasis y del basculante

- **Rigidez:**

Este factor es crucial ya que al tratarse de una pieza estructural debe cumplir un mínimo de resistencia y así poder soportar las fuerzas que habrán sido calculadas por el departamento de cálculo de esfuerzos de Motostudent Unizar.

En cuanto a las tensiones, el máximo admitido será el límite elástico del material con el que se trabaje menos el coeficiente de seguridad correspondiente, mientras que para las deformaciones el máximo desplazamiento que podrá tener la pieza será de 3mm, impuesto por los calculadores de estructuras del equipo.

- **Peso:**

El peso es un detalle crucial en una pieza diseñada para competición, y en casi cualquier ámbito de la ingeniería ya que existe una relación directamente proporcional en cuanto a peso, material a utilizar y fuerzas necesarias para mover el mecanismo.

El peso máximo admitido de la pieza en particular para tener el mínimo peso del conjunto será de 3Kg con una tolerancia de 200gr.

Diseños preliminares

La condición clave para tratar un diseño de basculante como válido o no válido será la comparación con el basculante utilizado por el equipo Unizar en la edición anterior de la competición Motostudent 2016. El peso y las tensiones generadas en el basculante serán los puntos a tener en cuenta. No será aceptado ningún diseño de basculante que supere el peso establecido sin una considerada reducción de desplazamientos en el eje de la rueda.

- Chapa de Acero:

Para comenzar el diseño del basculante se determinaron las necesidades básicas, el material elegido fue el Docol 1000DP proporcionado por un proveedor sueco (SSAB), este material aporta una resistencia extra pudiendo reducir considerablemente el espesor. El rango de espesores que suministra SSAB de este material es de 0,7mm a 2mm.

El primer paso fue un basculante hueco con paredes de chapa de acero de espesor 0,7mm ya que era el mínimo posible suministrado. Era de tipo triangular superior pues el diagrama de esfuerzo de la pieza tiene el momento flector hacia arriba.

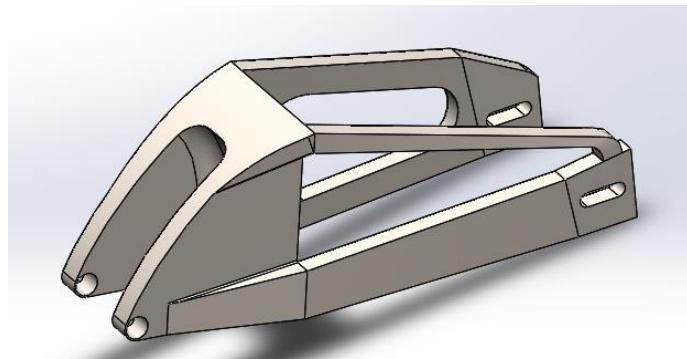


Figura 17: Primer basculante diseñado

Se observó que este basculante era muy débil debido a sus perfiles estrechos y cambios de sección muy grandes, además de cantos muy pronunciados, lo que creaba demasiados concentradores de esfuerzos y muchas zonas de rotura.

A mediados de la competición anunciaron el motor que todos los equipos debían montar, este motor no tiene un alojamiento para el eje del basculante como la mayoría de los motores para competición, por lo que se tuvieron que

unir los brazos delanteros del basculante por un eje. Este dato presentó una dificultad extra para ajustarse al peso requerido, 95Kg en orden de marcha.

Para el siguiente diseño se optó por un basculante triangular inferior ya que con esto se conseguía bajar el centro de gravedad de la pieza, algo beneficioso para el comportamiento dinámico del conjunto del vehículo.

Tras varios diseños previos de este tipo de basculante se decidió curvar las dos chapas formantes de los brazos que sujetan la rueda; esto aumentaba considerablemente la resistencia del basculante. Aun así se seguía obteniendo problemas con cambios de sección bruscos provocando la rotura de la pieza por esas partes, concretamente en los brazos delanteros, encargados de la unión al chasis.

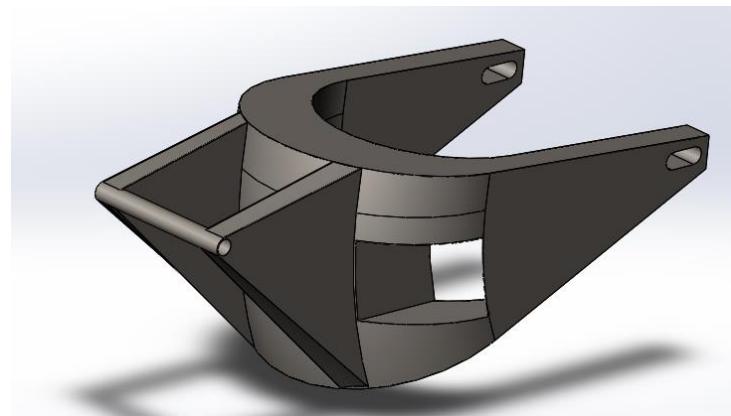


Figura 18: Basculante con chapas traseras formando 180º

El peso se aumentó notablemente por la necesidad del alargamiento de la altura de la pieza para obtener así los valores máximos de tensiones y desplazamientos

Para solucionar el problema de los brazos delanteros se optó por doblar las chapas laterales en forma de S. Se consiguió una estructura fuerte a lo largo de toda la pieza en los extremos y la chapa curvada 180º del interior daba un aporte de rigidez sobre todo frente a la torsión. A continuación de lo anterior, se curvó creando un semicírculo en el hueco donde se aloja el amortiguador y el sistema que lo acompaña.

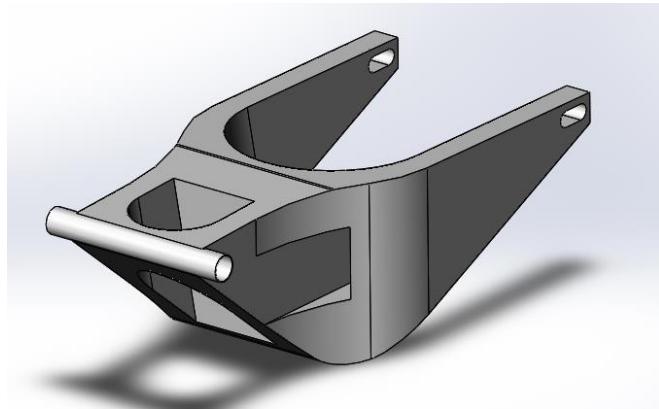


Figura 19: basculante triangular inferior

El basculante se asemeja a una viga biapoyada donde el momento creado en el diagrama de esfuerzos contrae la parte superior mientras que en la parte inferior se observa un esfuerzo a tracción.

El problema del basculante con triangulación inferior se encontraba en los desplazamientos creados en la parte posterior. El diseño se contrapone al diagrama de esfuerzos y se debía aumentar notablemente el área transversal de la pieza para conseguir los requisitos marcados.

Se continuó con un diseño de basculante con triangulación superior pero siguiendo con las chapas dobladas porque los ensayos eran óptimos.

Fue a estas alturas de diseño cuando se produjo un punto de inflexión muy positivo: se observó que se podía reducir la altura del basculante, reduciendo el peso final de la pieza.

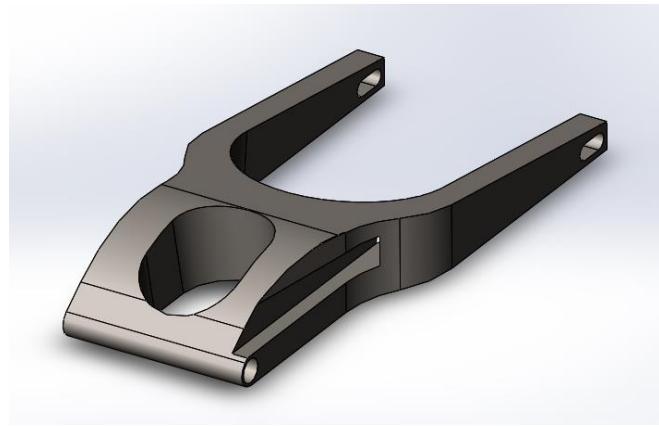


Figura 20: Basculante triangular superior

El último aporte que se realizó a este diseño fue la curvatura de la chapa inferior para conseguir el toque final de resistencia necesario.

- **Tubular:**

El siguiente tipo de basculante a estudiar se trata de un basculante con triangulación superior creado con un entramado de tubos, también llamada multitubular. La importancia de este basculante reside en la gran resistencia que aportan los tubos.

Se partió del basculante creado en la tercera edición del equipo de la Universidad de Zaragoza y se fue adaptando a las nuevas geometrías del prototipo.

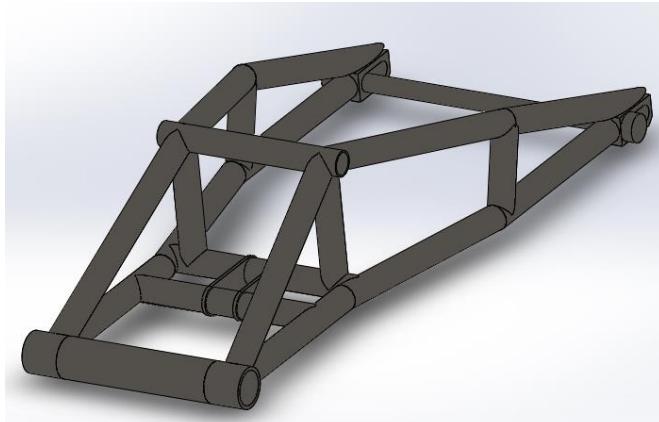


Figura 21: Basculante tubular primer diseño

Una vez modificado se realizó un estudio del basculante a esfuerzos, viendo que era muy rígido a flexión mientras que a torsión era algo más débil.

Se estrechó la barra superior perdiendo un poco de flexión y mejorando la torsión. Se observó como algunas barras trabajan más que otras y el problema fue solucionado inclinándolas levemente consiguiendo que se repartieran mejor los esfuerzos por todas ellas.

- **Chapa de Aluminio:**

El diseño del tercer basculante consta de una mejora en chapa de acero, intercambiando la chapa de acero por una de aluminio. El aluminio tiene una tercera parte de densidad y menos de la mitad de límite elástico, dato beneficioso y digno de ser estudiado como mejora futura.

Este diseño lo que pretende es mejorar el peso del basculante en chapa de acero de alta resistencia con posteriores modificaciones en algunos puntos más críticos de diseño.

Diseños definitivos

- Chapa de Acero:

Como se ha mencionado en el diseño previo del basculante de chapa de acero se ha procedido a curvar la chapa inferior para crear una resistencia a flexión que permite reducir el espesor de la chapa así como de la altura del basculante y su área resistente.

Se eligió el espesor a utilizar para el diseño de 1,2mm por dos razones. La primera es la fabricación, ya que es una pieza artesanal y se necesita de un soldador experto además de una máquina de soldadura avanzada. Si el espesor fuese menor se crearían agujeros en la chapa así como dobleces por el calor aportado. La segunda razón, los diseños pues si se utilizaba un espesor de 1mm las condiciones no mejoraron apenas y habría que aumentar la altura del basculante llegando al mismo peso que con la chapa de 1,2mm.

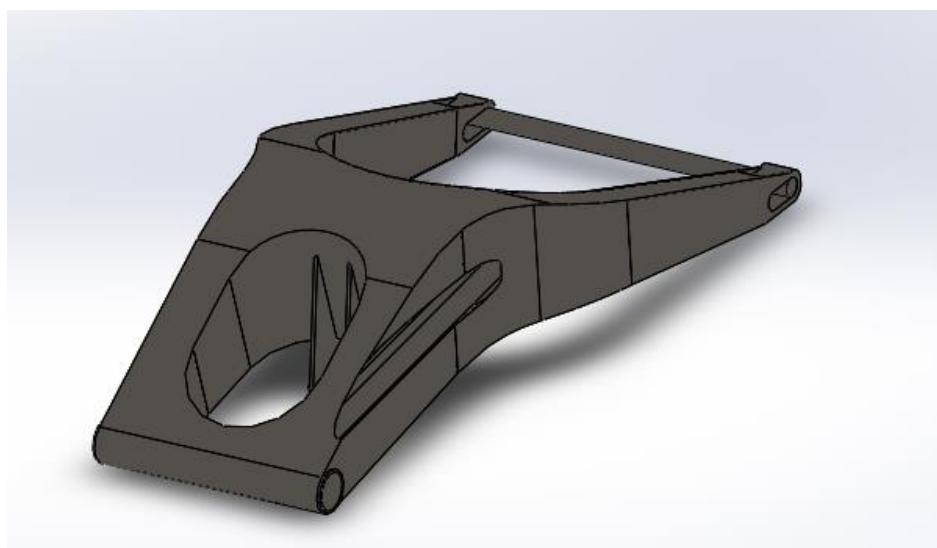


Figura 22: Basculante triangular superior chapa de acero

Aun con todo esto los soportes de las bieletas se realizan pasantes desde el agujero donde se aloja el amortiguador y la chapa posterior dando un extra de rigidez al unir estas dos chapas curvadas.

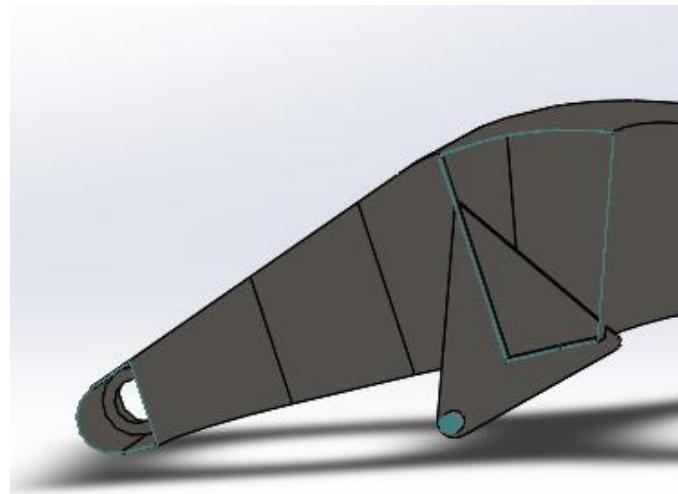


Figura 23: Detalle pletina anclaje suspensión

El hueco para el paso de la cadena a través del basculante ha sido un problema a lo largo de todo el estudio debido a que no se podía conseguir una simetría; además las fuerzas provocadas por la cadena estaban desplazadas del plano medio provocando que en las simulaciones el brazo por donde pasa la cadena tuviera demasiada deformación. Se redujo hueco para el paso de la cadena hasta conseguir que ésta pudiese patinar por la parte inferior de la cavidad. Para ello, el conducto hubo de ser forrado con Nylatron, un material plástico autolubricante con el rozamiento, de esta forma se redujo el desgaste de la chapa y de la cadena con el constante roce entre ambas.

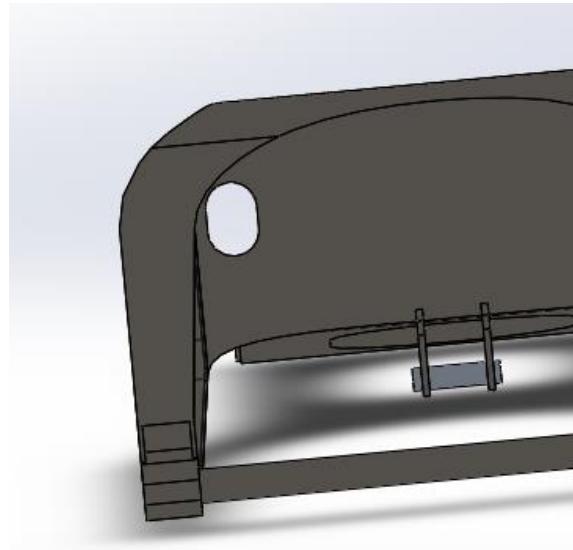


Figura 24: Vista trasera y detalle del paso de la cadena

Otro problema que se afrontó en el diseño achacable a la cadena fue la posición que presentaba en el plano longitudinal. Debido al motor que la organización Motostudent obliga a montar en la motocicleta la cadena quedaba muy alejada de la rueda y del plano medio del basculante obligando así a ensanchar considerablemente los brazos traseros. Esto provocó que los esfuerzos torsionales fueran mayores, de ahí que la unión intermedia debía ser tan resistente para soportar esfuerzos grandes a torsión.

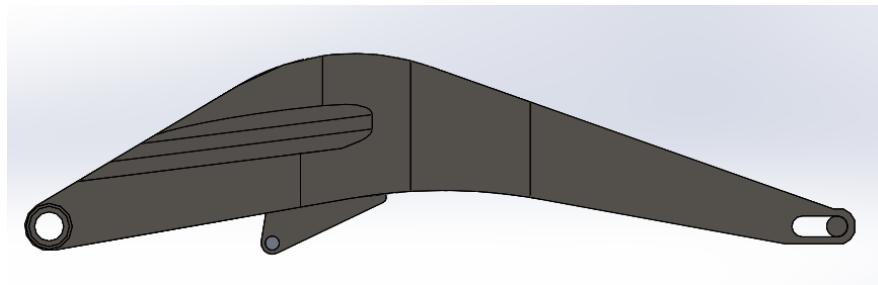


Figura 25: Vista lateral basculante chapa de acero

Los soportes de sistema de suspensión trasera se realizaron con chapa del mismo material que el resto del basculante pero con un espesor mayor ya que los esfuerzos provocados por la suspensión son muy elevados sobre un eje de diámetro muy reducido.

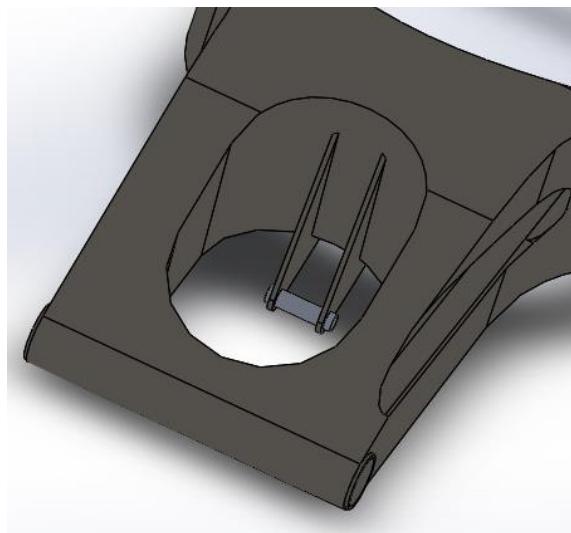


Figura 26: Detalle alojamiento suspensión

Las piezas que aloja el eje de la rueda son macizas, el material es acero con denominación ST-52, y las piezas se fabrican mediante mecanizado CNC. Para implementar esta pieza en el diseño de chapa se deben crear unos nervios que serán los encargados de ir reduciendo la sección y no provocar concentradores de esfuerzo.

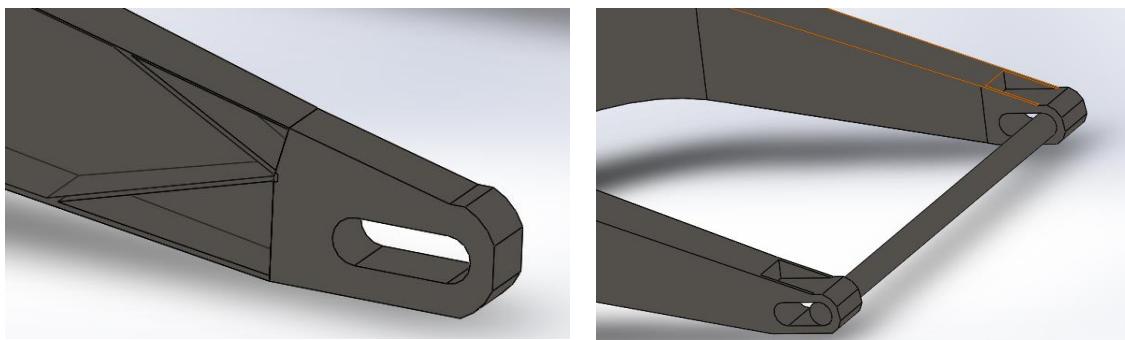


Figura 26 y 27: Detalle anclaje eje rueda trasera

El eje del basculante es el encargado de transmitir las fuerzas del basculante al chasis por los rodamientos. Debido a que la sección de los alojamientos es de un espesor mayor que la chapa y la unión solo se realiza por los laterales del basculante, se decidió crear un nervio que transmitiera los esfuerzos de estos alojamientos al resto del basculante. Para ello, llevamos el nervio hacia las paredes exteriores, como se ve en la imagen, a causa de que se comprobó que estas paredes eran las menos solicitadas alrededor de este casquillo.

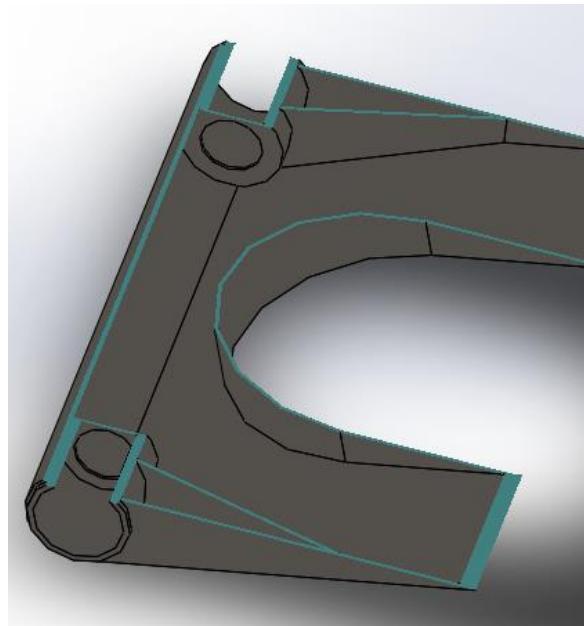


Figura 28: Corte con detalle de nervios delanteros

- **Tubular:**

El diseño final del basculante tubular tiene una consideración la cual hace que se convierta en una pieza con una rigidez elevada, los tubos que ascienden verticalmente (1 y 2) tienen una pequeña inclinación pudiendo así acortar el

tubo superior (3) y conseguir aumentar la resistencia a torsión. Para no perder la resistencia a flexión se aumenta el diámetro de los tubos longitudinales (4 y 5).

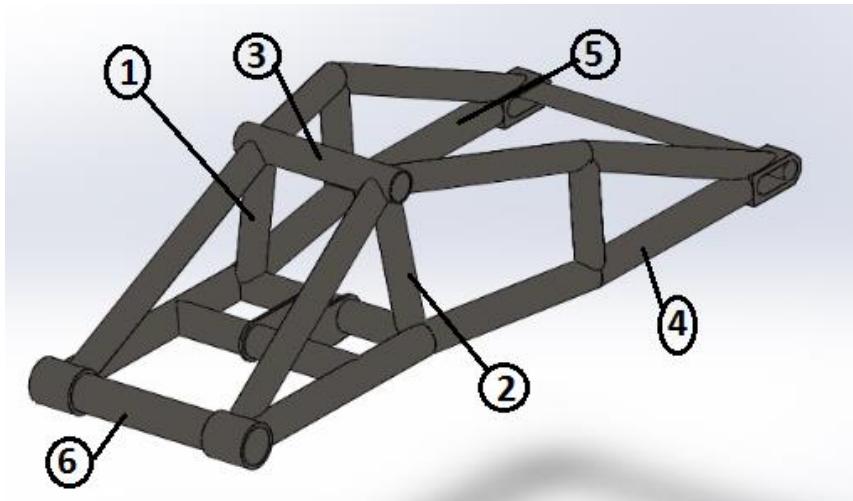


Figura 29: Basculante tubular definitivo

La parte delantera del basculante, la que contiene el eje del basculante, se ha diseñado con dos diámetros diferentes. Esto es debido a que los mayores esfuerzos los transmiten los rodamientos el tubo (6) que se alojan entre los rodamientos pueden ser de menor diámetro y espesor menor a los casquillos que alojan los rodamientos.

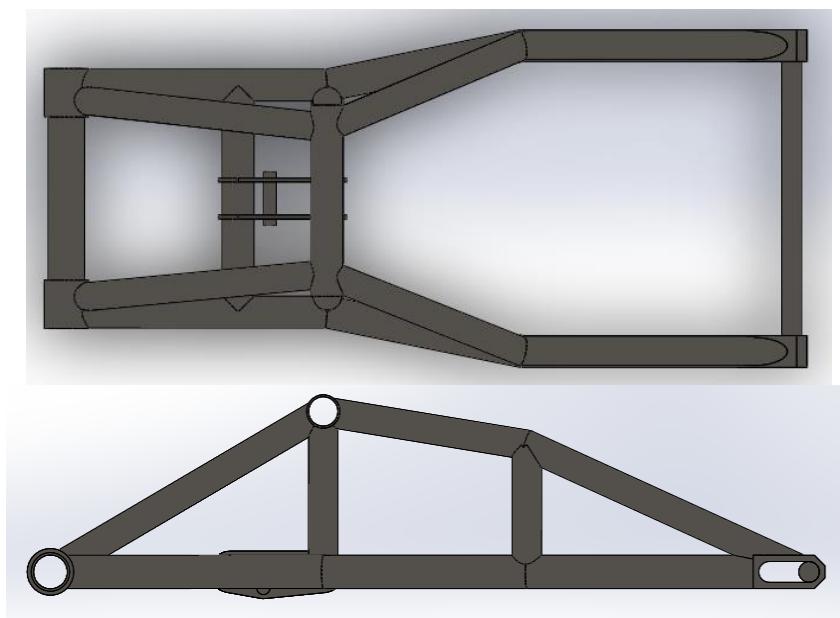


Figura 29 y 30: Vista superior y vista lateral, basculante tubular

La anchura del basculante tubular así como la de los otros dos diseños viene determinada por la cadena. La inclinación de los tubos 1 y 2 favorecen el paso de la cadena ya que si estos tubos fuesen verticales se debería ensanchar unos milímetros más produciendo más fuerzas de torsión y, en consecuencia, la necesidad de un basculante más rígido.

Para posibles rozamientos de la cadena con los tubos del basculante debido a las oscilaciones durante los momentos de aceleración y reducción se ha diseñado una pieza de Nylatron que refuerce los puntos más conflictivos.

- **Chapa de Aluminio:**

La finalidad de este basculante era mejorar las propiedades del basculante en chapa de acero. Se intentó aventajar con un aluminio de alta resistencia como son las series 6XXX y 7XXX que se han mencionado en el apartado 5 de este proyecto.

Como se podrá observar en los resultados se ha mejorado considerablemente el peso como la rigidez de este basculante.

El mayor hándicap de este tipo de basculante reside en el propio material y el método de fabricación, que trata de chapas de aluminio curvadas y soldadas unas a otras, con unas tolerancias cercanas al milímetro. Todo esto pone en riesgo la posible fabricación por falta de tecnología al alcance del equipo para soldar con tanta precisión, además de la necesidad de un tratamiento posterior a la soldadura para aliviar las posibles tensiones residuales creadas por la técnica de unión y que supondría la rotura prematura del prototipo.

8. Comparación de diseños definitivos

Una vez simulados todos los diseños en las diferentes condiciones de trabajo se han obtenido los siguientes resultados.

		Peso (kg)	Desplazamiento maximo (mm)	σ Von Mises (Mpa)	Cs (límite elástico)
Tubular de partida	Aceleración	2.81	2.475	669.811	1.06
	Curva (Vcte)	2.81	2.618	356.784	1.99
	Salida curva	2.81	3.285	617.391	1.15
Tubular	Aceleración	3.14	2.633	540.356	1.4805
	Curva (Vcte)	3.14	2.55	452.578	1.7677
	Salida curva	3.14	3.139	643.56	1.2431
Chapa de Acero (e=1,2mm)	Aceleración	3.202	2.412	665.6	1.2019
	Curva (Vcte)	3.202	3.057	441.92	1.8103
	Salida curva	3.202	3.305	739.1	1.0824
chapa de aluminio (e=3mm)	Aceleración	2.452	2.022	339.8	1.6775
	Curva (Vcte)	2.452	2.624	227.714	2.5031
	Salida curva	2.452	2.779	387	1.4729

Figura 31: Análisis de ensayo de los basculantes

Como se puede observar en la primera columna del peso, el más ligero es el basculante de aluminio debido a su baja densidad; el siguiente es el tubular, que se ha tomado como referencia. Esto es debido a que este basculante no tenía un tubo extra en la parte delantera uniendo los dos casquillos donde van alojados los rodamientos.

Entre el basculante tubular y el de chapa de acero hay una pequeña diferencia de 60gr, no se tendrá en cuenta para definir el basculante definitivo pues es una diferencia insignificante y nada determinante..

La segunda columna trata los desplazamientos máximo obtenidos, siendo siempre en la parte trasera del basculante por las condiciones propuestas en las simulaciones.

Se puede observar un tendencia para los basculantes de chapa y otra para los basculantes tubulares, los primeros resisten menos los esfuerzos de torsión y los esfuerzos de flexión transversal debido a la fuerza lateral; los segundos

aguantan mejor los esfuerzos anteriores pero tienen una deficiencia en el ensayo de aceleración.

La tercera y la última columna están íntimamente ligadas ya que la primera de ellas es la tensión de Von Mises máxima en la pieza y la segunda el coeficiente de seguridad elástico.

Si se compara los resultados con el basculante tubular de la edición anterior se ha mejorado mucho la transmisión de esfuerzos a lo largo de los basculante haciendo que no se creen picos de tensión.

Finalmente el basculante elegido para la fabricación del prototipo fue el tubular. La razón principal de dicha elección fue el coste económico de la fabricación, para los basculantes de chapa se debía hacer diferentes bancadas para la adaptación de cada chapa con la contigua, elevando considerablemente el coste. En contraposición, el basculante de aluminio tiene un coste añadido ya que se debe hacer un tratamiento térmico de recocido tras la soldadura para así aliviar las tensiones residuales que a largo plazo crearán gritas y la rotura final.

Otra razón a tener en cuenta fue la falta de maquinaria y medios productivos al alcance de equipo, dificultando mucho la fabricación de los basculantes en chapa.

La última razón para el descarte de los basculante en chapa es el tiempo. se tiene un plazo máximo de dos años para la fabricación completa de la motocicleta, siendo el primer año y parte de segundo enfocados al diseño, la mitad del segundo año debe dividirse en dos, una para la fabricación del prototipo y otra para pruebas en pista una vez fabricado el 100% de la motocicleta.

Un tiempo tan reducido crea una necesidad de diseño y fabricación de piezas que se enfoca en piezas simples y efectivas.



Figura 32, 33 y 34: ensamblaje global de la moto, ensamblaje tren trasero y ensamblaje basculante con elementos de la rueda trasera

9. Conclusiones

La conclusión de este proyecto se encuentra introducida en una motocicleta 100% operativa y funcional, la cual fue presentada en la competición Motostudent el día 9 de octubre de 2016 en el circuito internacional de Motorland Aragón.

Dos años han sido los comprendidos desde el primer contacto con el equipo hasta el día de la competición, toda una aventura educativa y laboral.

El alcance de este proyecto ha sido mucho mayor del que pueda plasmarse en un proyecto. El diseño de esta pieza estructural de una motocicleta me ha permitido poner en práctica todos los conocimientos adquiridos en a lo largo de la carrera universitaria, como el cálculo de sólidos deformables, hasta el cálculo de elementos de máquinas como los rodamientos entre otros elementos no mencionados en esta memoria.

También se han necesitado los conocimientos de otras materias como las asignaturas de administración de empresa impartidas a lo largo de la carrera, pues desde el primer dia se inició una búsqueda de capital y administración del mismo.

Todo esto ha implementado una visión más general en mí del mundo real en el sector ingenieril, aprendiendo a trabajar con un equipo de personas para conseguir un bien común, a tratar profesionalmente con empresas y a no darnos por vencidos hasta conseguir nuestras metas.



Figura 35: Equipo Motostudent Unizar el día de la competición (9/11/2016)

Bibliografía

- Foale, Tony (2006). Motocicletas, Comportamiento dinámico y diseño de chasis, Madrid: Tony Foale Designs. (Traducido por: David Sánchez)
- Equipo Motostudent Unizar (2016). Proyecto Motostudent Unizar. Zaragoza: Universidad de Zaragoza, Escuela de Ingeniería y Arquitectura
- Soler Costa, Juan Ramón (2014), Diseño de un basculante para una motocicleta de competición. Proyecto fin de carrera, ingeniería industrial, Universidad de Zaragoza
- Ruiz Fernández, Hugo (2016), Diseño del basculante de una motocicleta de competición de 250cc. Proyecto fin de grado, Grado en ingeniería mecánica, Universidad de Cantabria.
- Arias-Paz Guitian, Manuel (33^a edición). Motocicletas. S.L. CIE INVERSIONES EDITORIALES DOSSAT-2000
- Bradley, John (1996). The racing motorcycle: a technical guide for constructors
- Cossalter, Vittore (2^a edición). Motorcycle dynamics.
- Jareño Núñez, Alberto (2013). Diseño del basculante de una motocicleta de competición y análisis de fatiga. Proyecto final de carrera, Ingeniería técnica industrial mecánica, Universidad Carlos III de Madrid.
- Solé Vilató, Gemma (2014). Diseño del basculante y proceso de fabricación del mismo y del carenado para una motocicleta de competición. Proyecto final de carrera, Ingeniería industrial, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Arcelormittal.
<http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/AHSS/DP/ES>
- SSAB. <http://www.ssab.es/products/brands/docol>
- Tornillera Aragonesa. <http://www.tornillera.com/>
- Sanmetal S.A. <http://www.sanmetal.es/>