



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

Especialidad Mecánica

DISEÑO DEL CHASIS DE UNA MOTOCICLETA DE COMPETICIÓN

Autor: Estefanía Reinares Gozalo

Director: Alberto Carnicero López

Madrid

Julio 2018

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D^a. Estefanía Reinares Gozalo

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: Diseño del chasis de una motocicleta de competición, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

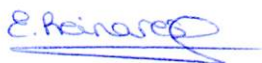
6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 17 de julio de 2018

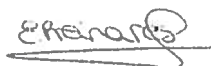
ACEPTA



Fdo. Estefanía Reinares Gozalo

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Diseño del chasis de una motocicleta de competición
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2017-2018 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Estefanía Reinares Gozalo

Fecha: 17/ 07/ 18

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Alberto Carnicero López

Fecha: 17/ 07/ 18



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

Especialidad Mecánica

DISEÑO DEL CHASIS DE UNA MOTOCICLETA DE COMPETICIÓN

Autor: Estefanía Reinares Gozalo

Director: Alberto Carnicero López

Madrid

Julio 2018

DISEÑO DEL CHASIS DE UNA MOTOCICLETA DE COMPETICIÓN

Autor: Reinares Gozalo, Estefanía

Directores: Carnicero López, Alberto

Entidad Colaboradora: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

Introducción

El mundo de la motocicleta es un mundo muy competitivo, ya que, debido al carácter de sus aficionados y de sus profesionales, evoluciona de forma rápida.

El desarrollo de nuevos modelos en cuanto al diseño de piezas estructurales de la motocicleta, está a la orden del día. Así mismo, la aplicación de estos nuevos diseños se adapta inmediatamente a modelos anteriores. Para ello, no solo habrá de sobrepasar características técnicas de lo anteriormente establecido como óptimo, sino también ganar la batalla en el ámbito estético.

MotoStudent

MotoStudent es una competición internacional en la cual equipos de estudiantes de diferentes universidades de todo el mundo, se enfrentan al diseño y desarrollo de un prototipo de motocicleta de 250cc.

Es un desafío académico que abarca diferentes disciplinas, en las cuales los estudiantes de ingeniería pueden desarrollar un proyecto industrial real en el ámbito del deporte del motor de competición.

Como ya se ha mencionado, en esta competición los equipos se enfrentarán al diseño y desarrollo de un proyecto de motocicleta de competición (motocicleta con motor de combustión interna o motocicleta eléctrica). Para ello, los estudiantes han de aplicar directamente lo aprendido en aulas y laboratorios durante su estancia en la universidad y demostrar sus capacidades de innovación como futuros ingenieros especializados.

Dentro de este ámbito es donde se desarrolla este trabajo, concretamente en la categoría MotoStudent Petrol (es decir, una motocicleta con un motor de combustión interna). Más específicamente, este TFG trata sobre el diseño y análisis de una de las piezas estructurales más importantes de una motocicleta: el chasis.

Diseño

En este proyecto se diseñan tres tipos de chasis diferentes con el objetivo de establecer cuál de ellos es el más competitivo a la hora de participar en la competición de MotoStudent.

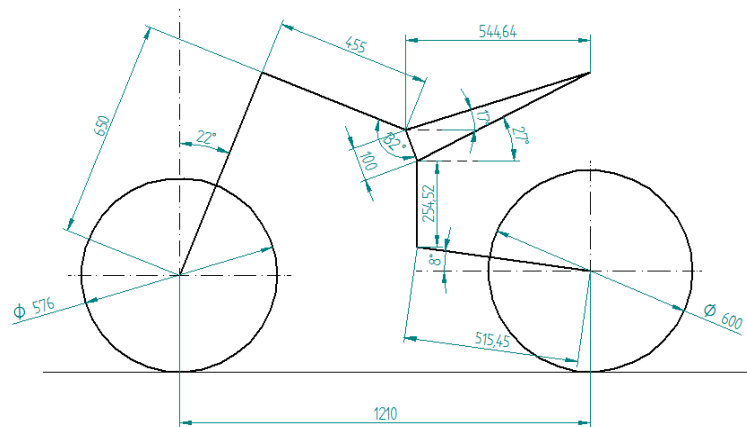
El diseño de los tres tipos de chasis cumplirá con el reglamento de MotoStudent, siguiendo así los requisitos generales de diseño establecidos en éste, así como teniendo en cuenta las restricciones impuestas por la normativa.

Se ha decidido realizar un chasis cuya parte delantera sea recta, otro cuya parte delantera sea curva y otro cuya parte delantera sea modular, es decir, un chasis que permita variar su anchura total.

Este último nace de la necesidad de fabricar dos tipos de chasis diferentes para la competición de MotoStudent: un chasis para la categoría Petrol (con motor de combustión interna), y otro chasis para la categoría Electric (con motor eléctrico). La diferencia de anchura total entre estas dos motocicletas viene dada por la diferencia entre el motor de combustión interna y el motor eléctrico (los cuales tienen diferentes dimensiones), además de las baterías necesarias para la motocicleta eléctrica. Con el chasis modular se conseguiría una solución óptima para este problema, ya que no sería necesaria la fabricación de dos chasis con geometrías diferentes, si no que sólo sería necesaria la fabricación de una geometría, pero variando los ángulos entre las piezas modulares que forman su parte delantera a la hora de su montaje. De este modo, se conseguirían abaratar costes de fabricación. Así mismo, teniendo una visión más global, si se tratara de un fabricante de motocicletas con dos líneas de fabricación en paralelo de motocicletas eléctricas y motocicletas con motor de combustión interna, el uso de este tipo de chasis (en caso de ser válido), supondría un ahorro considerable, debido a lo descrito con anterioridad.

El material elegido para la fabricación del chasis es el Aluminio 6082 T6, ya que sus propiedades son aptas para la fabricación de un chasis de motocicleta, pues podría soportar los esfuerzos a los que será sometido sin fallo alguno y se abarataría el coste de materia prima del material.

A continuación se muestra el croquis de la geometría global de la motocicleta sobre la cual se ha decidido trabajar:



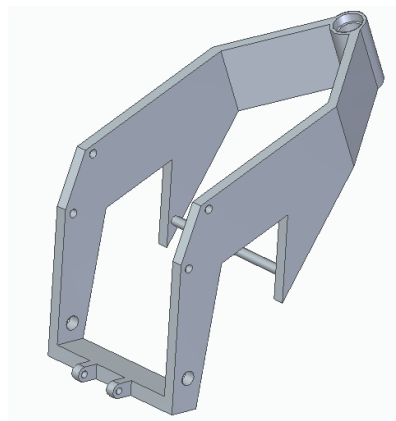
En la figura anterior pueden apreciarse los valores que se han decidido utilizar en cuanto a la geometría básica: distancia entre ejes de 1210 mm y ángulo de lanzamiento de 22° .

Por lo que corresponde a otras dimensiones, las ruedas delantera y trasera serán proporcionadas por la competición de MotoStudent, por lo que sus dimensiones no podrán variar de ninguna forma; mientras que la medida de la horquilla delantera ha sido tomada de una motocicleta de competición de la categoría de Pre-Moto3.

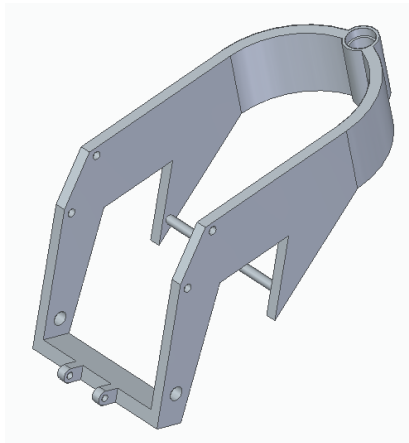
El resto de parámetros han sido elegidos según criterio propio y teniendo en cuenta las restricciones y los requisitos de la competición.

Se partirá de los siguientes diseños iniciales:

Chasis cuya parte delantera es recta

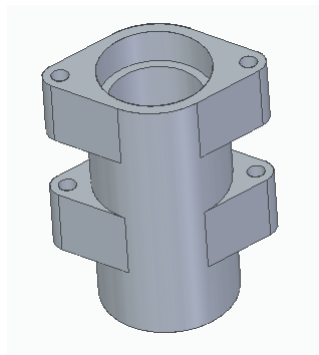


Chasis cuya parte delantera es curva

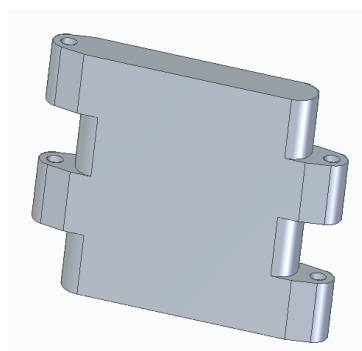


Chasis cuya parte delantera es modular

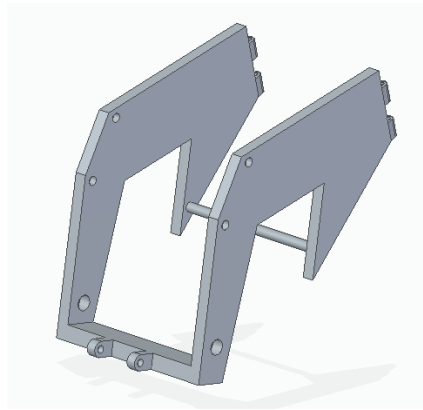
Pipa:



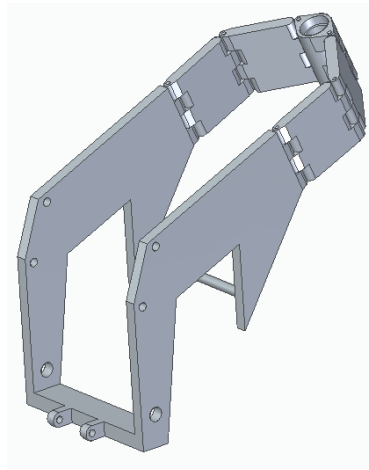
Pieza delantera:



Pieza lateral:



Conjunto:



Simulación

Se realizarán cinco ensayos diferentes:

- uno realizado con los esfuerzos obtenidos en el cálculo matricial, debidos a las fuerzas que se aplicarán sobre la motocicleta en el banco de ensayo de parte ciclo durante la competición;
- otro realizado según una prueba estática;
- y los otros tres ensayos consisten solamente en verificar que el chasis resiste a las cargas máximas a las que la motocicleta podrá ser sometida según los datos obtenidos por Giuseppe Polucci en su tesis doctoral “Dimensionamento di un telaio di motocicletta: Modello di simulazione e risultati de calcolo”. Estos tres ensayos consisten en: paso por curva, paso por obstáculo y frenada máxima.

Una vez realizado el primer análisis, se verificará si la estructura es apta o no. En caso de serlo, se procederá a la optimización topológica, con lo que se conseguirá obtener un nuevo modelo en 3D, habiendo eliminado aquellas partes de la estructura que no soportan ningún tipo de esfuerzo. Gracias a la eliminación de este material sobrante, se consigue aligerar la estructura, lo que implica un descenso en el coste de fabricación ya que supone un ahorro de material.

Resultados

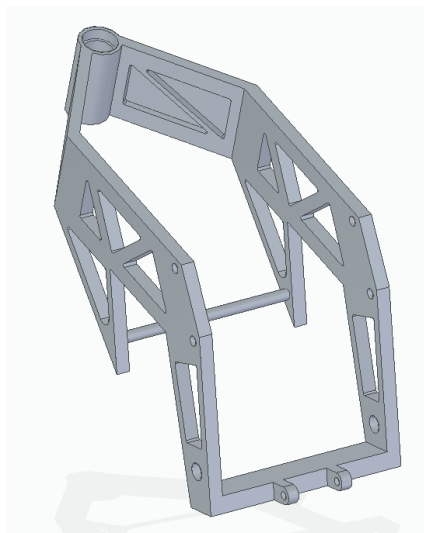
La estructura de los tres tipos de chasis es apta.

Se procede a la optimización topológica de los tres chasis. A la hora de realizar la optimización topológica del chasis modular, ésta no ha funcionado. Dicha optimización podría plantearse como inicio de otro posible trabajo. Por ello, se estudiará qué estructura es la más válida: si la parte delantera recta o la parte delantera curva.

Finalmente, tras haber estudiado los resultados de Deformación Total y Tensión Equivalente de Von Mises, se concluye que la geometría del chasis recto es la óptima.

La geometría definitiva del chasis difiere de su antecesora en vaciados en la parte lateral trasera y en semi-vaciados en la parte delantera.

La geometría final del chasis sería la siguiente:



Gracias al uso de la Optimización Topológica se ha conseguido reducir la masa del chasis un 35%: se ha pasado de tener un chasis de 10.8 kg a un chasis de 6.96 kg.

CHASSIS DESIGN OF A COMPETITION MOTORCYCLE

Author: Reinares Gozalo, Estefanía

Director: Carnicero López, Alberto

Collaborating Entity: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

Introduction

Motorcycle world is very competitive world because, due to the character of its fans and its professionals, it develops quickly.

The development of new models in terms of the design of structural parts of the motorcycle, has become the norm. Also, the application of these new designs is immediately adapted to previous models. For this, not only will it have to surpass technical characteristics of the previously established as optimal, but also win the battle in the esthetic field.

MotoStudent

MotoStudent is an international competition in which teams of different universities around the world face the design and development of a 250cc motorcycle prototype.

It is an academic challenge that covers different disciplines in which engineering students can develop a real industry project in the field of motorsport.

As it has already been mentioned, in this competition teams will face the design and development of a competition motorcycle project (motorcycle with an internal combustion engine or an electric motorcycle). For this, students must apply what they have learned in lessons and laboratories at university and demonstrate their innovative skills as future specialized engineers.

In this area is where this TFG is developed, specifically in the category of MotoStudent Petrol (motorcycle with an internal combustion engine). More specifically, this TFG deals with the design and analysis of one of the most important structural parts of a motorcycle: chassis.

Design

In this project three different prototypes of chassis are designed with the aim of establishing which of them is the most competitive one at the time of participate in the MotoStudent competition.

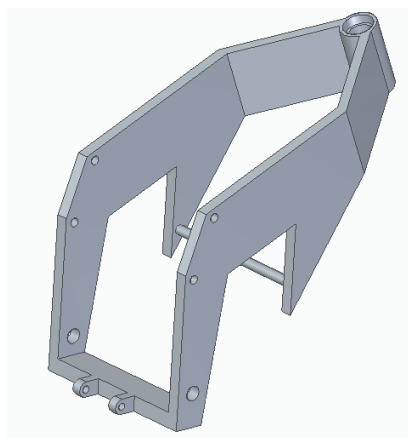
The design of the three prototypes of chassis will comply with MotoStudent's regulations, thus following the general design requirements established therein, as well as taking into account restrictions imposed by the regulations.

It has been decided to design a chassis whose front is straight, another one whose front is curved, and another one whose front is modular, ie a chassis that allows to vary its total width.

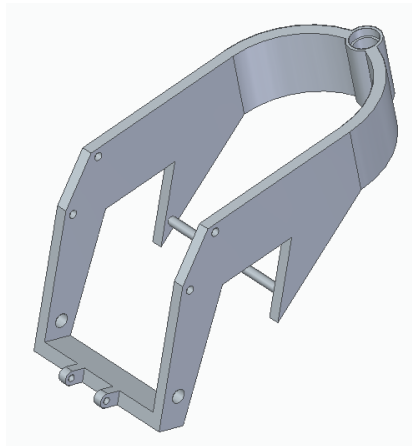
The last one is born from the need to manufacture two different chassis prototypes for MotoStudent competition: one chassis for Petrol category (with internal combustion engine), and another one for Electric category (with electric motor). The difference in total width between these two motorcycles is given by the difference between the internal combustion engine and the electric engine (which have different dimensions), in addition to the batteries needed for the electric motorcycle. With the modular chassis an optimal solution for this problem would be obtained, since it would not be necessary to manufacture two chassis with different geometries, as it would only be necessary to manufacture one chassis' geometry, but varying the angles between the modular pieces that form its front part at the time of assembly. In this way, it would be able to lower manufacturing costs. Likewise, having a more global vision, if it were a motorcycle manufacturer with two parallel manufacturing lines of both electric motorcycles and motorcycles with internal combustion engines, the use of this prototype of chassis (if it would be valid), would be a considerable saving, due to what it has been described previously.

The material chosen for the manufacture of the chassis is Aluminum 6082 T6, as its properties are suitable for the manufacture of a motorcycle chassis, it could withstand the efforts to which it would be submitted without any failure and would lower the cost of raw material.

Below it is shown the sketch of the global geometry of the motorcycle on which it has been decided to work:

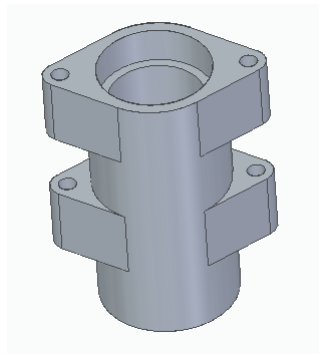


Chassis whose front is curved

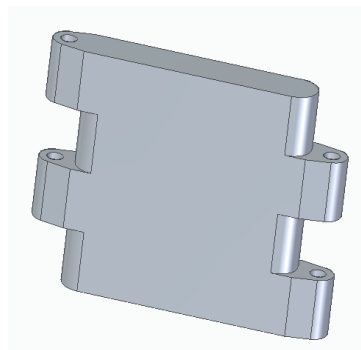


Chassis whose front is modular

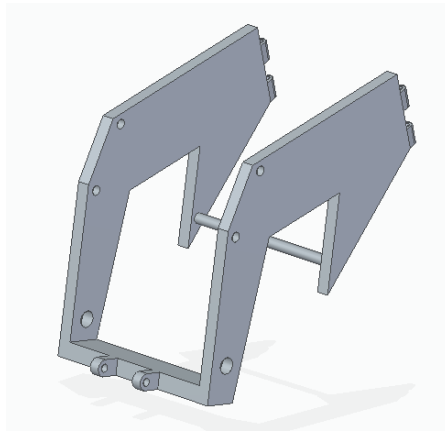
Head stock:



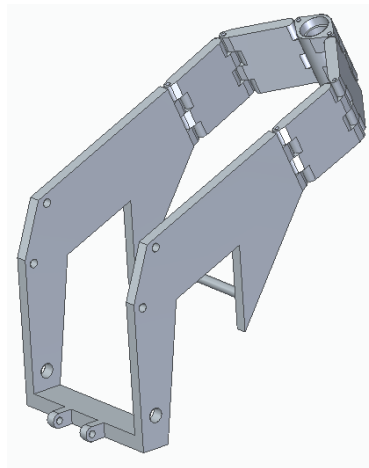
Front piece:



Lateral piece:



Ensemble:



Simulation

There will be five different tests:

- one made with the efforts obtained in matrix calculation, due to the forces that will be applied on the motorcycle in the cycle part test bench during the competition;
- another made according to a static test;
- and the other three tests consist solely in verifying that the chassis resists the maximum loads that the motorcycle can be subjected according to the data obtained by Giuseppe Polucci in his doctoral thesis “Dimensionamento di un telaio di motocicletta: Modello di simulazione e risultati de calcolo”. These three tests consist of: step by curve, step by obstacle and maximum braking.

Once the first analysis is done, it will be verified if the structure is suitable or not. If it is, a topology optimization will be done and a new model in 3D will be obtained, having eliminated those parts of the structure that do not support any kind of effort. Thanks to the elimination of this excess material, it is possible to lighten the structure, which implies a decrease in the manufacturing cost since it supposes a saving of material.

Results

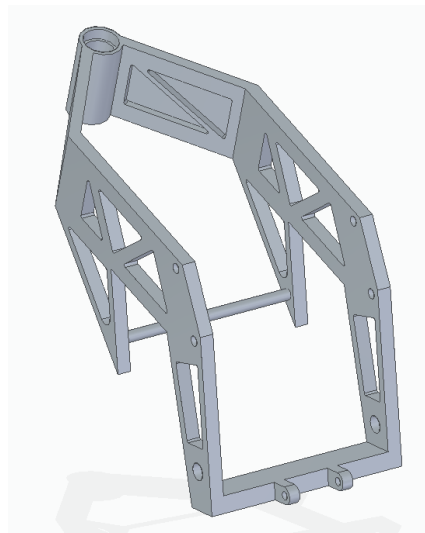
The structure of the three types of chassis is apt.

We proceed to the topology optimization of the three chassis. When carrying out the topology optimization of the modular chassis, it has not worked. This optimization could be considered as the start of another possible work. Therefore, it will be studied which structure is the most valid: whether the one whose front part is straight or the one whose front part is curved.

Finally, after studying the results of Total Deformation and Equivalent (Von Mises) Stress, it is concluded that the geometry of the straight chassis is the optimum.

Final chassis' geometry differs from its predecessor in recesses in the rear side and in semi-recesses in the front.

Final chassis' geometry would be the following:



Thanks to the use of Topology Optimization, it has been possible to reduce the chassis mass by 35%: it has gone from having a chassis of 10.8 kg to a chassis of 6.96 kg.

A mis padres.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha ayudado a ser la persona que soy hoy en día.

A mis amigos.

Por haber estado a mi lado durante estos años tan duros y apoyarme.

A mis profesores.

Por haberme ayudado en mi formación tanto académica como profesional. En especial a Alberto Carnicero, por su tiempo, paciencia y dedicación.

A Mario.

Por haberme apoyado durante este último año de carrera y por haber confiado siempre en mí.

‘Un tigre no pierde el sueño por la opinión de las ovejas’ #DP26

Proverbio asiático

Índice general

1.	Introducción.....	7
1.1.	Estado del arte	7
1.1.1.	El chasis a lo largo de la historia	7
1.1.2.	Tipos de chasis	14
1.2.	Metodología del proyecto.....	19
2.	Análisis de una motocicleta	21
2.1.	Piezas estructurales	21
2.1.1.	Chasis	21
2.1.2.	Subchasis	21
2.1.3.	Basculante	22
2.2.	Geometría básica.....	23
2.2.1.	Avance	23
2.2.2.	Ángulo de lanzamiento	23
2.2.3.	Distancia entre ejes.....	24
3.	Diseño.....	25
3.1.	Introducción	25
3.2.	MotoStudent	26
3.3.	Material.....	27
3.4.	Geometría	29
3.5.	Diseño inicial	30
4.	Simulación	33
4.1.	Introducción	33
4.2.	Cálculos estructurales.....	33
4.3.	Prueba estática	37
4.4.	Paso por curva	39
4.5.	Paso por obstáculo	40
4.6.	Frenada máxima	41
4.7.	Resultados.....	42
5.	Conclusiones	69
6.	Bibliografía.....	77
7.	Apéndices	79
7.1.	Cálculo matricial	79
7.2.	Plano chasis definitivo	89

Índice de figuras

Figura 1.1: Chasis Werner	7
Figura 1.2: Chasis Scott	8
Figura 1.3: Chasis Mars	8
Figura 1.4: Chasis BMW.....	9
Figura 1.5: Chasis Zundapp.....	9
Figura 1.6: Chasis H.R.D.....	10
Figura 1.7: Chasis Norton	10
Figura 1.8: Chasis Honda	11
Figura 1.9: Chasis Ossa	11
Figura 1.10: Chasis Norton Challenge	12
Figura 1.11: Chasis Cobas	13
Figura 1.12: Chasis Yamaha	13
Figura 1.13: Chasis de ciclomotor de tipo abierto	14
Figura 1.14: Chasis de scooter	15
Figura 1.15: Chasis de scooter con tubos de acero	15
Figura 1.16: Chasis tubular de simple cuna	16
Figura 1.17: Chasis tubular de doble cuna	16
Figura 1.18: Chasis multitubular con triangulación	17
Figura 1.19: Chasis monoviga	18
Figura 1.20: Chasis de doble viga.....	18
Figura 2. 1: Chasis	21
Figura 2. 2: Subchasis	21
Figura 2. 3: Basculante	22
Figura 2. 4: Avance.....	23
Figura 2. 5: Ángulo de lanzamiento	23
Figura 2. 6: Distancia entre ejes	24
Figura 3. 1: MotoStudent	26
Figura 3. 2: Chasis de aluminio (Moto2)	27
Figura 3. 3: Chasis de fibra de carbono (Moto2)	27
Figura 3. 4: Croquis con la geometría global de la motocicleta.....	29
Figura 3. 5: Diseño inicial chasis recto	30
Figura 3. 6: Diseño inicial chasis curvo.....	30
Figura 3. 7: Diseño inicial pipa chasis modular	31
Figura 3. 8: Diseño inicial pieza delantera chasis modular.....	31
Figura 3. 9: Diseño inicial pieza lateral chasis modular.....	32
Figura 3. 10: Conjunto chasis modular.....	32
Figura 4. 1: Nomenclatura de las barras para cálculos estructurales	34

Figura 4. 2: Esquema de aplicación de cargas	34
Figura 4. 3: Grados de libertad	35
Figura 4. 4: Fuerzas prueba estática	37
Figura 4. 5: Paso por curva	39
Figura 4. 6: Paso por obstáculo (piano).....	40
Figura 4. 7: Frenada máxima (entrada en curva).....	41
Figura 4. 8: Deformación total (chasis recto - ensayo matricial)	42
Figura 4. 9: Tensión Equivalente Von Mises (chasis recto - ensayo matricial)	42
Figura 4. 10: Optimización Topológica (chasis recto - ensayo matricial)	43
Figura 4. 11: Deformación total (chasis recto - prueba estática)	44
Figura 4. 12: Tensión Equivalente Von Mises (chasis recto - prueba estática)	44
Figura 4. 13: Optimización Topológica (chasis recto - prueba estática)	45
Figura 4. 14: Deformación total (chasis recto - paso por curva)	46
Figura 4. 15: Tensión Equivalente Von Mises (chasis recto - paso por curva).....	46
Figura 4. 16: Optimización Topológica (chasis recto - paso por curva).....	47
Figura 4. 17: Deformación total (chasis recto - paso por obstáculo).....	48
Figura 4. 18: Tensión Equivalente Von Mises (chasis recto - paso por obstáculo)	48
Figura 4. 19: Optimización Topológica (chasis recto - paso por obstáculo)	49
Figura 4. 20: Deformación total (chasis recto - frenada máxima)	50
Figura 4. 21: Tensión Equivalente Von Mises (chasis recto - frenada máxima)	50
Figura 4. 22: Optimización Topológica (chasis recto - frenada máxima)	51
Figura 4. 23: Deformación total (chasis curvo - ensayo matricial)	53
Figura 4. 24: Tensión Equivalente Von Mises (chasis curvo - ensayo matricial).....	53
Figura 4. 25: Optimización Topológica (chasis curvo - ensayo matricial)	54
Figura 4. 26: Deformación total (chasis curvo - prueba estática).....	55
Figura 4. 27: Tensión Equivalente Von Mises (chasis curvo - prueba estática)	55
Figura 4. 28: Optimización Topológica (chasis curvo - prueba estática)	56
Figura 4. 29: Deformación total (chasis curvo - paso por curva)	57
Figura 4. 30: Tensión Equivalente Von Mises (chasis curvo - paso por curva)	57
Figura 4. 31: Optimización Topológica (chasis curvo - paso por curva)	58
Figura 4. 32: Deformación total (chasis curvo - paso por obstáculo)	59
Figura 4. 33: Tensión Equivalente Von Mises (chasis curvo - paso por obstáculo)	59
Figura 4. 34: Optimización Topológica (chasis curvo - paso por obstáculo)	60
Figura 4. 35: Deformación total (chasis curvo - frenada máxima).....	61
Figura 4. 36: Tensión Equivalente Von Mises (chasis curvo - frenada máxima).....	61
Figura 4. 37: Optimización Topológica (chasis curvo - frenada máxima).....	62
Figura 4. 38: Deformación Total (chasis modular - paso por curva)	65
Figura 4. 39: Tensión Equivalente Von Mises (chasis modular - paso por curva)	65
Figura 4. 40: Deformación Total (chasis modular - paso por obstáculo)	66
Figura 4. 41: Tensión Equivalente Von Mises (chasis modular - paso por obstáculo)	66
Figura 4. 42: Deformación total (chasis modular - frenada máxima)	67
Figura 4. 43: Tensión Equivalente Von Mises (chasis modular - frenada máxima)	67
 Figura 5. 1: Geometría definitiva	 70
Figura 5. 2: Deformación total (chasis definitivo - ensayo matricial)	71
Figura 5. 3: Tensión Equivalente Von Mises (chasis definitivo - ensayo matricial)	71
Figura 5. 4: Deformación total (chasis definitivo - prueba estática).....	72

Figura 5. 5: Tensión Equivalente Von Mises (chasis definitivo - prueba estática).....	72
Figura 5. 6: Deformación Total (chasis definitivo - paso por curva)	73
Figura 5. 7: Tensión Equivalente Von Mises (chasis definitivo - paso por curva).....	73
Figura 5. 8: Deformación Total (chasis definitivo - paso por obstáculo).....	74
Figura 5. 9: Tensión Equivalente Von Mises (chasis definitivo - paso por obstáculo)	74
Figura 5. 10: Deformación total (chasis definitivo - frenada máxima).....	75
Figura 5. 11: Tensión Equivalente Von Mises (chasis definitivo - frenada máxima).....	75

Índice de tablas

Tabla 3. 1: Propiedades de los materiales.....	28
Tabla 4. 1: Fuerzas y momentos en los GDL globales	36
Tabla 4. 2: Resultados chasis recto	52
Tabla 4. 3: Resultados chasis curvo	63
Tabla 5. 1: Resultados chasis definitivo	76

1. Introducción

1.1. Estado del arte

1.1.1. El chasis a lo largo de la historia

En este apartado se incluyen los modelos más relevantes de chasis que han aparecido desde principios del S. XX hasta hoy en día. Del mismo modo, se puede valorar la evolución que han ido sufriendo éstos a lo largo de estos años, consiguiendo así unas estructuras que conseguían minimizar su peso a la vez que aumentar su resistencia.

Chasis Werner

El chasis creado por los hermanos Werner en 1901 podría tratarse del primero utilizado en una motocicleta con una estructura pionera de las que se conocen en la actualidad.



Figura 1.1: Chasis Werner¹

Este chasis de cuna está formado por una estructura de tubos de acero de pequeña sección, logrando así una estructura rígida, ligera y cerrada.

Consiste en un chasis de bicicleta reforzado para la instalación del bloque motor en la parte central de la motocicleta. Aunque todavía no utiliza ningún tipo de suspensión, para la dirección de la motocicleta incluye una horquilla.

¹ <https://motosantiguasgranada.es.tl/1900--k1-3-k2--Alcyon%2C-Anzani-d--Los-herederos-de-%C9lie-Buchet.htm>

Chasis Scott

Con el paso del tiempo, el chasis de la motocicleta requiere de una mayor rigidez, por lo que la sección de los tubos de acero aumenta.



Figura 1.2: Chasis Scott²

En este chasis de 1909, Scott diseña un chasis abierto por la parte superior, en el cual el motor realiza una función portante. Otra novedad que adquiere la motocicleta en la cual está incluido este chasis, es que ya dispone de una suspensión delantera.

Chasis Mars

En 1920, la Mars sustituye los tubos de sección cerrada por la chapa estampada, la cual no plantea problemas en uniones soldadas y tiene una gran rigidez.



Figura 1.3: Chasis Mars³

Aumenta la resistencia del chasis, a pesar de su mayor peso.

² <http://www.motociclismo.es/pruebas/articulo/24-motos-cambiaron-mundo>

³ <https://www.pinterest.es/pin/443041682082583594/>

Este chasis consiste en una viga de sección cuadrada, a la cual se sujetan el resto de elementos mediante tirantes. Algo que años más tarde volvería a adquirir gran importancia fue la unión directa de la rueda trasera con el anclaje de la suspensión delantera.

Chasis BMW

La BMW R-32 de 1923, no presenta grandes avances respecto a lo realizado con anterioridad.



Figura 1.4: Chasis BMW⁴

Sin embargo, utiliza como elemento resistente la parte superior del chasis, adquiriendo además una gran ligereza y volviendo de nuevo al uso de tubos de acero. Además, el motor también realiza una función resistente.

Chasis Zundapp

El chasis de la Zundapp K800 de 1934 vuelve a ser una chapa de acero.



Figura 1.5: Chasis Zundapp⁵

No utiliza tanto material con el fin de reducir el peso. Para ello, la chapa se corta y se dobla a través de novedosos procedimientos, adquiriendo así una estructura más rígida.

⁴ <https://www.pinterest.es/pin/443041682083644992/>

⁵ <https://www.taringa.net/posts/autos-motos/18308580/Micro-coupes-Parte-2.html>

No obstante, se sigue manteniendo los bastidores tubulares. Tanto las suspensiones delanteras como traseras se han mejorado, aunque todavía no han conseguido alcanzar su punto de máximo rendimiento.

Chasis H.R.D.

El chasis de la Vincent H.R.D. Rapid de 1939 es muy ligero, posiblemente el más ligero visto hasta la época.



Figura 1.6: Chasis H.R.D.⁶

El motor adquiere una gran función portante. La mayor novedad reside en la suspensión trasera, la cual está directamente anclada al motor por medio de un tirante. Además, la suspensión delantera también está anclada al motor, pero por medio de un pequeño elemento alojado en la parte superior del propulsor.

Chasis Norton

Los hermanos McCandless diseñaron uno de los chasis más famosos de la historia, el cual estaba integrado en la Norton Manx de 1950.



Figura 1.7: Chasis Norton⁷

⁶ <https://www.motorcyclenews.com/news/2015/january/vincent-hrd-saved-from-scrap-up-for-auction/>

⁷ <https://www.pinterest.es/pin/443041682082583272/>

Este chasis es un chasis de doble cuna cerrada de tubos de acero.

Se pueden diferenciar dos partes: la estructura que soporta el motor y el subchasis, el cual hace de soporte para el piloto y la amortiguación posterior a partir de un basculante articulado y amortiguadores.

Chasis Honda

El chasis de la Honda CR 72 de 1963 de competición, utiliza el motor como un elemento estructural de gran importancia.



Figura 1.8: Chasis Honda⁸

Este chasis no consiste en una estructura cerrada. Sorteja por la parte superior al motor, pero manteniendo al mismo tiempo tanto el anclaje de la suspensión delantera como el de la suspensión trasera.

De esta forma, consigue adoptar las diferentes variaciones de las suspensiones de los últimos años, la horquilla y el basculante.

Chasis Ossa

La Ossa es una motocicleta de competición de finales de los años 60.

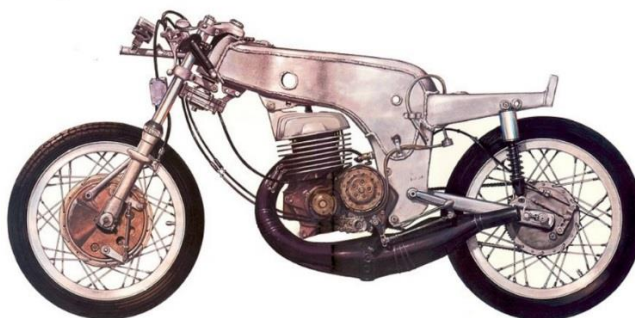


Figura 1.9: Chasis Ossa⁹

⁸ <https://www.pinterest.es/pin/531213718517263662/>

⁹ <http://www.voromv.com/2010/12/bocetos-proyecto-ossa-monocasco.html>

La gran novedad de este chasis monocasco fue que ya no utilizaba el acero como material para su fabricación, sino que utilizaba una aleación de magnesio.

Debido a su estructura cerrada (salvo en la parte del basculante), este chasis está dotado de una gran rigidez. Además, esto permite unas dimensiones menores, con lo que se consigue un peso más ligero.

Chasis Norton Challenge

La Norton Challenge lleva un chasis multitubular.



Figura 1.10: Chasis Norton Challenge¹⁰

Es una derivación de los chasis tradicionales de tubo, pero ancla el motor por la parte superior con tubos de sección recta, para evitar así que trabajen a esfuerzos de flexión. Con ello se consigue aumentar la rigidez de la estructura sin aumentar el peso.

El inconveniente de este tipo de chasis es que tiene una estructura complicada y cara.

Chasis Cobas

Antonio Cobas presentó a principios de los años 80 el chasis de doble viga, el cual fue una gran revolución: el chasis Deltabox.

¹⁰ <http://www.argentinamotos.com/archivos/14499>



Figura 1.11: Chasis Cobas¹¹

Une directamente la pipa de dirección con el eje del basculante, consiguiendo así una estructura muy rígida. Está formado por una aleación ligera, lo cual permite que el chasis sea ligero.

Chasis Yamaha

El chasis que equipa la Yamaha GTS es un chasis de última generación, e incorpora grandes novedades nunca vistas hasta entonces.



Figura 1.12: Chasis Yamaha¹²

Se ha eliminado la suspensión delantera por horquilla y en su lugar se ha puesto un sistema de brazo oscilante. Debido a esto, el chasis no necesita empezar en la parte superior, por lo que la estructura abraza el motor, uniendo los puntos de anclaje de las suspensiones delantera y trasera mediante gruesas vigas de aleación ligera.

¹¹ <https://pistonmaike.wordpress.com/2015/07/27/chasisdeltabox-el-chasis-de-doble/>

¹² <http://www.motosclasicas80.com/reportajes/108-yamaha/gts-1000-omega/101-gts-1000-omega.html>

1.1.2. Tipos de chasis

A continuación, se describen los tipos de chasis más empleados en la actualidad en las motocicletas.

Chasis de ciclomotor de tipo abierto

La estructura del chasis es abierta, formada por un tubo grueso.

Debido a que es un chasis para ciclomotor, la velocidad de éste es limitada, por lo que el chasis no tiene por qué tener una gran rigidez.

Por ello, para un ciclomotor se utilizan estructuras abiertas, facilitando al mismo tiempo un acceso cómodo para el piloto.



Figura 1.13: Chasis de ciclomotor de tipo abierto¹³

¹³ <https://contenidos.fundacionmapfre.org/actividad-interactiva/educacion-secundaria/como-funciona-un-ciclomotor/07.html>

Chasis de scooter

Este tipo de chasis puede ser de tipo tubular o de chapa.

Durante mucho tiempo, la chapa estampada era el material más utilizado para la fabricación de scooters, ya que marcas como Vespa los incluían en sus motocicletas. La ventaja de utilizar este material es que engloba en un solo elemento tanto el chasis como la carrocería. Además, los ciclomotores que utilizan este tipo de chasis incluían también superficies de protección en la parte delantera y en la inferior, aumentando al mismo tiempo la rigidez de los mismos.



Figura 1.14: Chasis de scooter¹⁴

Actualmente, la chapa casi no se utiliza, y en cambio se utilizan más los tubos de acero para la fabricación de este tipo de chasis. Éstos son muy similares a los de chapa, pero dejando las protecciones de plástico fuera del chasis. El motor se sujeta por la parte de abajo del chasis, justo debajo de donde irán los ocupantes.



Figura 1.15: Chasis de scooter con tubos de acero¹⁵

¹⁴ <http://www.recambiomoto.com/Chasis-Vespa-PX-125/150/200-disco>

¹⁵ <http://www.clubbeverly.es/foro-general-f3/meloneando-que-es-gerundio-t93-10.html#.WpLusa7iapo>

Chasis tubulares

Es un tipo de chasis basado en la unión de tubos de acero o aluminio que forman una red alrededor del bloque motor de la motocicleta.

La gran ventaja de este tipo de chasis es que se obtiene una gran rigidez al mismo tiempo que se consigue una disminución del peso.

Hay diversos tipos de chasis tubulares:

- Chasis de simple cuna

Este tipo de chasis evolucionó directamente de las bicicletas.

Forma una cuna por debajo del bloque motor hasta la pipa de dirección.

Es un chasis de baja rigidez estructural, por lo que se emplea en motocicletas de baja potencia.

Pueden ser completos o interrumpir su sección inferior utilizando el motor como elemento resistente.



Figura 1.16: Chasis tubular de simple cuna¹⁶

- Chasis de doble cuna

Es un tipo de chasis que evolucionó de los chasis de cuna simple.

La diferencia es que, además de la continuación de los tubos hacia la pipa de dirección, también enlazan con la posición de las ruedas traseras.

Son más rígidos que los de doble cuna, ya que están cerrados en su totalidad para mejorar el apoyo y utilizarlo para aumentar la rigidez.

No existen los tubos de la parte inferior, y el motor se sujeta por la parte de la culata.



Figura 1.17: Chasis tubular de doble cuna¹⁷

¹⁶ <https://www.pruebaderuta.com/tipos-de-chasis-en-la-motocicleta.php>

¹⁷ <https://experienciasdeunmotero.wordpress.com/2015/06/11/el-chasis-de-la-moto-ese-gran-desconocido-al-que-tanto-debemos/>

- Chasis multitubular con triangulación

Consiste en un conjunto de tubos de tamaño medio doblados alrededor del motor, conectando la pipa de dirección con el eje del basculante.

La sección de dichos tubos es pequeña para conseguir una mayor rigidez a esfuerzos de torsión y flexión. Este tipo de chasis sí es eficiente estructuralmente.

No obstante, el uso de tubos largos de pequeño diámetro hace que puedan entrar en resonancia debido al motor.

Debido a la forma y el tamaño de los motores más utilizados en la actualidad, no suele utilizarse este tipo de chasis, ya que se necesitaría una estructura más ancha y por lo tanto más compleja.



Figura 1.18: Chasis multitubular con triangulación¹⁸

¹⁸ <https://experienciasdeunmotero.wordpress.com/2015/06/11/el-chasis-de-la-moto-ese-gran-desconocido-al-que-tanto-debemos/>

Chasis de viga

Es un tipo de chasis que utiliza vigas (de cualquier tipo de sección) de gran tamaño. De esta forma, se consigue una gran rigidez a la par que una gran ligereza.

Existen dos tipos de chasis de viga:

- Chasis monoviga

El más importante dentro de este grupo es el chasis de espina central.

Su gran ventaja es que se adquiere una gran eficiencia estructural y trabaja muy bien ante esfuerzos de torsión y flexión.

Sin embargo, no es el apropiado si el volumen del motor es grande.



Figura 1.19: Chasis monoviga¹⁹

- Chasis de doble viga

Su inventor fue el ingeniero español Antonio Cobas.

Supuso una gran revolución, y a día de hoy es el tipo de chasis más utilizado en el mundo de la competición de velocidad.

Consiste en dos vigas situadas a ambos lados del motor que unen la pipa de dirección con el eje del basculante.

No es un tipo de chasis óptimo a nivel estructural. Sin embargo, facilita mucho el acceso para trabajar sobre el motor durante una competición. Por otra parte, al eliminar los tubos que rodeaban el motor tanto por su parte delantera como por debajo, queda libre un espacio que puede emplearse para sistemas de refrigeración del motor.



Figura 1.20: Chasis de doble viga²⁰

¹⁹ <https://subastas.catawiki.es/kavels/16761827-norton-telaio-norton-commando-850-electric-start-850-cc-1975>

²⁰ <http://www.xcitingclub.es/viewtopic.php?p=202683>

1.2. Metodología del proyecto

Se partirá de tres alternativas: chasis recto, chasis curvo y chasis modular.

Para la elección de qué chasis se llevará finalmente a fabricar, se diseñará cada una de las tres alternativas y a continuación se analizarán por separado. Para ello se valorará cada opción y se decidirá aquella que ofrezca mejores prestaciones, teniendo en cuenta el coste que supondría.

En primer lugar, se desarrollará un modelo CAD de cada tipo de chasis y, tras el análisis de las diferentes cargas que puede sufrir, se obtendrá a partir del cálculo de elementos finitos la respuesta estructural del chasis.

Una vez obtenido ese resultado, se procederá al rediseño de cada chasis hasta conseguir la respuesta estructural deseada.

Al finalizar las fases de diseño y simulación, se procederá a realizar una comparativa entre los tres tipos de chasis, estudiando las ventajas e inconvenientes de cada uno.

Finalmente, se propondrá un único modelo de chasis para su fabricación para el posterior montaje dentro de la estructura de la motocicleta.

2. Análisis de una motocicleta

2.1. Piezas estructurales

2.1.1. Chasis

El chasis es la pieza estructural más importante de la motocicleta.

Su función es la de integrar y dar sujeción a los componentes mecánicos, el motor y la suspensión de las ruedas.

Aporta rigidez y da forma a la propia moto.

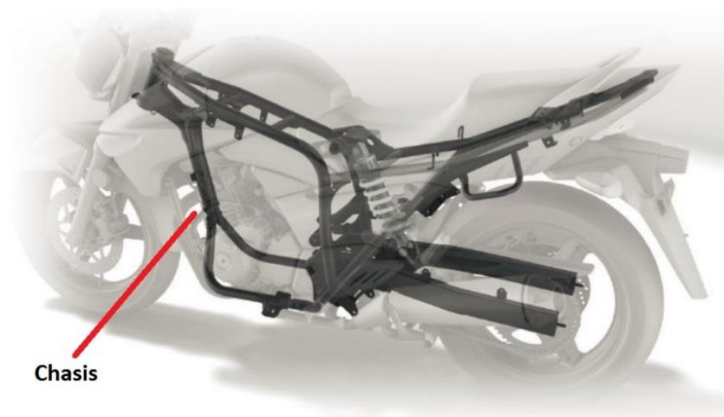


Figura 2. 1: Chasis

2.1.2. Subchasis

El subchasis es la continuación del chasis, es su parte final.

Su función es la de sustentar el asiento, al piloto y al colín trasero.

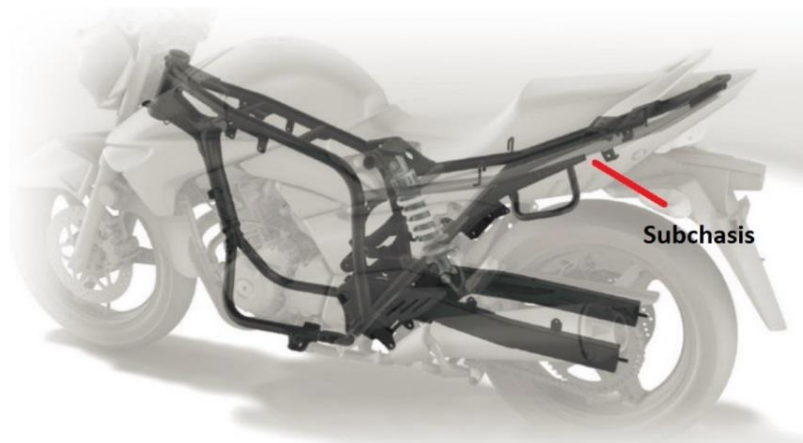


Figura 2. 2: Subchasis

2.1.3. Basculante

El basculante es la segunda pieza estructural más importante de la motocicleta.

Al girar sobre su propio eje permite el movimiento de la suspensión, ya que a él se encuentra anclado el amortiguador.

En su parte delantera va unido al chasis, mientras que en su parte trasera se encuentra alojado mediante un eje a la rueda trasera.

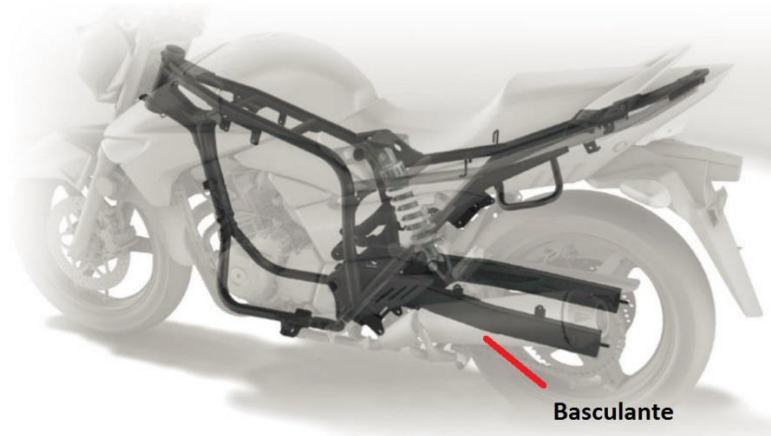


Figura 2. 3: Basculante²¹

²¹ http://revistamoto.com/wp_rm/tipos-de-chasis-en-la-motocicleta/

2.2. Geometría básica

2.2.1. Avance

Es la medida que existe entre el punto de contacto del neumático con el asfalto, es decir, la vertical del eje delantero al suelo, con el punto imaginario de contacto en el asfalto de la prolongación del eje de dirección, es decir, de la pipa de dirección. Se mide en mm.



Figura 2. 4: Avance

A mayor avance, se conseguirá una mayor fuerza autoalineante y una mayor estabilidad direccional, por lo que el piloto sentirá mejor la motocicleta en recta y curvas rápidas, a pesar de que ésta sea lenta de inclinar y levantar y dé la sensación de mayor peso.

2.2.2. Ángulo de lanzamiento

Es el ángulo que toma el eje delantero, es decir, la pipa de dirección con la normal de la rueda delantera. El avance que tendrá la motocicleta viene determinado por el ángulo de lanzamiento, también denominado ángulo de avance. Se mide en grados.

Se decide en función de factores tales como la distancia entre ejes, las torsiones de horquilla en las frenadas, los cambios de geometría debidos al efecto telescópico de la horquilla, la rigidez de la pipa de dirección, etc.

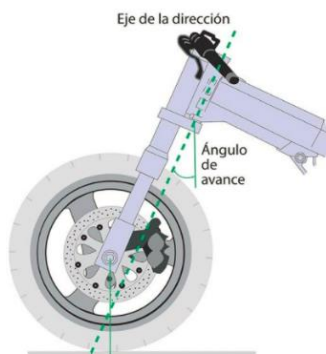


Figura 2. 5: Ángulo de lanzamiento

El ángulo de lanzamiento influye en que la motocicleta tenga más o menos facilidad de romper el auto-alineamiento, ya que a menor ángulo de lanzamiento, se tendrá mayor sensación de direccionalidad.

2.2.3. Distancia entre ejes

Es la longitud que hay entre los ejes de la rueda delantera y la rueda trasera. Se mide en mm.

Influye en gran medida en la estabilidad direccional de la motocicleta, como puede ser en la transferencia de carga, la estabilidad tanto en rectas como en curvas, los apoyos de los ejes delanteros y traseros en frenadas y aceleraciones, el centro de gravedad, etc.

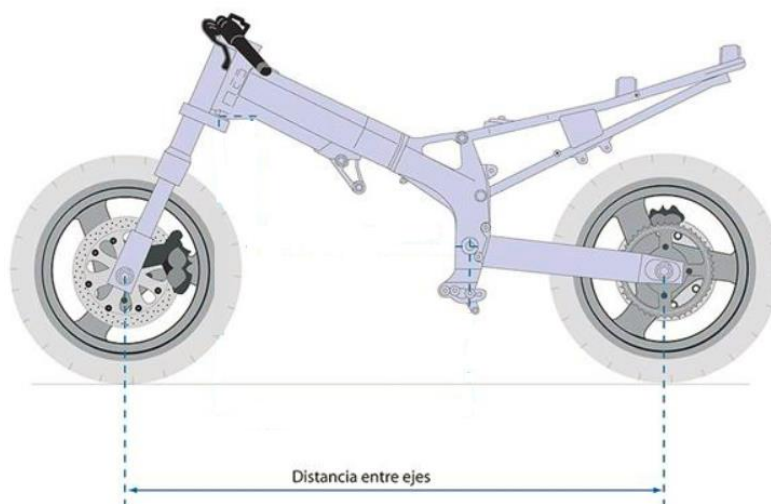


Figura 2. 6: Distancia entre ejes²²

A mayor distancia entre ejes, la motocicleta será una motocicleta larga. Esto conlleva que ésta sea más estable de dirección y tenga un mayor comportamiento en curvas rápidas y en rectas; a pesar de que al acelerar, el derrapaje trasero sea más difícil de controlar.

Por el contrario, a menor distancia entre ejes, la motocicleta será una motocicleta corta. Con esto se consigue que ésta sea más ágil en los cambios de dirección, que tenga un mejor giro en curvas lentas y que el derrapaje trasero al acelerar sea más controlable. Por contrapartida, la motocicleta será más nerviosa de dirección en rectas y en curvas rápidas.

²² <http://rveracing.foroactivo.com/t9-geometrias-de-la-motocicleta>

3. Diseño

3.1. Introducción

Uno de los objetivos de este proyecto es el diseño de tres tipos de chasis diferentes.

Se ha decidido realizar un chasis cuya parte delantera sea recta, otro cuya parte delantera sea curva y otro cuya parte delantera sea modular, es decir, un chasis que permita variar su anchura total.

Este último nace de la necesidad de fabricar dos tipos de chasis diferentes para la competición de MotoStudent: un chasis para la categoría Petrol (con motor de combustión interna), y otro chasis para la categoría Electric (con motor eléctrico). La diferencia de anchura total entre estas dos motocicletas viene dada por la diferencia entre el motor de combustión interna y el motor eléctrico (los cuales tienen diferentes dimensiones), además de las baterías necesarias para la motocicleta eléctrica. Con el chasis modular se conseguiría una solución óptima para este problema, ya que no sería necesaria la fabricación de dos chasis con geometrías diferentes, sino que sólo sería necesaria la fabricación de una geometría, pero variando los ángulos entre las piezas modulares que forman su parte delantera a la hora de su montaje. De este modo, se conseguirían abaratar costes de fabricación. Así mismo, teniendo una visión más global, si se tratara de un fabricante de motocicletas con dos líneas de fabricación en paralelo de motocicletas eléctricas y motocicletas con motor de combustión interna, el uso de este tipo de chasis (en caso de ser válido), supondría un ahorro considerable, debido a lo descrito con anterioridad.

El diseño de estos tres tipos de chasis tendrá las restricciones impuestas por la competición de MotoStudent (de la cual se hablará más adelante). En el caso del diseño del chasis, existen estos requisitos:

- El chasis debe tratarse de un chasis de diseño y fabricación propia, no permitiendo así el uso de chasis comerciales o unidades modificadas.
- No existe ninguna limitación en el tipo de diseño del chasis, siempre y cuando cumpla con la normativa del reglamento de la competición.
- No está permitido el uso de titanio ni aleaciones de titanio para su fabricación.
- Se permite la soldadura de elementos estructurales por cualquier tipo de soldadura, siempre y cuando resulte de una estructura resistente.
- La estructura ha de estar perfectamente triangulada.

Además, habrá que tener en cuenta otros requisitos generales de diseño, como pueden ser:

- La cota máxima entre el asiento y la parte más elevada del colín será de 150mm.
- El peso mínimo de la motocicleta sin piloto y con 1 litro de gasolina, deberá ser de 95kg.
- Se ha de tener en cuenta la ergonomía del piloto.

Este proyecto va encaminado al diseño y validación de un chasis para una motocicleta de competición de 250 cc, 4T de la categoría Petrol. No obstante, en caso de ser válido el chasis cuya parte delantera sea modular, también podría utilizarse para la categoría Electric.

Para lo referido a esta sección, se ha hecho uso de la licencia de SolidEdge adquirida en la Universidad Pontificia Comillas (ICA I).

3.2. MotoStudent

MotoStudent es una Competición Internacional promovida por la Fundación Moto Engineering Foundation (MEF) y TechnoPark Motorland).



Figura 3. 1: MotoStudent²³

Consiste en un desafío entre equipos de estudiantes de diferentes universidades de todo el mundo. Es un desafío académico que abarca diferentes disciplinas, en las cuales los estudiantes de ingeniería pueden desarrollar un proyecto industrial real en el ámbito del deporte del motor de competición.

En esta competición, los equipos se enfrentarán al diseño y desarrollo de un proyecto de motocicleta de competición (motocicleta con motor de combustión interna o motocicleta eléctrica). Para ello, los estudiantes han de aplicar directamente lo aprendido en aulas y laboratorios durante su estancia en la universidad y demostrar sus capacidades de innovación como futuros ingenieros especializados.

Este proyecto será evaluado y sometido a diferentes pruebas en el circuito de Motorland Aragón, en Alcañiz (España).

²³ http://www.motostudent.com/assets/files/MS1718_Regulations_V1_ESP.pdf

3.3. Material

La elección del material es uno de los aspectos más importantes a determinar, ya que de ello depende en gran medida tanto el diseño original del chasis como el precio final de fabricación de éste.

Como punto de partida, se empieza por analizar qué tipo de material es el empleado para fabricar el chasis de motocicletas tanto de competición como las del mercado actual.

Se observa que los materiales más empleados para ello son el aluminio, acero, aleaciones de acero, titanio y fibra de carbono.

En el punto B.3.2 de la normativa de la competición de MotoStudent, se prohíbe expresamente utilizar como material el titanio y cualquiera de sus aleaciones, por lo que se descarta este material.

Por otra parte, se decide descartar el uso del acero o cualquier tipo de aleación de éste debido a que, al tratarse de una motocicleta de competición, el uso de un material de densidad 7850 kg/m^3 , produciría un aumento de peso bastante elevado, lo cual haría que la motocicleta pesara más de lo debido, disminuyendo así su capacidad de competitividad al no ser tan ligera como pueden llegar a serlo otras motocicletas.

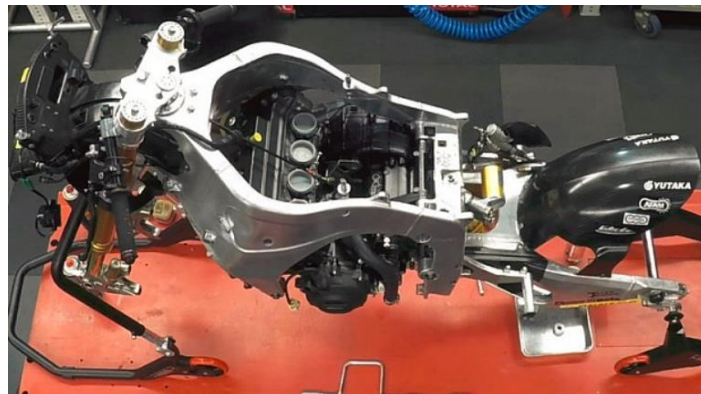


Figura 3. 2: Chasis de aluminio (Moto2)²⁴



Figura 3. 3: Chasis de fibra de carbono (Moto2)

²⁴ <https://www.soymoto.net/asi-se-fabrica-un-chasis-kalex-de-moto2-video-24914>

Por todo lo expuesto anteriormente, se estudiarán dos posibles materiales: Aluminio 6082 T6 y Fibra de Carbono.

Para su elección, se tendrán en cuenta algunas de sus propiedades, como por ejemplo el módulo de elasticidad, límite elástico, coeficiente de Poisson o resistencia a la tracción, al igual que el precio.

En la siguiente tabla se observan las propiedades de ambos materiales. De esta forma, se podrá hacer una mejor comparación.

	Aluminio 6082 T6	Fibra de Carbono
Módulo de Young [GPa]	70	380
Límite elástico [MPa]	250	2000
Resistencia a tracción [MPa]	300	2400
Resistencia a compresión [MPa]	300	4000
Coeficiente de Poisson [-]	0.3	0.1
Densidad [kg/m³]	2700	1820
Precio [€/kg]	2.3	42.25

Tabla 3. 1: Propiedades de los materiales

Tal y como se puede apreciar en la tabla anterior, las propiedades de la Fibra de Carbono son mucho mejores que las del Aluminio 6082 T6. Del mismo modo, el precio de la Fibra de Carbono es mucho más elevado que del Aluminio 6082 T6.

Al desestimar la Fibra de Carbono, el chasis aumentará de peso, ya que la densidad de la Fibra de Carbono es 1.5 veces menor que la del Aluminio 6082 T6. Este aumento de peso sería aproximadamente de 3.5kg.

Teniendo en cuenta el precio, si se fabricara el chasis de Fibra de Carbono, éste resultaría ser 12 veces más caro que si se fabricara en Aluminio 6082 T6.

Por todo ello, se decide utilizar como material el Aluminio 6082 T6, ya que sus propiedades son aptas para la fabricación de un chasis de motocicleta, pues podría soportar los esfuerzos a los que será sometido sin fallo alguno y se abarataría el coste de materia prima del material.

3.4. Geometría

A continuación se muestra el croquis de la geometría global que se ha decidido para la motocicleta, sobre la cual se empezará a trabajar:

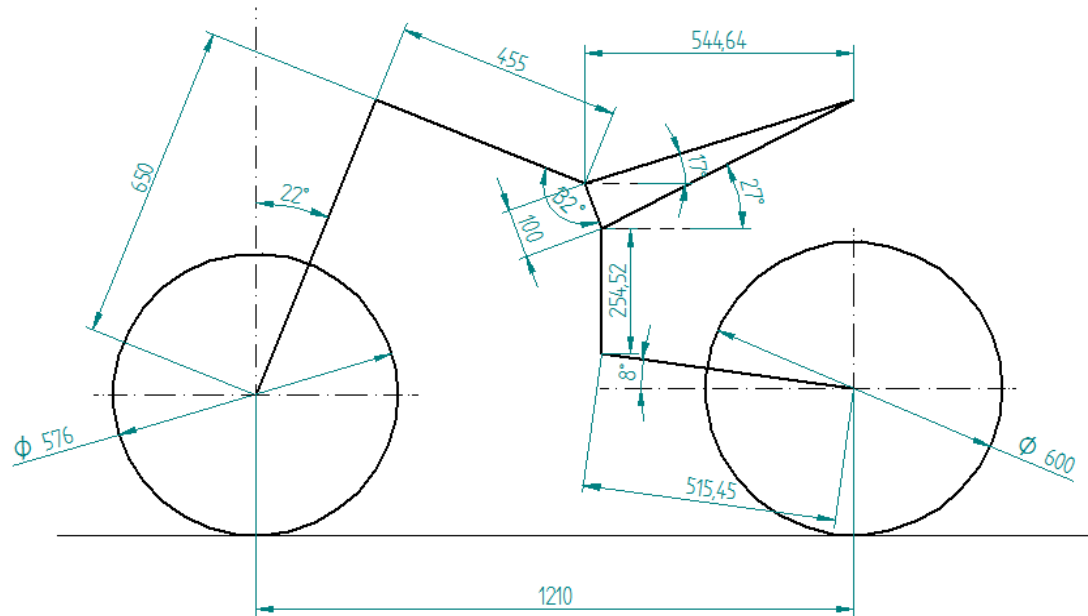


Figura 3. 4: Croquis con la geometría global de la motocicleta

Tal y como se puede apreciar en la figura anterior, en cuanto a la geometría básica se ha decidido que la motocicleta tenga una distancia entre ejes de 1210 mm y un ángulo de lanzamiento de 22° .

Por lo que corresponde a otras dimensiones, las ruedas delantera y trasera serán proporcionadas por la competición de MotoStudent, por lo que sus dimensiones no podrán variar de ninguna forma; mientras que la medida de la horquilla delantera ha sido tomada de una motocicleta de competición de la categoría de Pre-Moto3.

El resto de parámetros han sido elegidos según criterio propio y teniendo en cuenta las restricciones y los requisitos de la competición.

3.5. Diseño inicial

A continuación, se muestran los diseños iniciales de los tres tipos de chasis con los que se comenzará la simulación y validación.

Chasis cuya parte delantera es recta

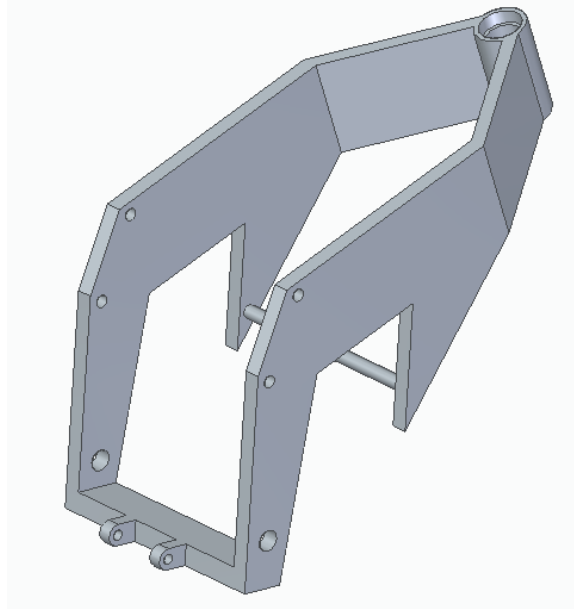


Figura 3. 5: Diseño inicial chasis recto

Chasis cuya parte delantera es curva

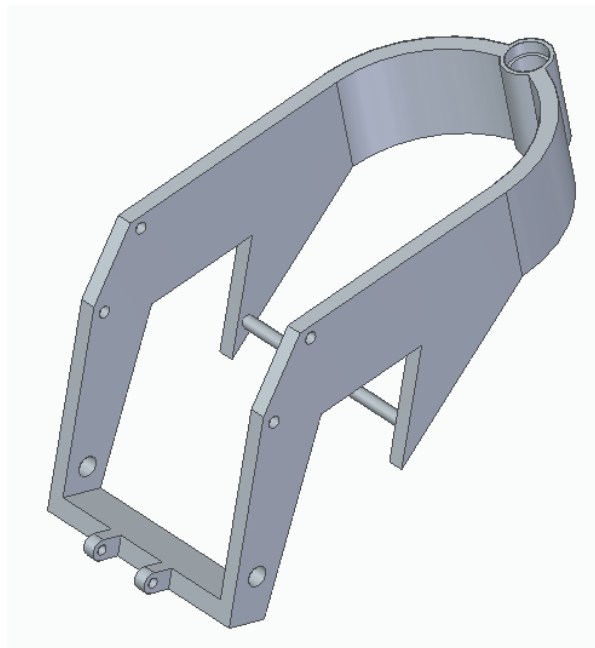


Figura 3. 6: Diseño inicial chasis curvo

Chasis cuya parte delantera es modular

En cuanto a este chasis, se presentan tanto cada una de las tres piezas que forma el conjunto (pipa, pieza delantera, pieza lateral) como el conjunto final de éste.

Para el conjunto de este tipo de chasis se han utilizado las siguientes piezas:

- 1 pipa.
- 4 piezas delanteras.
- 1 pieza lateral.

Pipa:

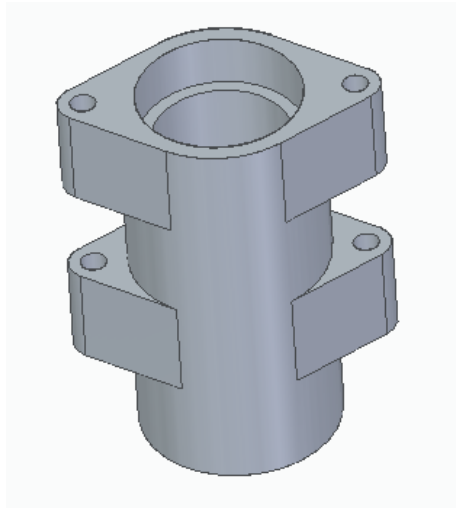


Figura 3. 7: Diseño inicial pipa chasis modular

Pieza delantera:

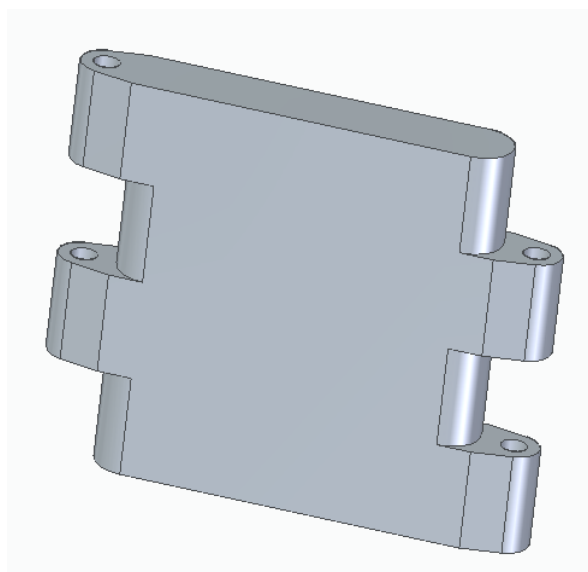


Figura 3. 8: Diseño inicial pieza delantera chasis modular

Pieza lateral:

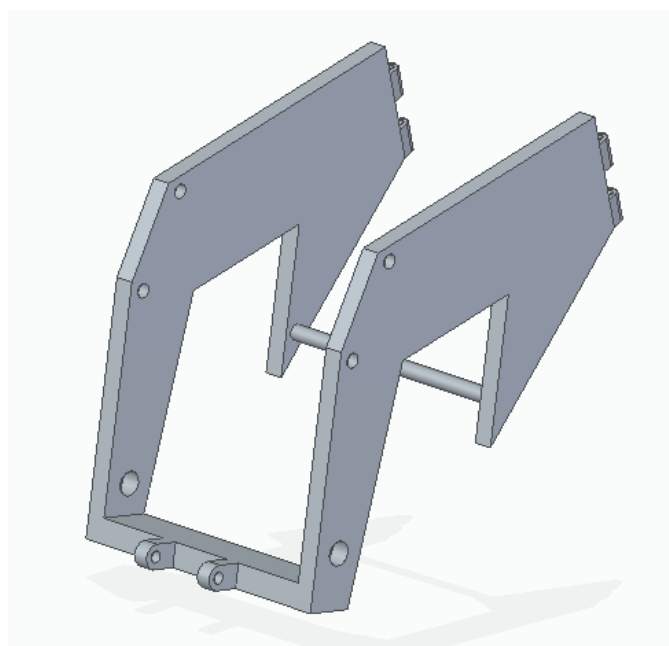


Figura 3. 9: Diseño inicial pieza lateral chasis modular

Conjunto:

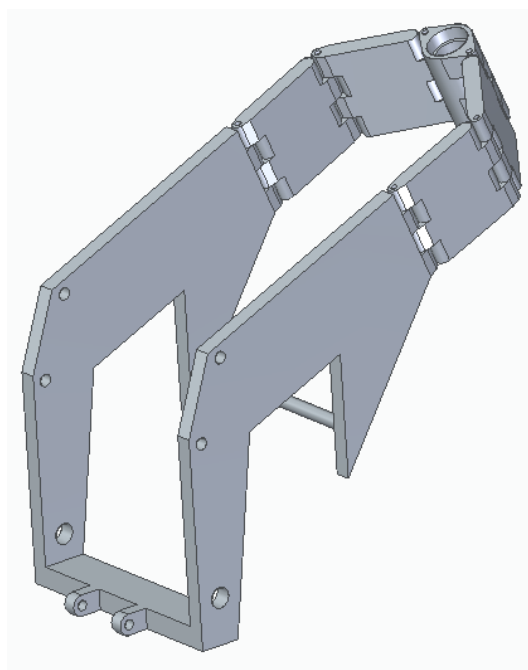


Figura 3. 10: Conjunto chasis modular

4. Simulación

4.1. Introducción

El otro objetivo de este proyecto es el análisis estructural de los tres tipos de chasis mediante el método de elementos finitos y su optimización.

Para llevar a cabo el análisis estructural se procederá inicialmente al cálculo de las cargas a las cuales el chasis va a estar sometido durante la participación en la competición. A continuación, se definirán las condiciones de contorno y las diferentes restricciones para realizar la optimización.

Una vez realizado el primer análisis, se verificará si la estructura es apta o no. En caso de serlo, se procederá a la optimización topológica, con lo que se conseguirá obtener un nuevo modelo en 3D, habiendo eliminado aquellas partes de la estructura que no soportan ningún tipo de esfuerzo. Gracias a la eliminación de este material sobrante, se consigue aligerar la estructura, lo que implica un descenso en el coste de fabricación ya que supone un ahorro de material.

Para lo referido a esta sección, se ha hecho uso de la licencia Campus Ansys Multiphysics 18.2 del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Comillas (ICA I).

4.2. Cálculos estructurales

El cálculo de cargas a las que va a estar sometida la motocicleta durante la participación en la competición se llevará a cabo con el método de rigidez.

El método de rigidez es un método matricial utilizado para el cálculo de estructuras que relaciona en un primer momento deformaciones y desplazamientos. Para ello se emplean inicialmente ecuaciones de compatibilidad y a continuación se aplican leyes de comportamiento y ecuaciones de equilibrio. Se trata de un procedimiento que puede ser sistematizado con el uso del programa informático Excel.

La matriz de rigidez representa las fuerzas y momentos obtenidos en la estructura cuando se produce un desplazamiento unitario.

Se usarán dos sistemas de referencia: uno global, referido a toda la estructura; y otro local, referido a cada barra de la estructura. En este caso se ha decidido utilizar una estructura compuesta por 6 barras:

- Barra AB: horquilla.
- Barras BC, CD y DF: chasis.
- Barras CE y DE: subchasis.

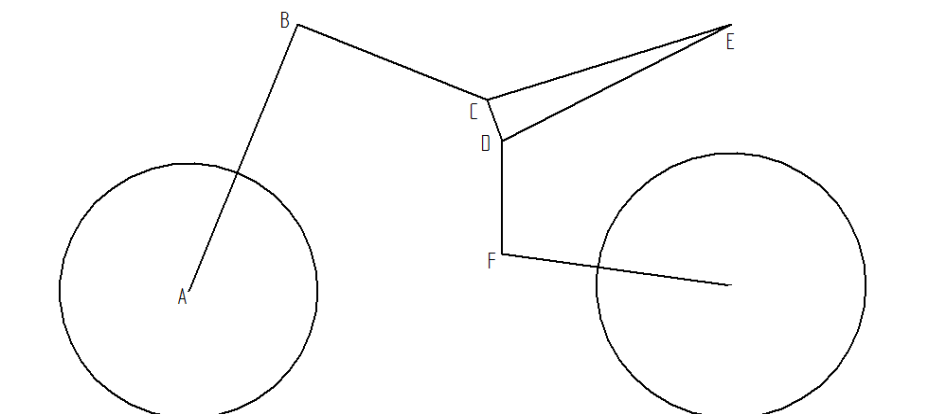


Figura 4. 1: Nomenclatura de las barras para cálculos estructurales

Los esfuerzos se calcularán con las fuerzas que se aplicarán sobre la motocicleta en el banco de ensayo de parte ciclo durante la competición. Dichas fuerzas son las siguientes:

- Carga horizontal en rueda delantera: 300kg.
- Carga vertical sobre el asiento: 250kg.

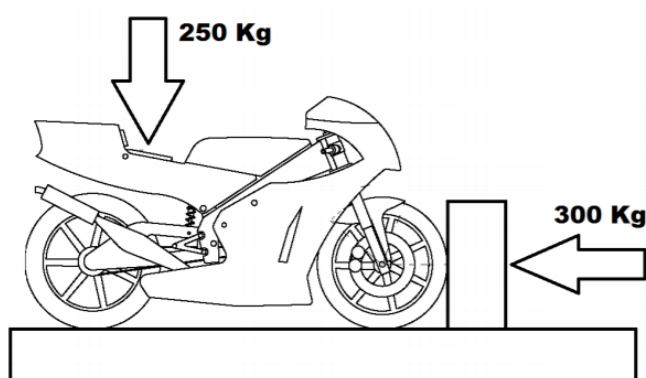


Figura 4. 2: Esquema de aplicación de cargas²⁵

Esto supone, en el caso más crítico, la aplicación de una fuerza horizontal en A de 2943 N y una fuerza vertical hacia abajo en E de 2452.5 N.

En cuanto a los apoyos, se ha supuesto que hay dos apoyos: un apoyo móvil en A y un apoyo fijo en F.

²⁵ Reglamento MotoStudent, sección E.3.3.3

El método de rigidez se ha llevado a cabo de la siguiente forma:

En primer lugar, se introducen los grados de libertad (GDL) en la estructura.

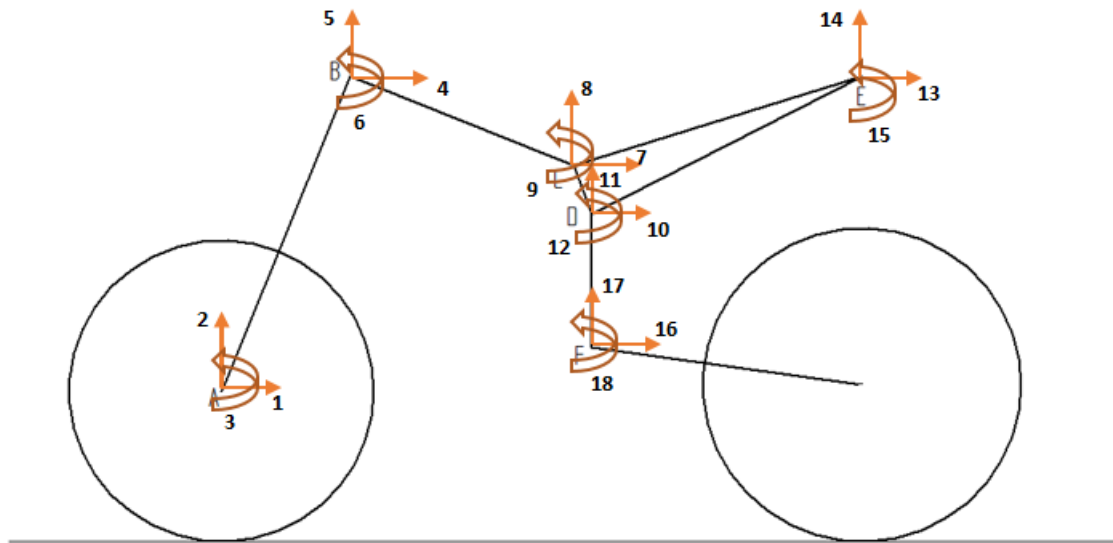


Figura 4. 3: Grados de libertad

En segundo lugar, se calcula la matriz de rigidez de cada barra en coordenadas locales k_e y la matriz de giro R_e . A continuación, se calcula la matriz de rigidez de cada barra en coordenadas globales.

$$K_e = R_e^t \cdot k_e \cdot R_e$$

Tras haber obtenido las matrices de rigidez de cada barra en coordenadas globales K_e , se ensambla la matriz de rigidez K de toda la estructura.

De la misma forma, se calculan las fuerzas de empotramiento en coordenadas locales f_e^{emp} y se pasan a coordenadas globales con la matriz de giro.

$$F_e^{emp} = R_e \cdot f_e^{emp}$$

Una vez obtenidas la matriz de rigidez K de toda la estructura y las fuerzas de empotramiento en coordenadas globales, se calcula el vector U de desplazamiento, siendo F^n las fuerzas aplicadas en cada nudo.

$$K \cdot U = F^n - F^{emp}$$

Por último, se obtienen las fuerzas de cada uno en coordenadas globales, las cuales se utilizarán para los ensayos de Modelado por Elementos Finitos (FEM).

$$S_e = K_e \cdot U_e + F_e^{emp}$$

En la siguiente tabla, quedan recogidos las fuerzas y momentos internos calculados en coordenadas globales que se utilizarán para la simulación.

Grado de Libertad	Esfuerzos [N] [Nm]
1	2943
2	2764.69
3	0
4	2943
5	2764.69
6	1100.47
7	-2943
8	-2764.69
9	567.49
10	2943
11	312.19
12	749.05
13	10781.71
14	17268.58
15	-2744.16
16	-2943
17	-312.19
18	0
19	0
20	0

Tabla 4. 1: Fuerzas y momentos en los GDL globales

4.3. Prueba estática

En esta prueba se aplicarán dos cargas a la motocicleta: una vertical descendente de 250kg aplicada en el asiento y una horizontal hacia la derecha de 300kg aplicada en el eje de la rueda delantera.

Para su resolución se ha realizado un equilibrio estático, donde se han tomado las siguientes hipótesis:

- La motocicleta es una estructura indeformable.
- No se puede superar en ningún momento el límite elástico del material.

En la siguiente figura pueden apreciarse las diferentes fuerzas:

- A_y : reacción vertical en la rueda delantera.
- B_y : reacción vertical en la rueda trasera.
- B_x : reacción horizontal en la rueda trasera.
- m : masa del conjunto moto piloto (95kg moto; 65kg piloto).
- g : gravedad (9.81 m/s^2).

La posición del centro de gravedad (CG) se calcula en función de la distribución de pesos. En este caso se ha decidido realizar la prueba estática teniendo en cuenta el piloto.

Debido a esto, el reparto de peso estático es de un 40% en el eje delantero y de un 60% en el eje trasero, por lo que el CG estará a una distancia del 40% de la distancia entre ejes del eje trasero.

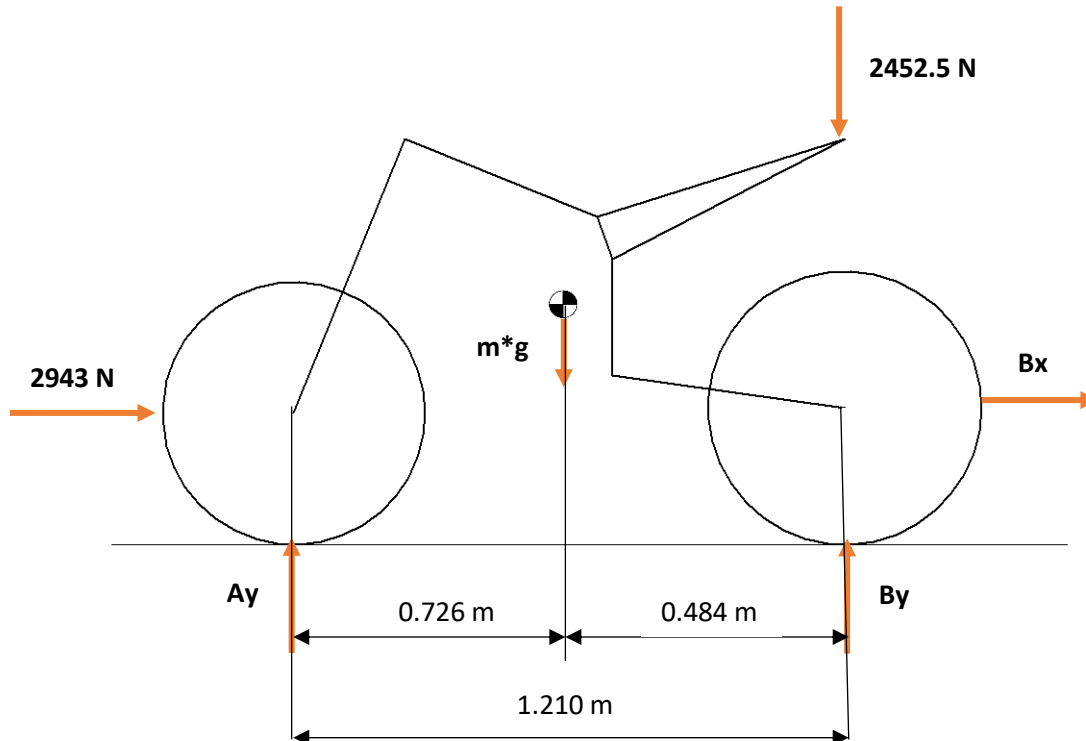


Figura 4. 4: Fuerzas prueba estática

$$\sum F_x = 0; \quad 2943 + B_y = 0$$

$$\sum F_y = 0; \quad A_y + B_y = 4022.1$$

$$\sum M_A = 0; \quad 1569.6 * 0.726 - B_y * 1.210 + 2452.5 * 1.210 + B_x * \frac{0.6}{2} + 2943 * \frac{0.576}{2} = 0$$

Los resultados obtenidos son: $A_y = 657.027 \text{ N}$ $B_y = 3365.07 \text{ N}$ $B_x = -2943 \text{ N}$

Además, para la prueba estática habrá de tener en cuenta la fuerza ejercida por la suspensión trasera.

Suponiendo un muelle de constante elástica 95 N/mm y carrera 65 mm:

$$F_{muelle} = k * x = 95 * 65 = 6175 \text{ N}$$

4.4. Paso por curva

Para la prueba de paso por curva se utilizarán los datos obtenidos por Giuseppe Polucci en su tesis doctoral “Dimensionamento di un telaio di motocicletta: Modello di simulazione e risultati de càcolo”.

Consiste en una hipótesis de pasar por una curva de radio 60 m a una velocidad de 100 km/h.



Figura 4. 5: Paso por curva²⁶

No existen ni fuerzas de aceleración ni de frenada, ya que se considera que no hay deslizamiento de los neumáticos sobre el asfalto y la velocidad es constante.

El esfuerzo se traduce en un momento en la pipa de dirección de 128.31 Nm, en dirección horizontal.

²⁶ <http://www.marca.com/motor/motogp/gp-aragon/2016/09/23/57e4ede6468aeb0a1c8b45ba.html>

4.5. Paso por obstáculo

Para la prueba de paso por obstáculo se utilizarán los datos obtenidos por Giuseppe Polucci en su tesis doctoral “Dimensionamento di un telaio di motocicletta: Modello di simulazione e risultati di calcolo”.

Consiste en una hipótesis en la que la motocicleta se encuentre con un obstáculo de 0.1m de altura a una velocidad de 50 km/h.



Figura 4. 6: Paso por obstáculo (piano)²⁷

El esfuerzo se traduce en una fuerza en la dirección del eje pipa de dirección de 6579.8 N, en sentido ascendente.

²⁷ <https://ssimplementemotos.blogspot.com/2016/06/>

4.6. Frenada máxima

Para la prueba de frenada máxima se utilizarán los datos obtenidos por Giuseppe Polucci en su tesis doctoral “Dimensionamento di un telaio di motocicletta: Modello di simulazione e risultati de càcolo”.

Ésta es la situación más desfavorable que puede darse, puesto que es la más repetida a lo largo de la carrera en el circuito.



Figura 4. 7: Frenada máxima (entrada en curva)²⁸

Para su cálculo se ha supuesto que solo se utiliza el freno delantero, ya que si se utiliza también el freno trasero, las fuerzas sobre la pipa de dirección disminuirían. Por esto, se decide utilizar esta hipótesis para ponernos del lado de la seguridad.

El esfuerzo se traduce en un momento en la pipa de dirección de 1198.9 Nm, en dirección del eje de la rueda.

²⁸ <https://www.youtube.com/watch?v=vZTS7foJQf8>

4.7. Resultados

Chasis recto

Ensayo matricial (cálculo matricial)

Deformación total

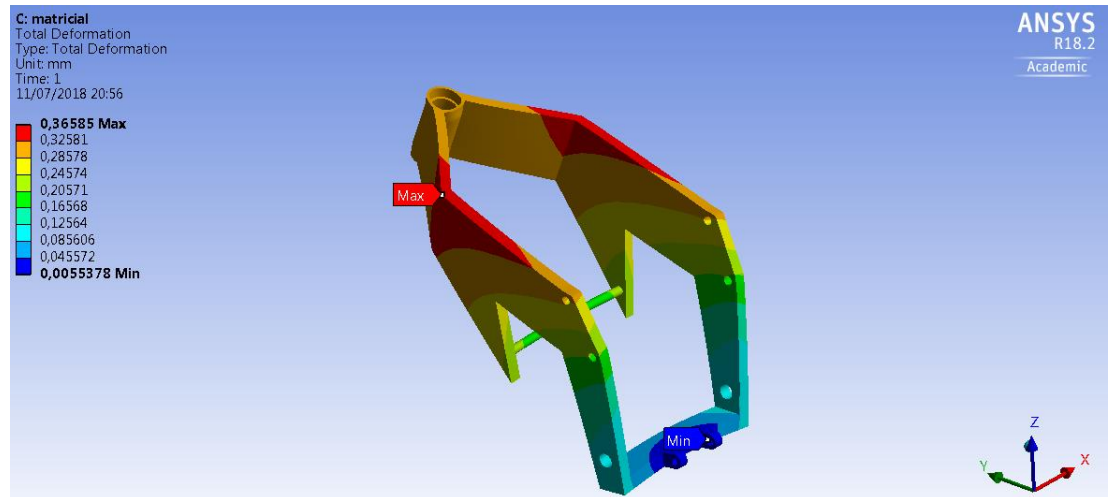


Figura 4. 8: Deformación total (chasis recto - ensayo matricial)

Tensión Equivalente (Von Mises)

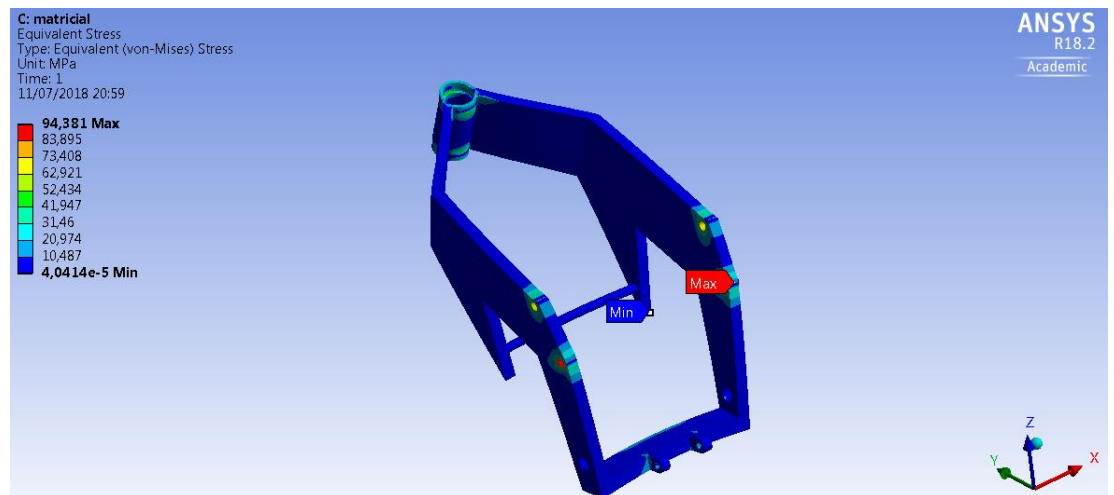


Figura 4. 9: Tensión Equivalente Von Mises (chasis recto - ensayo matricial)

Optimización Topológica



Figura 4. 10: Optimización Topológica (chasis recto - ensayo matricial)

Prueba estática

Deformación total

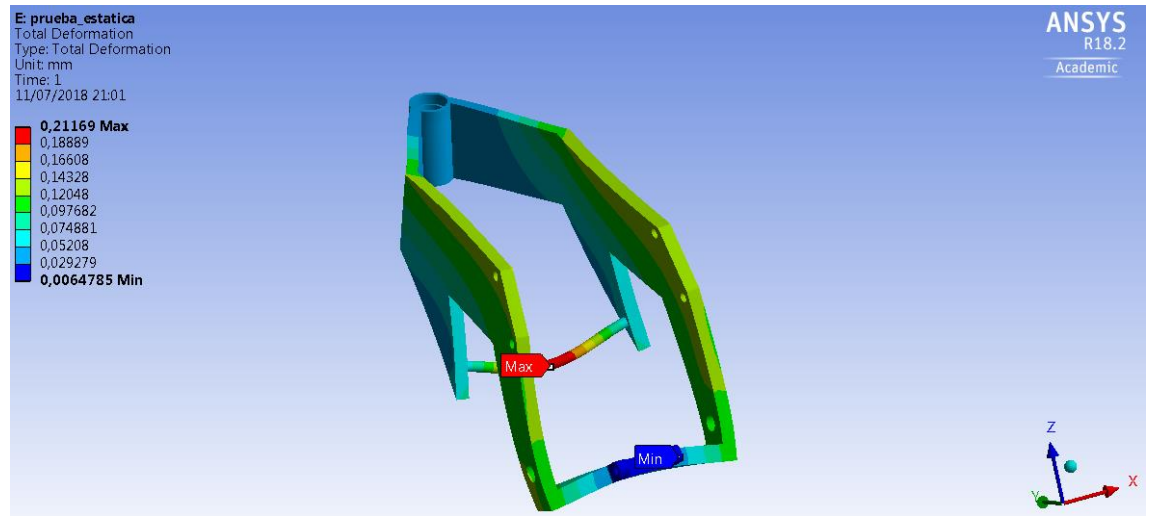


Figura 4. 11: Deformación total (chasis recto - prueba estática)

Tensión Equivalente (Von Mises)

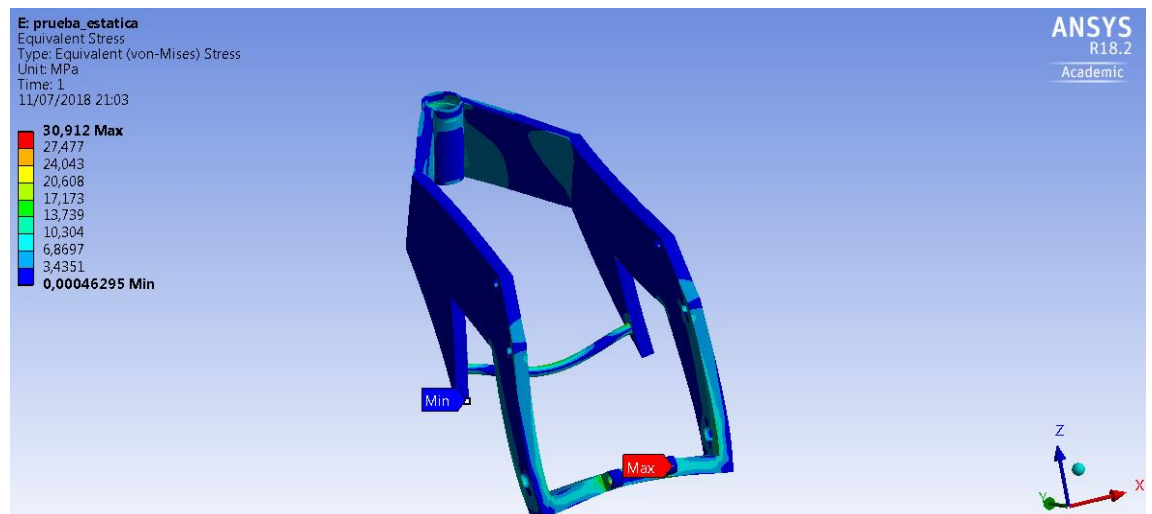


Figura 4. 12: Tensión Equivalente Von Mises (chasis recto - prueba estática)

Optimización topológica

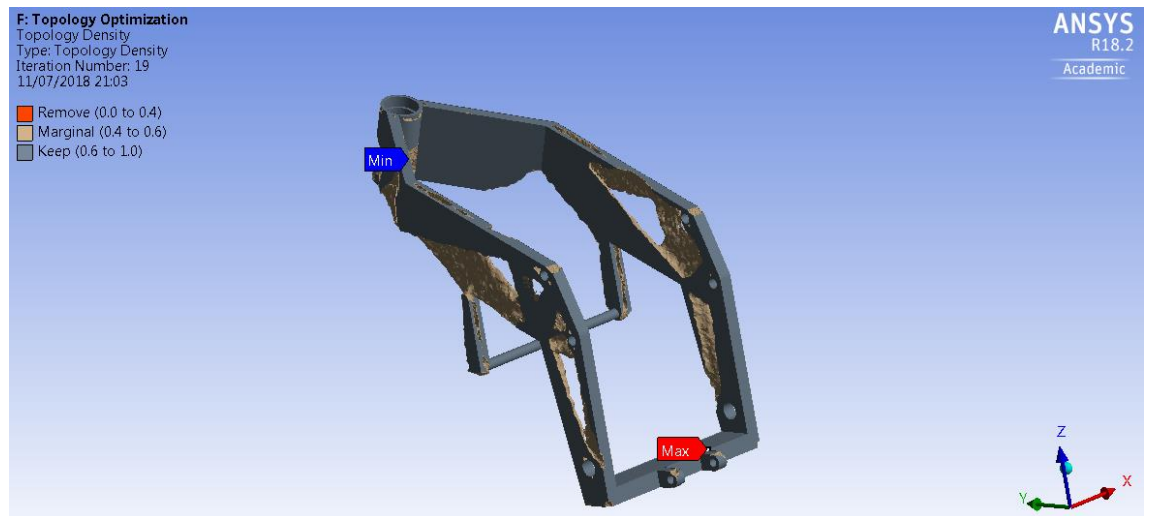


Figura 4. 13: Optimización Topológica (chasis recto - prueba estática)

Paso por curva

Deformación total

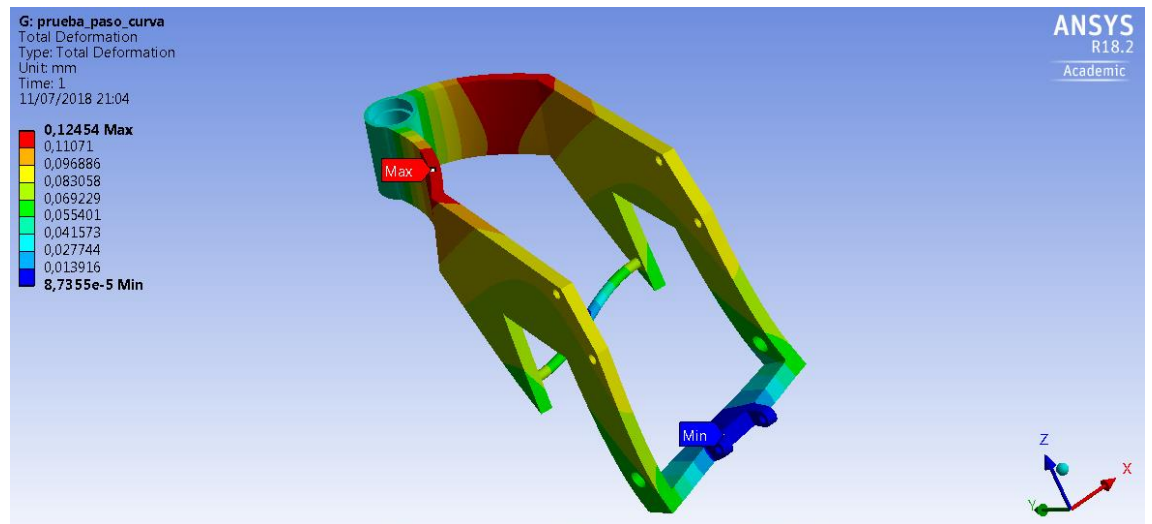


Figura 4. 14: Deformación total (chasis recto - paso por curva)

Tensión Equivalente (Von Mises)

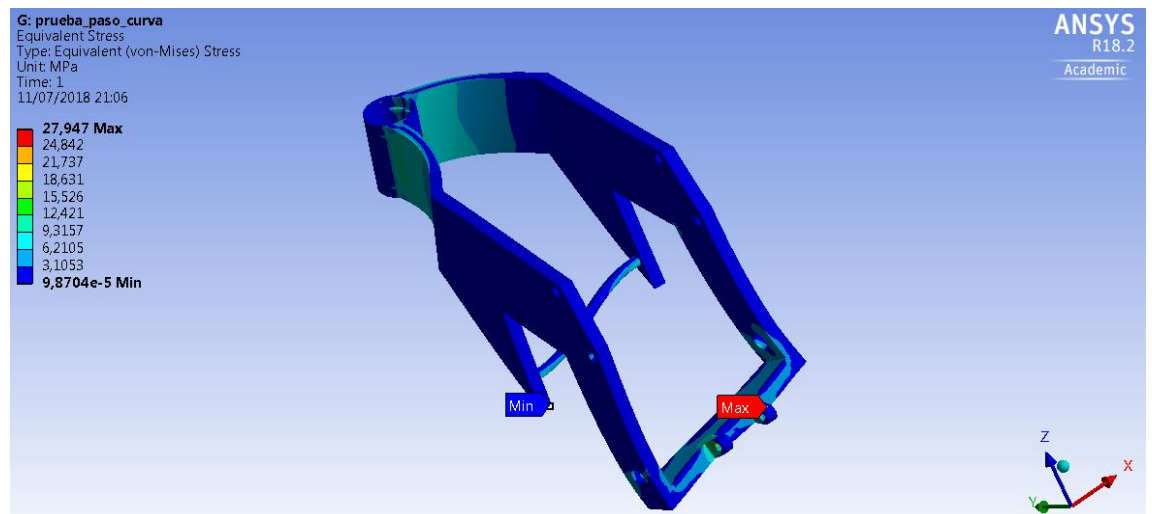


Figura 4. 15: Tensión Equivalente Von Mises (chasis recto - paso por curva)

Optimización Topológica

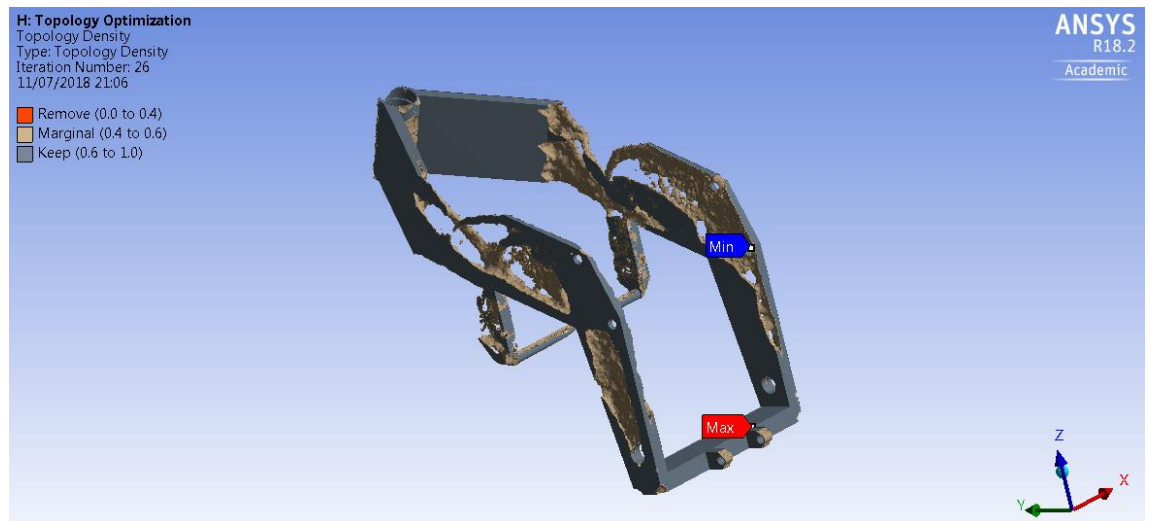


Figura 4. 16: Optimización Topológica (chasis recto - paso por curva)

Paso por obstáculo

Deformación total

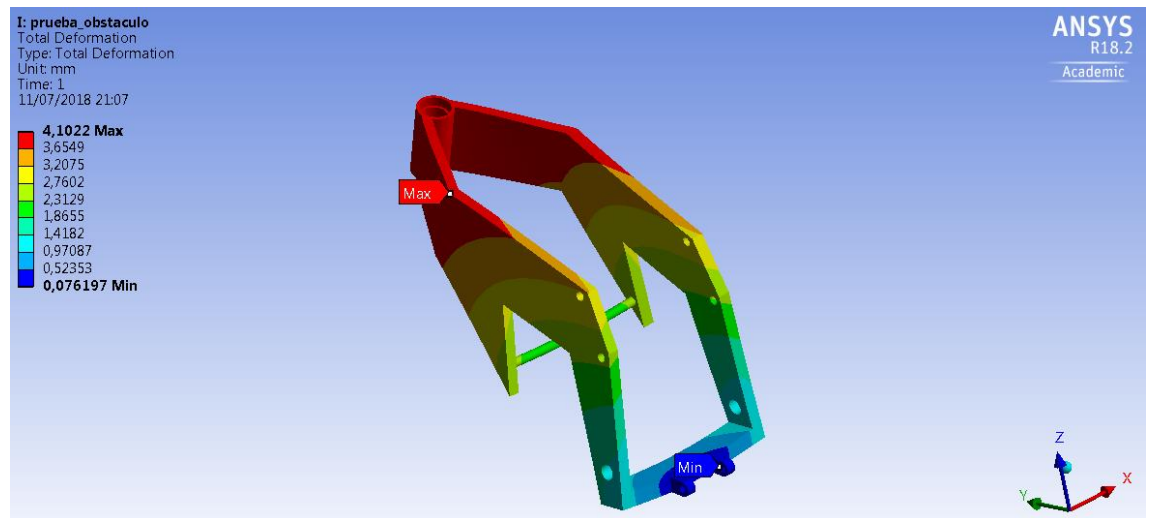


Figura 4. 17: Deformación total (chasis recto - paso por obstáculo)

Tensión Equivalente (Von Mises)

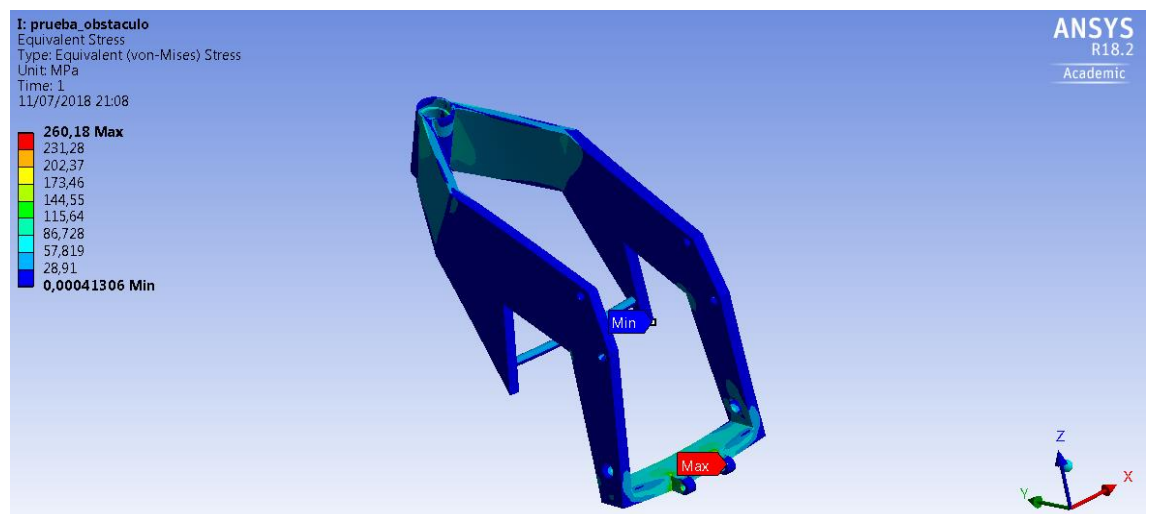


Figura 4. 18: Tensión Equivalente Von Mises (chasis recto - paso por obstáculo)

Optimización Topológica

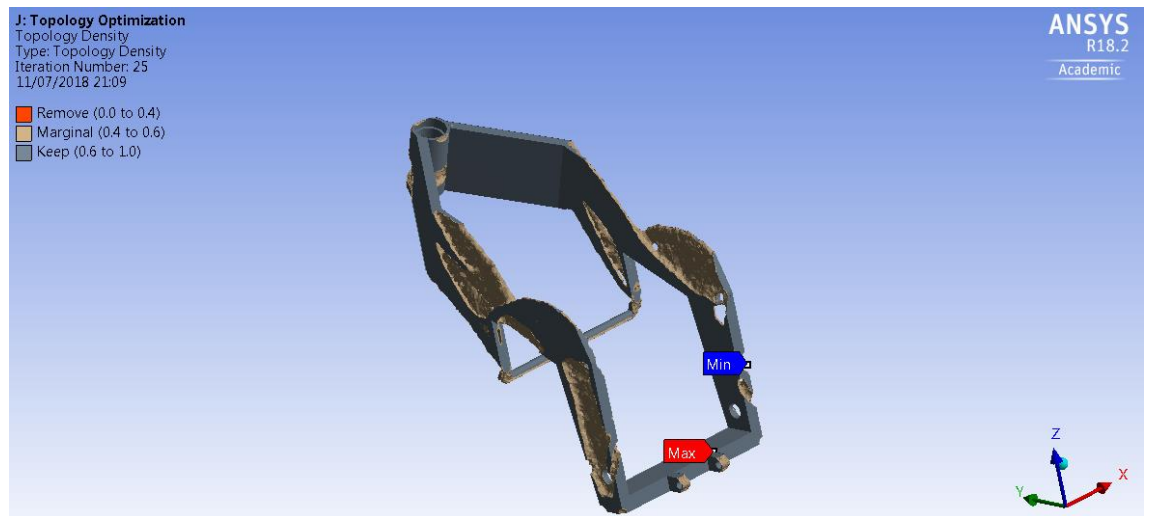


Figura 4. 19: Optimización Topológica (chasis recto - paso por obstáculo)

Frenada máxima

Deformación total

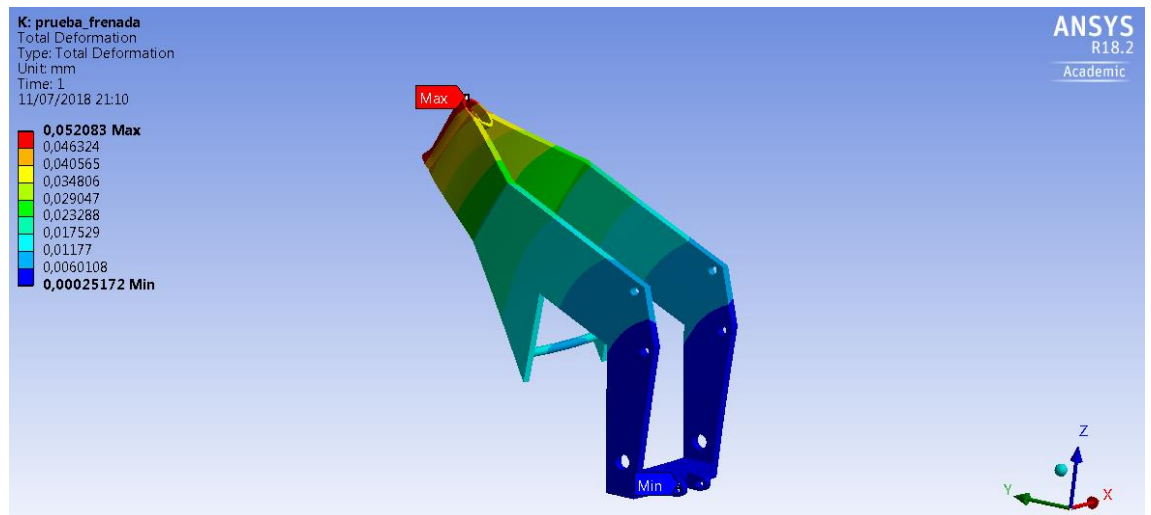


Figura 4. 20: Deformación total (chasis recto - frenada máxima)

Tensión Equivalente (Von Mises)

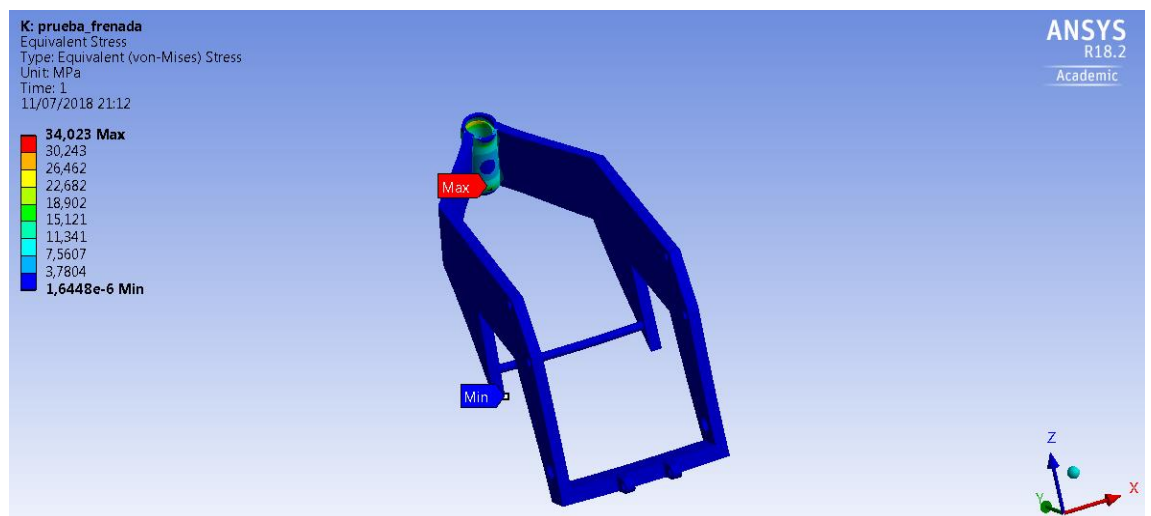


Figura 4. 21: Tensión Equivalente Von Mises (chasis recto - frenada máxima)

Optimización Topológica

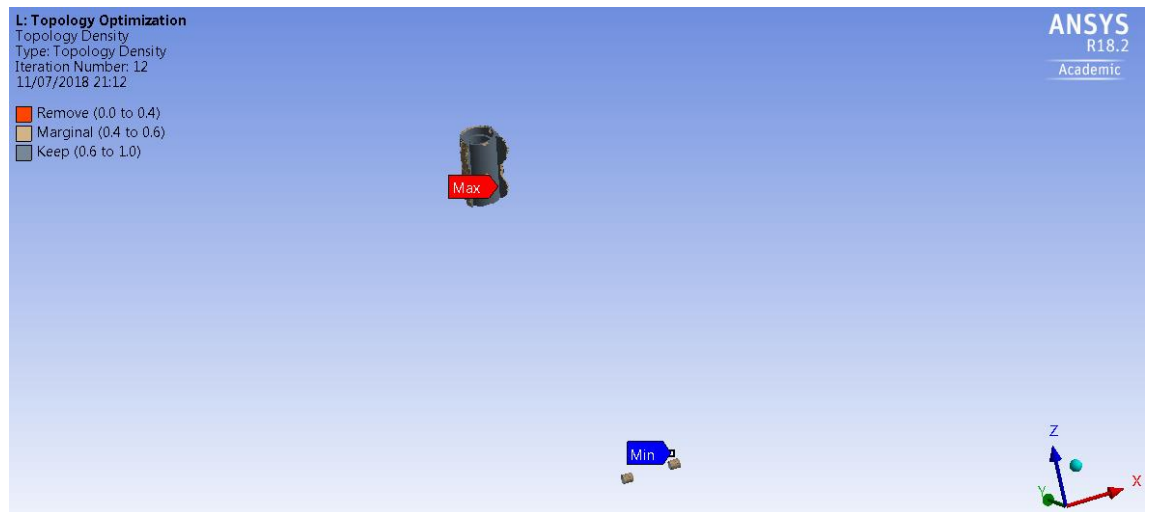


Figura 4. 22: Optimización Topológica (chasis recto - frenada máxima)

Resumen de los resultados:

		max	min
Matricial	Total Deformation [mm]	0,36585	0,0055378
	Equivalent Stress [MPa]	94,381	4,04E-05

		max	min
Estático	Total Deformation [mm]	0,21169	0,0064785
	Equivalent Stress [MPa]	30,912	0,00046295

		max	min
Paso por curva	Total Deformation [mm]	0,12454	8,74E-05
	Equivalent Stress [MPa]	27,947	9,87E-05

		max	min
Paso por obstáculo	Total Deformation [mm]	4,1022	0,076197
	Equivalent Stress [MPa]	260,18	0,00041306

		max	min
Frenada máxima	Total Deformation [mm]	0,052083	0,00025172
	Equivalent Stress [MPa]	34,023	1,64E-06

Tabla 4. 2: Resultados chasis recto

Chasis curvo

Ensayo matricial (cálculo matricial)

Deformación total

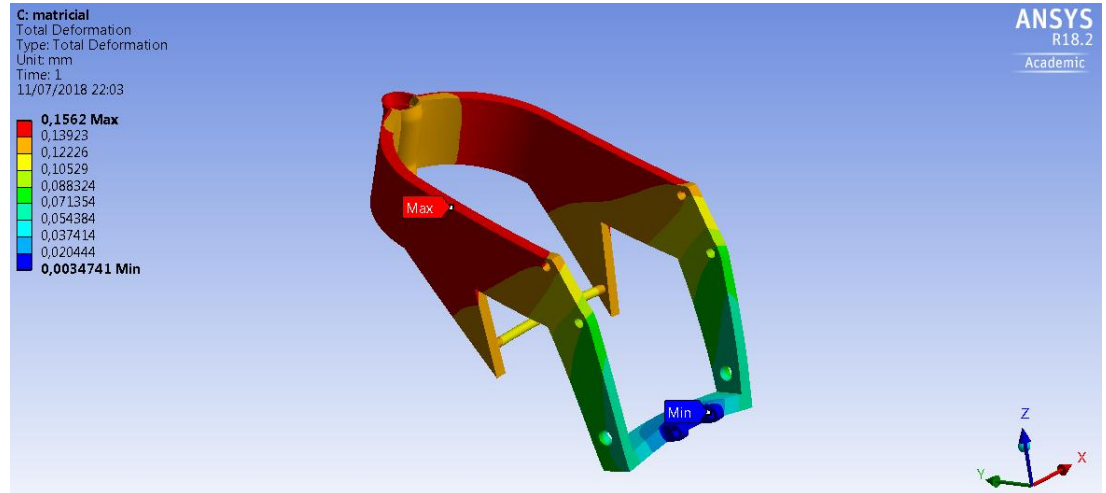


Figura 4. 23: Deformación total (chasis curvo - ensayo matricial)

Tensión Equivalente (Von Mises)

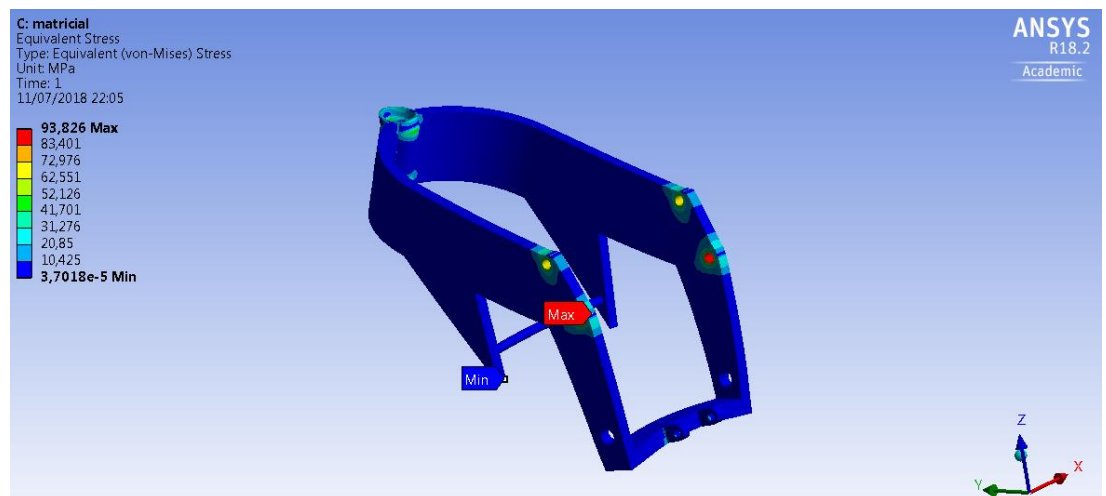


Figura 4. 24: Tensión Equivalente Von Mises (chasis curvo - ensayo matricial)

Optimización Topológica

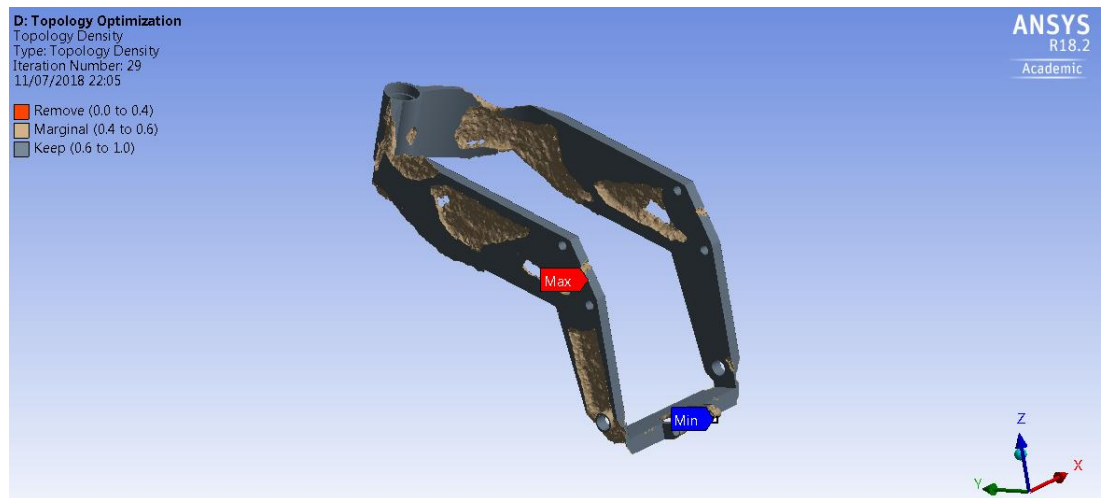


Figura 4. 25: Optimización Topológica (chasis curvo - ensayo matricial)

Prueba estática

Deformación total

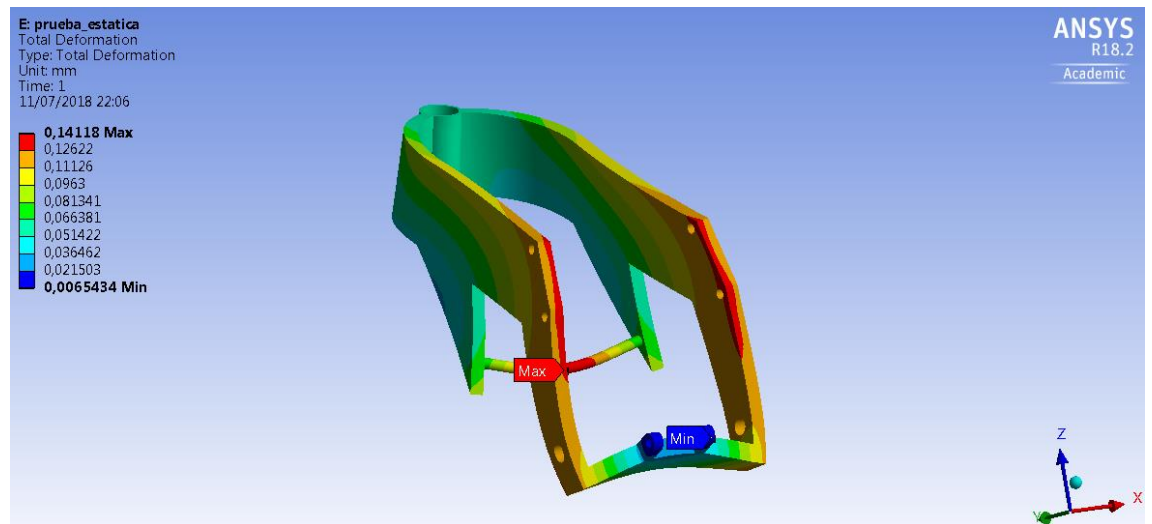


Figura 4. 26: Deformación total (chasis curvo - prueba estática)

Tensión Equivalente (Von Mises)

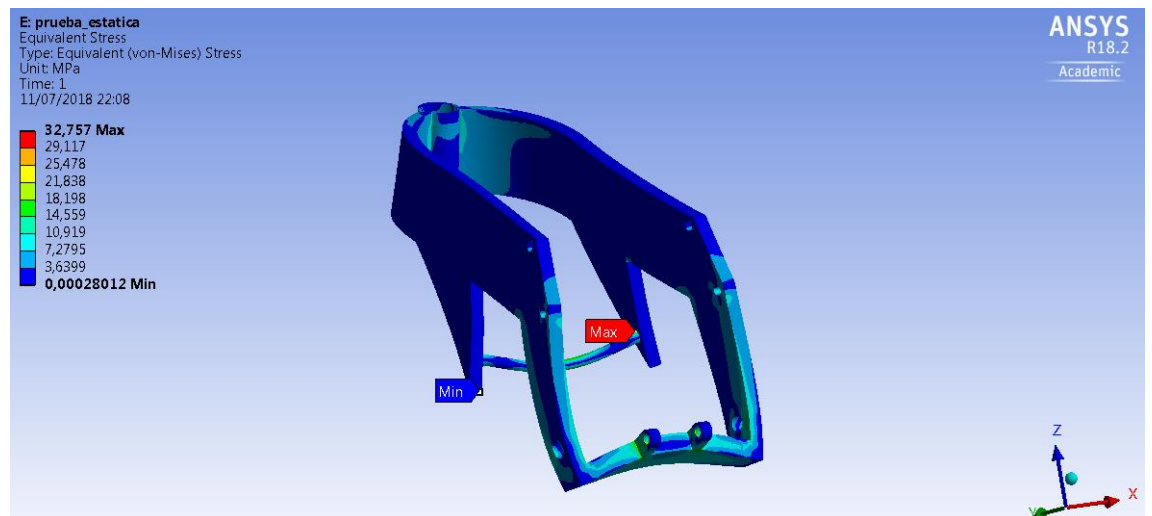


Figura 4. 27: Tensión Equivalente Von Mises (chasis curvo - prueba estática)

Optimización topológica



Figura 4. 28: Optimización Topológica (chasis curvo - prueba estática)

Paso por curva

Deformación total

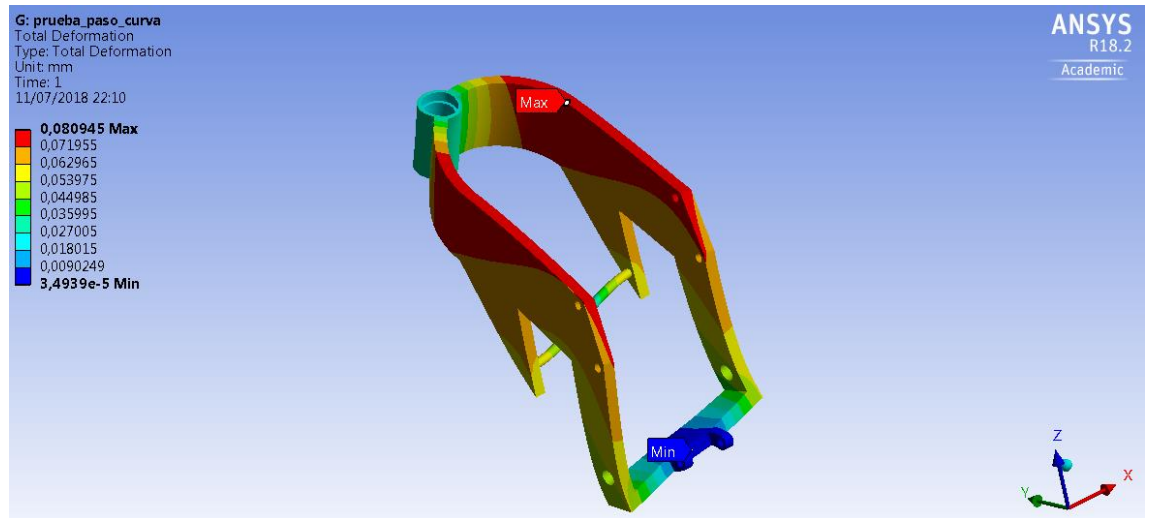


Figura 4. 29: Deformación total (chasis curvo - paso por curva)

Tensión Equivalente (Von Mises)

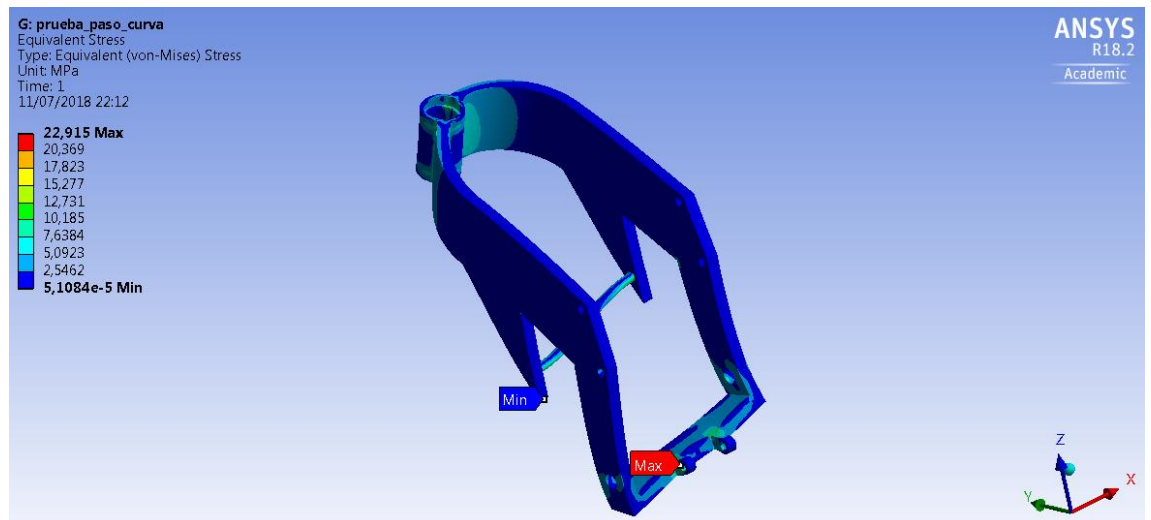


Figura 4. 30: Tensión Equivalente Von Mises (chasis curvo - paso por curva)

Optimización Topológica

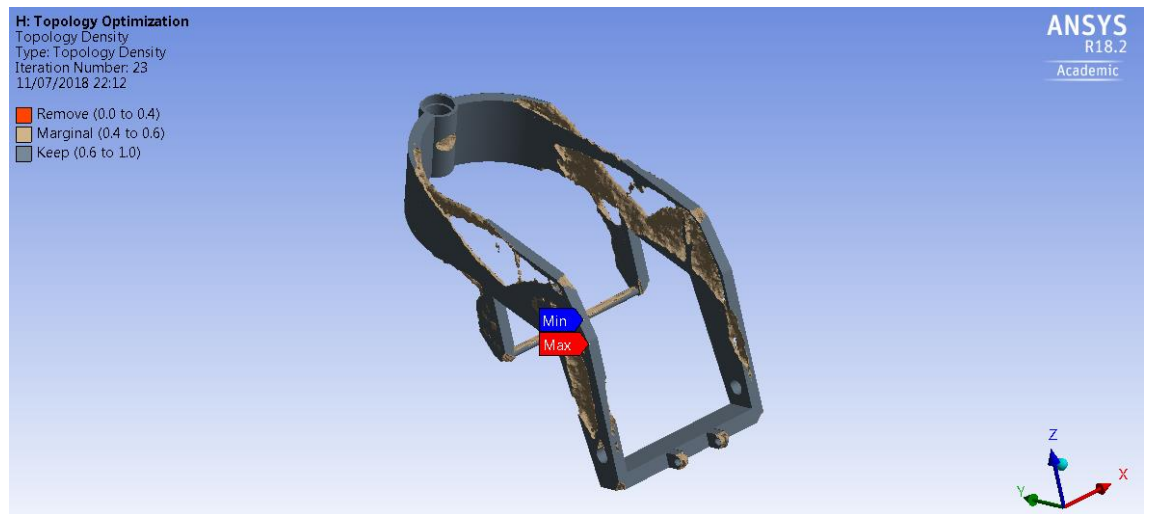


Figura 4. 31: Optimización Topológica (chasis curvo - paso por curva)

Paso por obstáculo

Deformación total

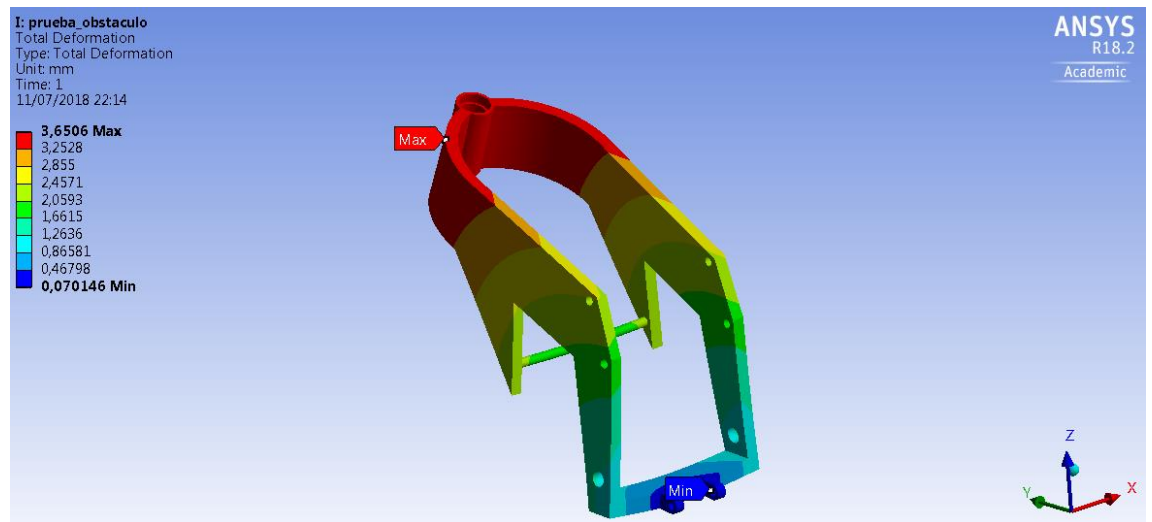


Figura 4. 32: Deformación total (chasis curvo - paso por obstáculo)

Tensión Equivalente (Von Mises)

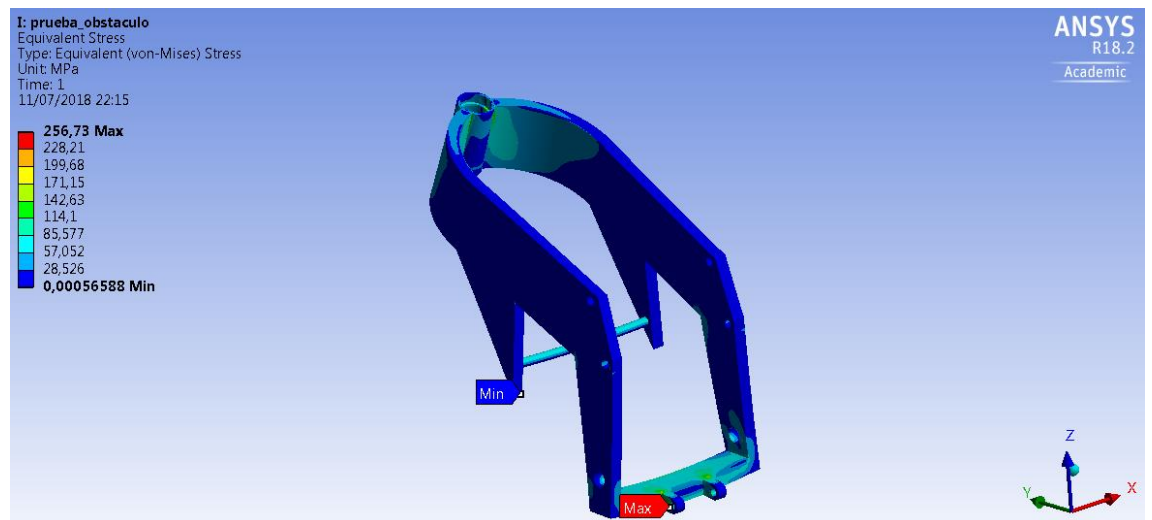


Figura 4. 33: Tensión Equivalente Von Mises (chasis curvo - paso por obstáculo)

Optimización Topológica

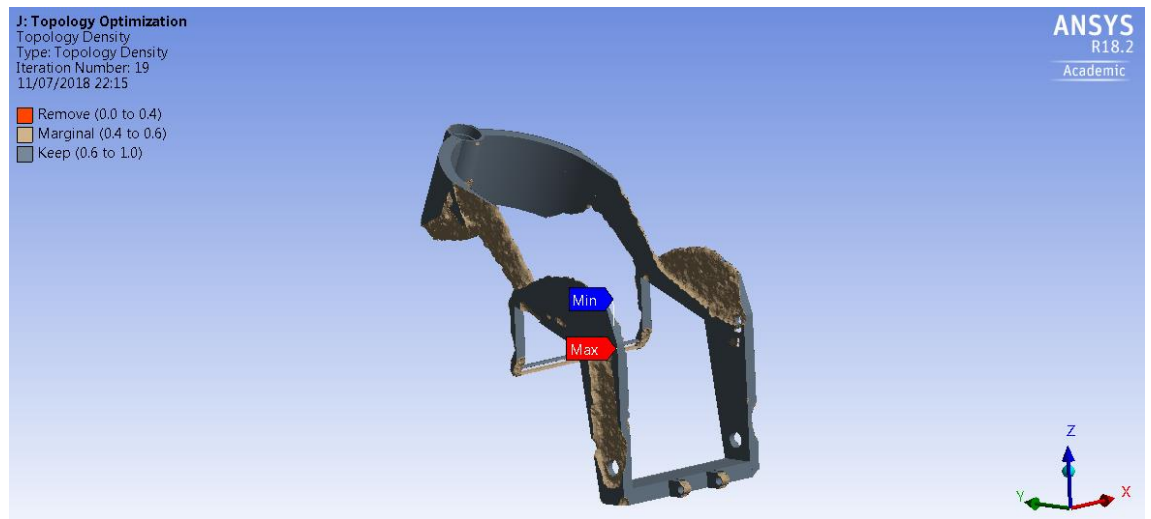


Figura 4. 34: Optimización Topológica (chasis curvo - paso por obstáculo)

Frenada máxima

Deformación total

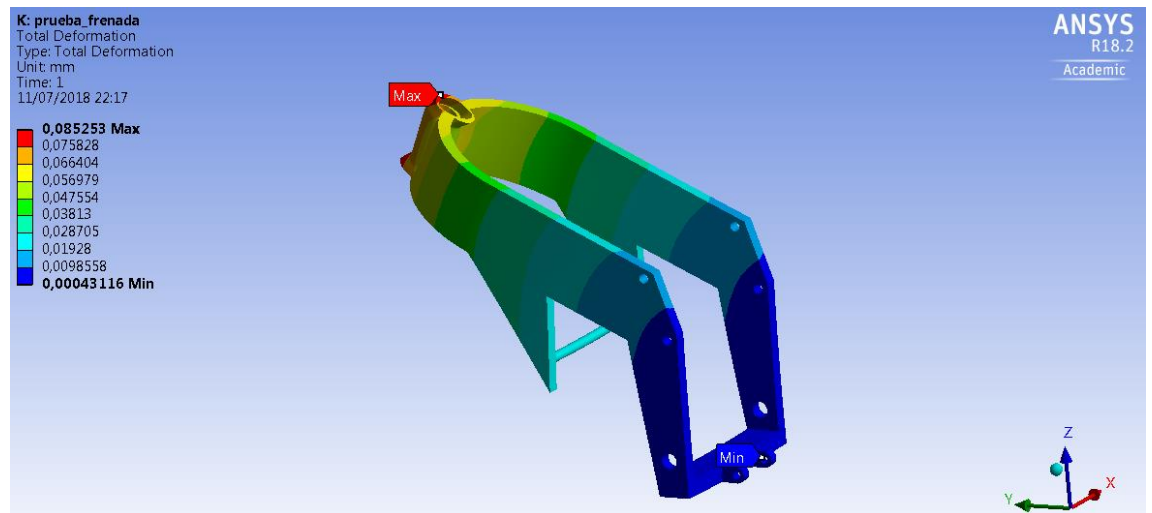


Figura 4. 35: Deformación total (chasis curvo - frenada máxima)

Tensión Equivalente (Von Mises)

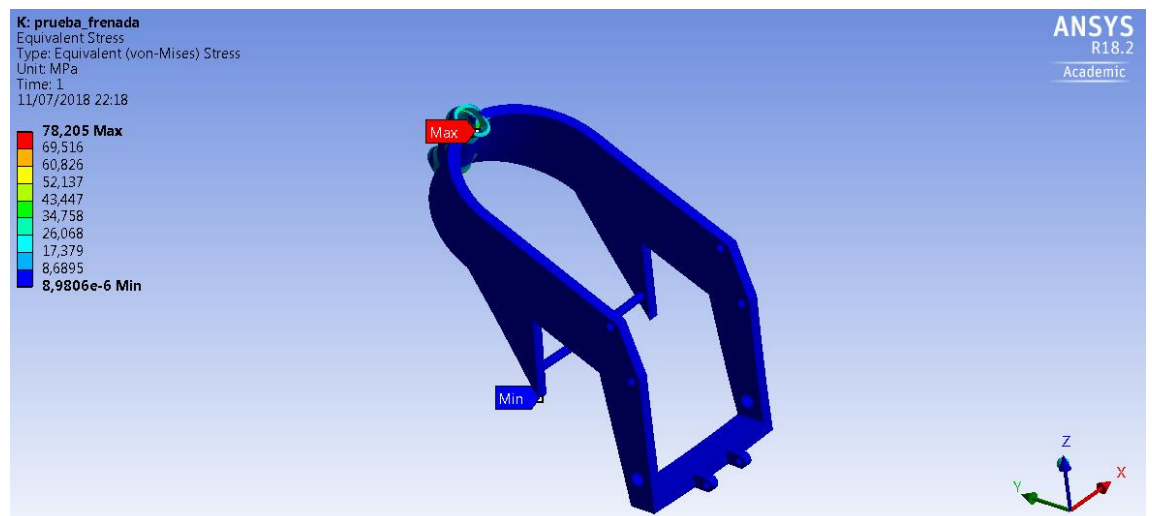


Figura 4. 36: Tensión Equivalente Von Mises (chasis curvo - frenada máxima)

Optimización Topológica

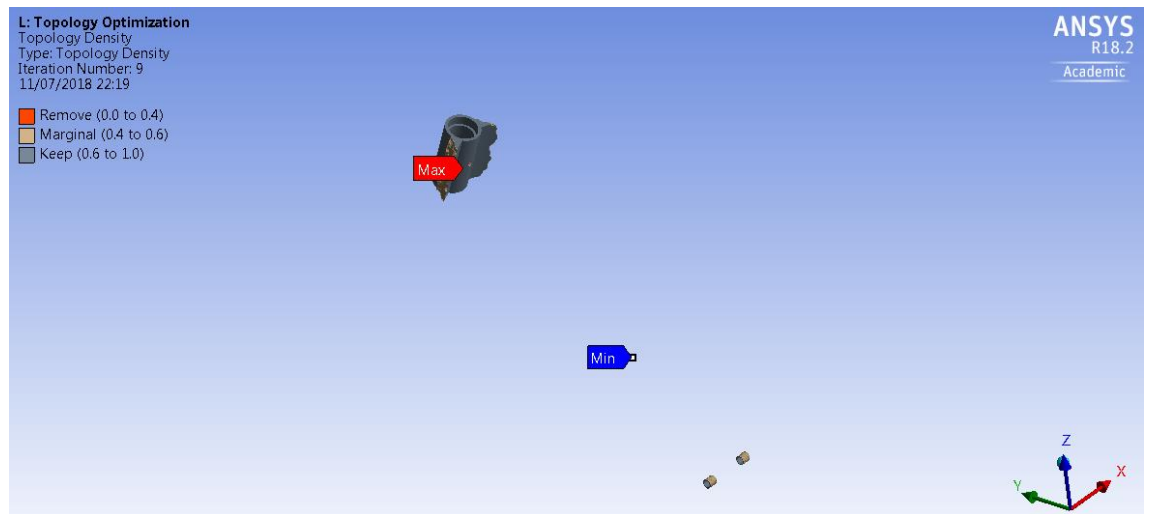


Figura 4. 37: Optimización Topológica (chasis curvo - frenada máxima)

Resumen de los resultados:

		max	min
Matricial	Total Deformation [mm]	0,1562	0,0034741
	Equivalent Stress [MPa]	93,826	3,70E-05

		max	min
Estático	Total Deformation [mm]	0,14118	0,0065434
	Equivalent Stress [MPa]	32,757	0,00028012

		max	min
Paso por curva	Total Deformation [mm]	0,080945	3,49E-05
	Equivalent Stress [MPa]	22,915	5,11E-05

		max	min
Paso por obstáculo	Total Deformation [mm]	3,6506	0,070146
	Equivalent Stress [MPa]	256,73	0,00056588

		max	min
Frenada máxima	Total Deformation [mm]	0,085253	0,00043116
	Equivalent Stress [MPa]	78,205	8,98E-06

Tabla 4. 3: Resultados chasis curva

Chasis modular

A la hora de realizar la simulación del chasis modular, su optimización no ha funcionado.

Debido a esto, se procederá a realizar sólo la simulación de éste para decidir si la geometría es válida o no. No obstante, la optimización del chasis modular podría plantearse como inicio de otro posible trabajo.

No obstante, este prototipo de chasis es una propuesta inicial del cual se ha hecho un primer análisis. Para futuros trabajos sería necesario un estudio detallado del medio de unión y las concentraciones de tensiones.

Ensayo matricial (cálculo matricial)

No ha sido posible realizar la simulación de “Ensayo matricial”.

Posiblemente se deba al método de unión entre los diferentes componentes.

Prueba estática

No ha sido posible realizar la simulación de “Prueba estática”.

Posiblemente se deba al método de unión entre los diferentes componentes.

Paso por curva

Deformación Total

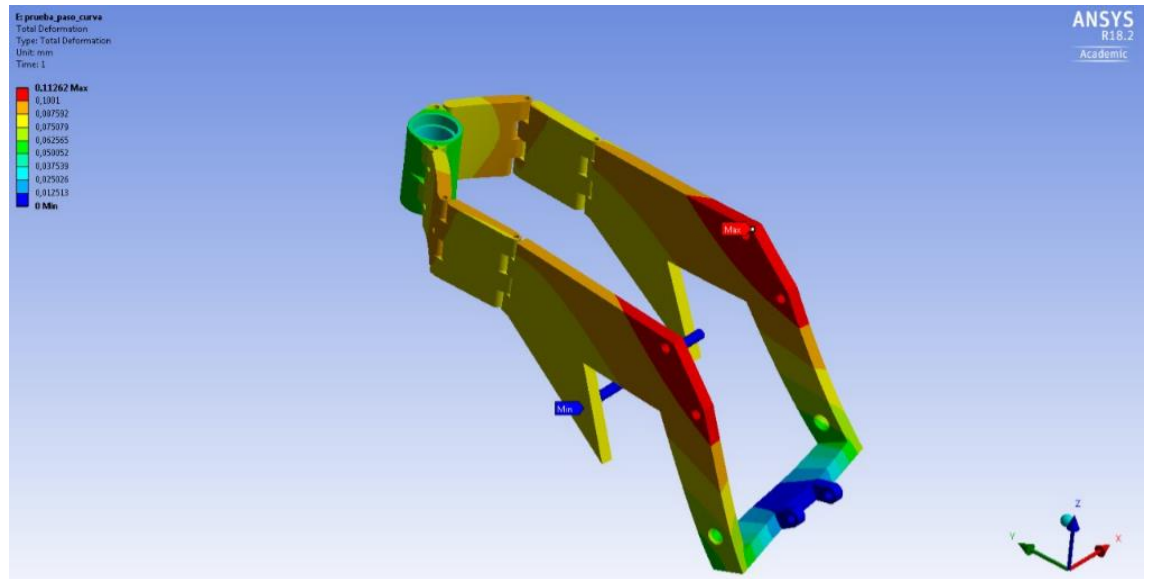


Figura 4. 38: Deformación Total (chasis modular - paso por curva)

Tensión Equivalente (Von Mises)

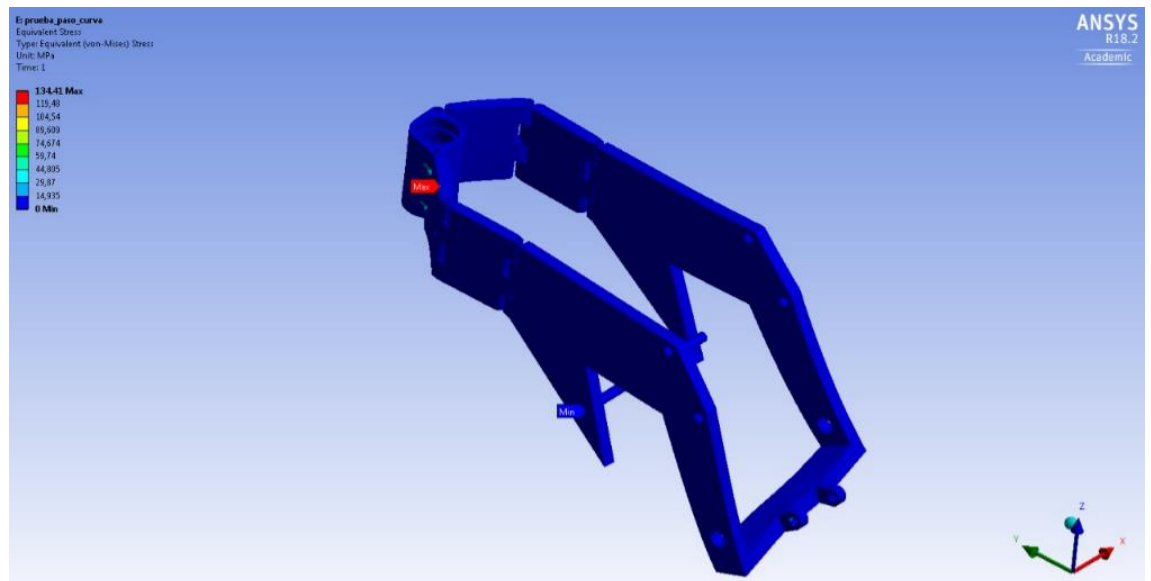


Figura 4. 39: Tensión Equivalente Von Mises (chasis modular - paso por curva)

Paso por obstáculo

Deformación Total

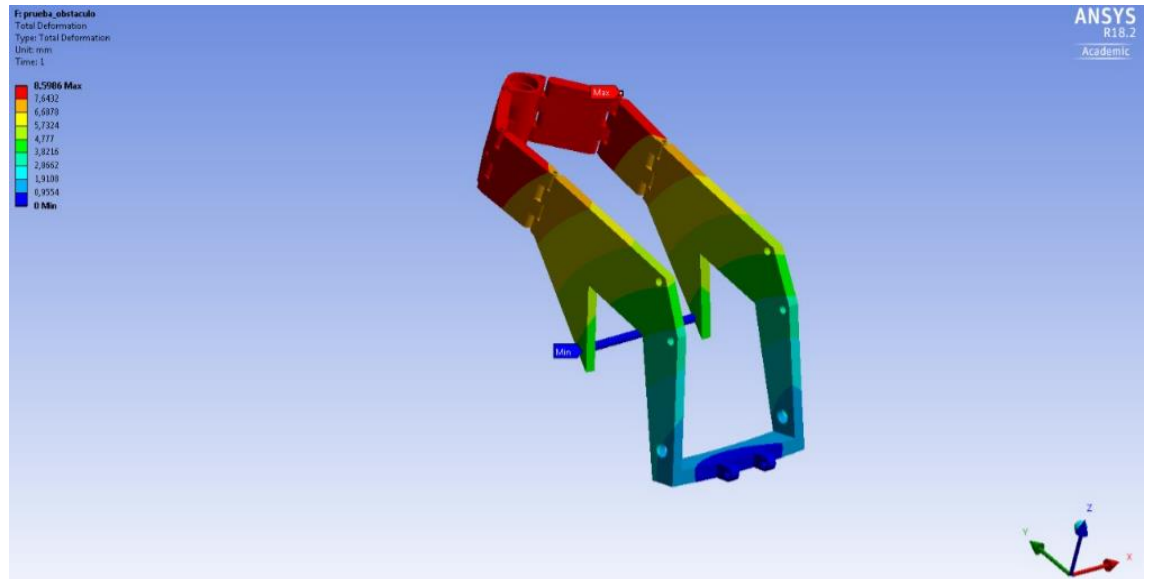


Figura 4. 40: Deformación Total (chasis modular - paso por obstáculo)

Tensión Equivalente (Von Mises)

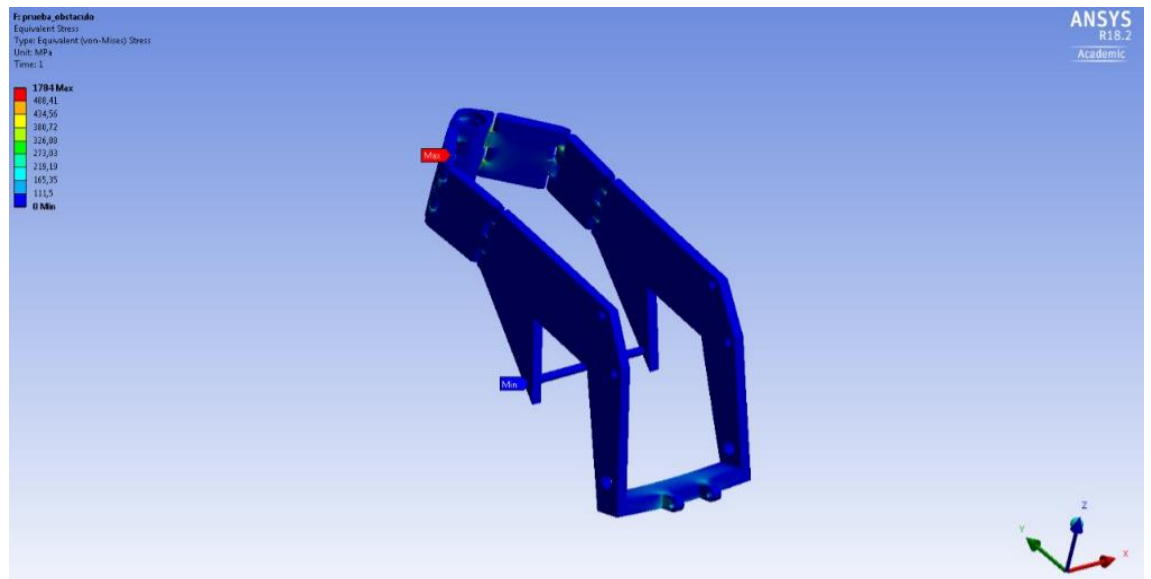
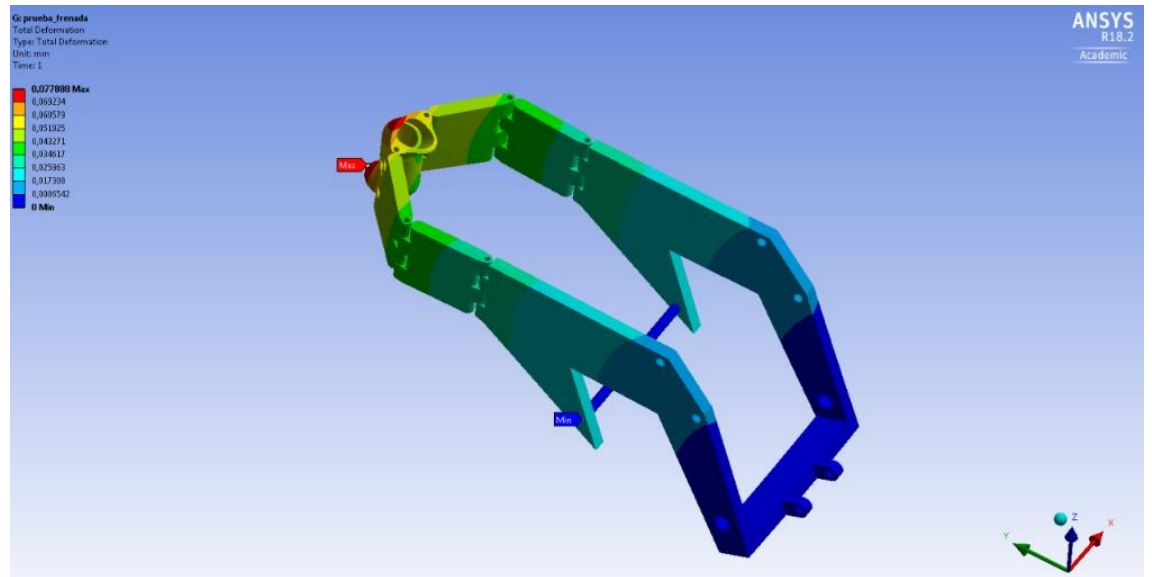


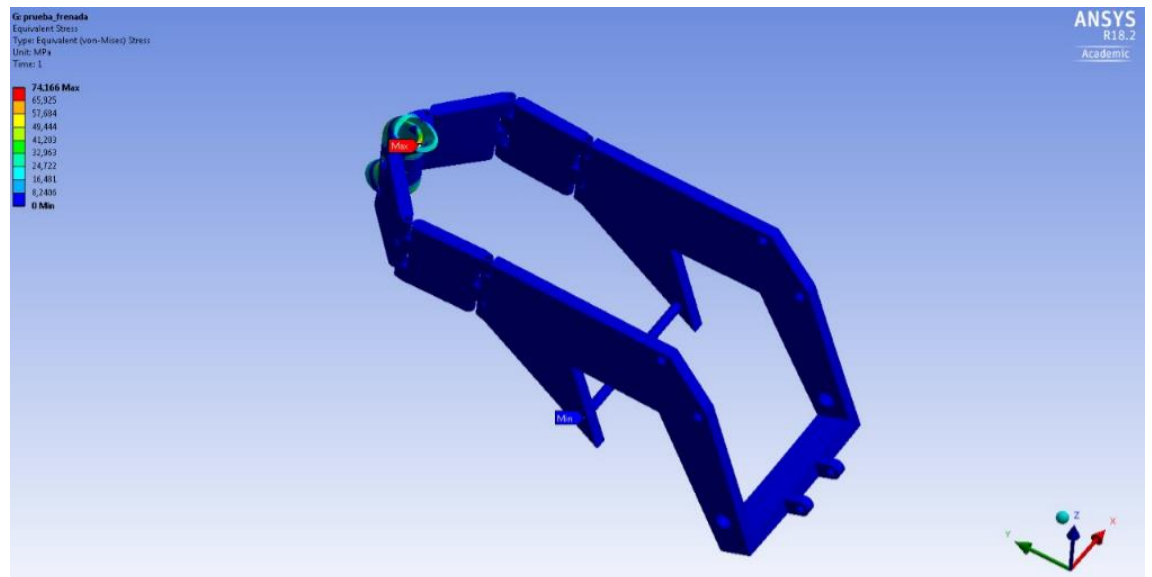
Figura 4. 41: Tensión Equivalente Von Mises (chasis modular - paso por obstáculo)

Frenada máxima

Deformación Total



Tensión Equivalente (Von Mises)



Con los resultados mostrados anteriormente, se concluye que la geometría del chasis modular en un principio sería válida, a falta un estudio detallado del medio de unión y las concentraciones de tensiones.

5. Conclusiones

A la hora de comparar el chasis recto y el chasis curvo, se tendrán en cuenta los valores máximos tanto de la Deformación Total como de la Tensión Equivalente de Von Mises de los cinco ensayos realizados.

En ambos chasis, en el ensayo de frenada máxima se obtiene una tensión equivalente de Von Mises mayor que la máxima admisible (250 MPa). No obstante, en ningún caso se supera el valor de ésta en un 5%, por lo que se toman los resultados como válidos ya que los valores obtenidos por Giuseppe Polucci en su tesis doctoral “Dimensionamento di un telaio di motocicletta: Modello di simulazione e risultati di calcolo”, son para el modelo de motocicleta Aprilia RSV1000, es decir, para una motocicleta de 1000 cc. Por ello, los resultados sacados de la tesis doctoral de Giuseppe Polucci estarían mayorados para el caso que se trata en este TFG: una motocicleta de 250 cc, ya que, al tratarse de una menor cilindrada, ésta estará sometida a esfuerzos menores.

En los resultados anteriormente mostrados se observa que la Deformación Total no supera en ningún momento los 4.5mm en ningún ensayo, por lo que se tomarán ambos chasis como válidos en cuanto a estos valores.

En los resultados anteriormente mostrados se observa que la Tensión Equivalente de Von Mises es muy parecida en los ensayos de cálculo matricial, prueba estática, paso por curva y paso por obstáculo. No obstante, la Tensión de Equivalente de Von Mises en el chasis curvo es un 56.5% mayor que en el chasis recto. Por ello, se concluye que la geometría del chasis recto es la óptima.

Para diseñar el modelo definitivo de chasis que sería óptimo para la competición de MotoStudent, se tendrán en cuenta los resultados de la Optimización Topológica obtenidos en los cinco ensayos realizados del chasis recto.

La geometría definitiva del chasis difiere de su antecesora en vaciados en la parte lateral trasera y en semi-vaciados en la parte delantera.

La geometría final del chasis sería la siguiente:

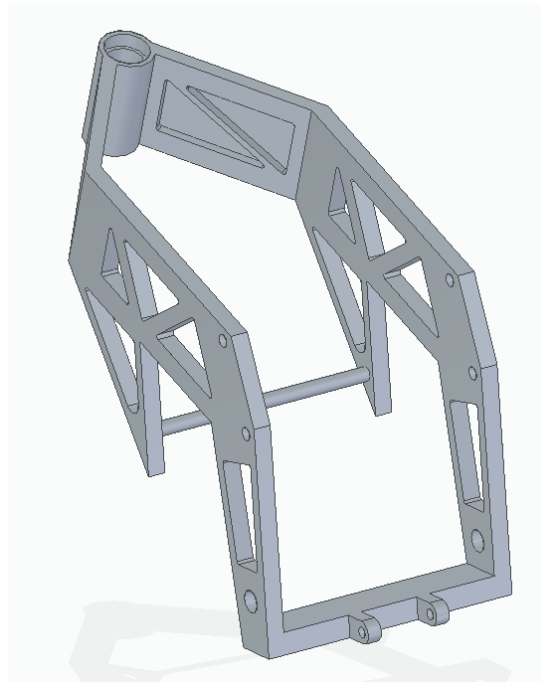


Figura 5. 1: Geometría definitiva

Gracias al uso de la Optimización Topológica se ha conseguido reducir la masa de chasis un 35%: se ha pasado de tener un chasis de 10.8 kg a un chasis de 6.96 kg.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los cinco ensayos para la geometría final del chasis.

Ensayo matricial (cálculo matricial)

Deformación Total

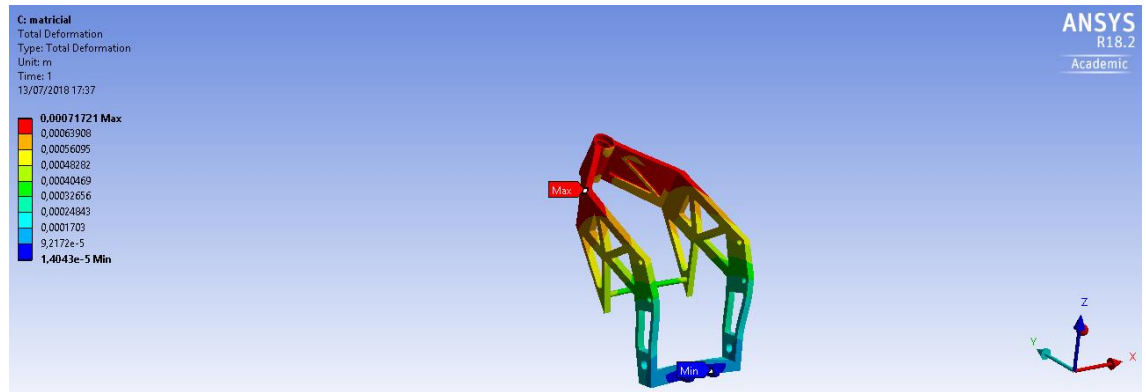


Figura 5. 2: Deformación total (chasis definitivo - ensayo matricial)

Tensión Equivalente (Von Mises)

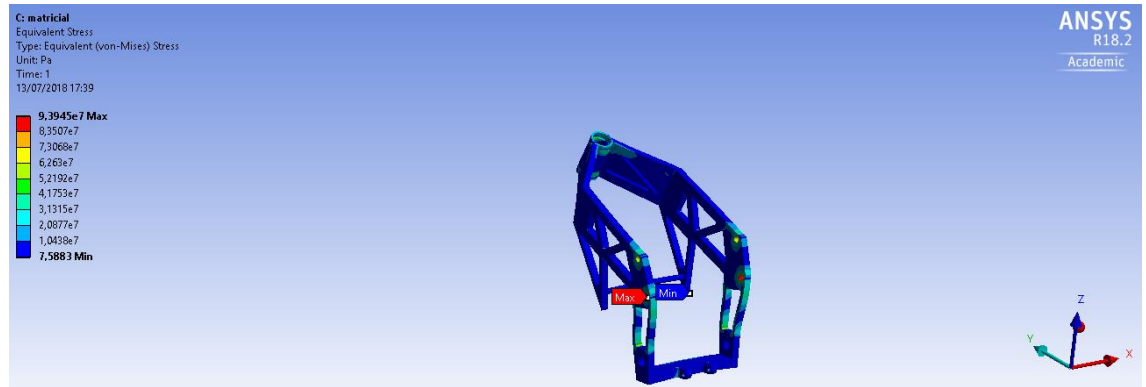


Figura 5. 3: Tensión Equivalente Von Mises (chasis definitivo - ensayo matricial)

Prueba estática

Deformación Total

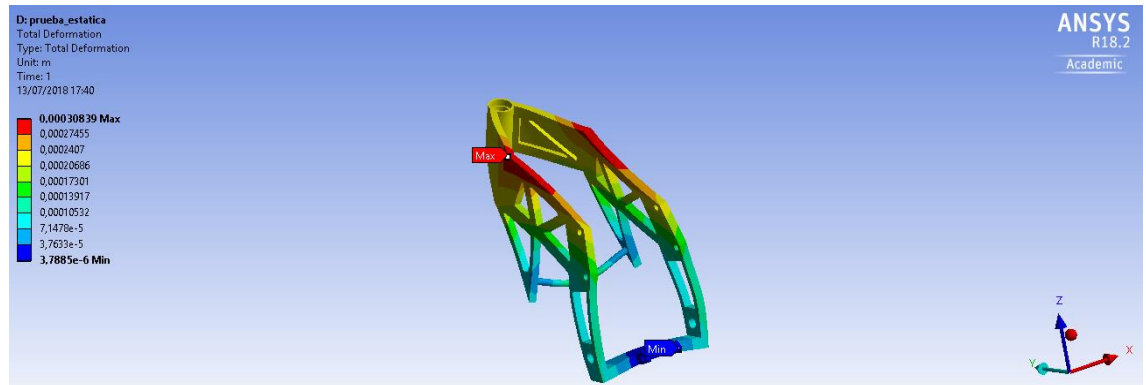


Figura 5. 4: Deformación total (chasis definitivo - prueba estática)

Tensión Equivalente (Von Mises)

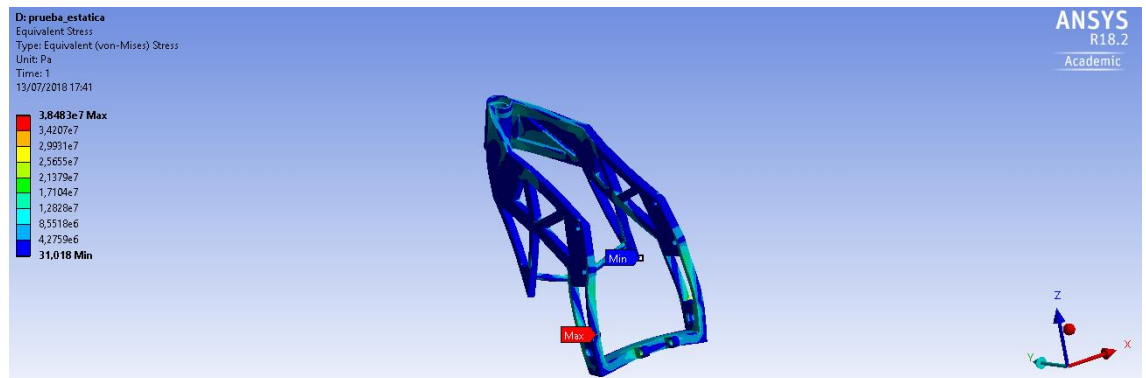


Figura 5. 5: Tensión Equivalente Von Mises (chasis definitivo - prueba estática)

Paso por curva

Deformación Total

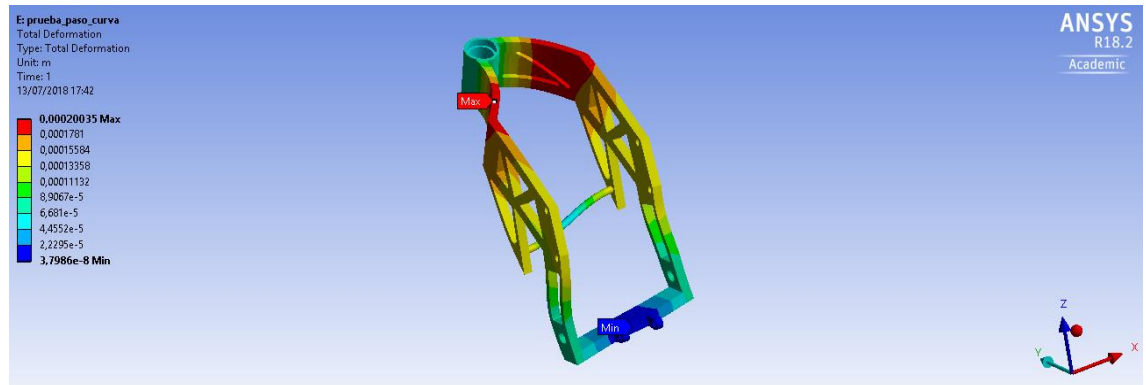


Figura 5. 6: Deformación Total (chasis definitivo - paso por curva)

Tensión Equivalente (Von Mises)

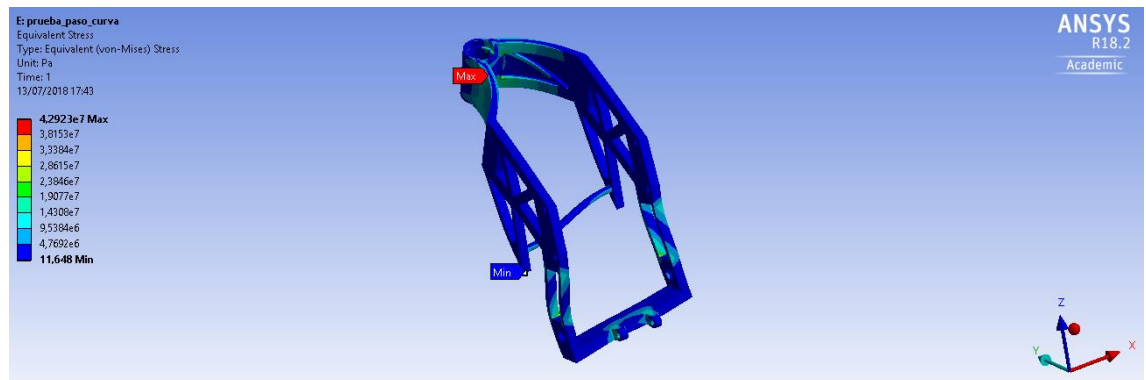


Figura 5. 7: Tensión Equivalente Von Mises (chasis definitivo - paso por curva)

Paso por obstáculo

Deformación Total

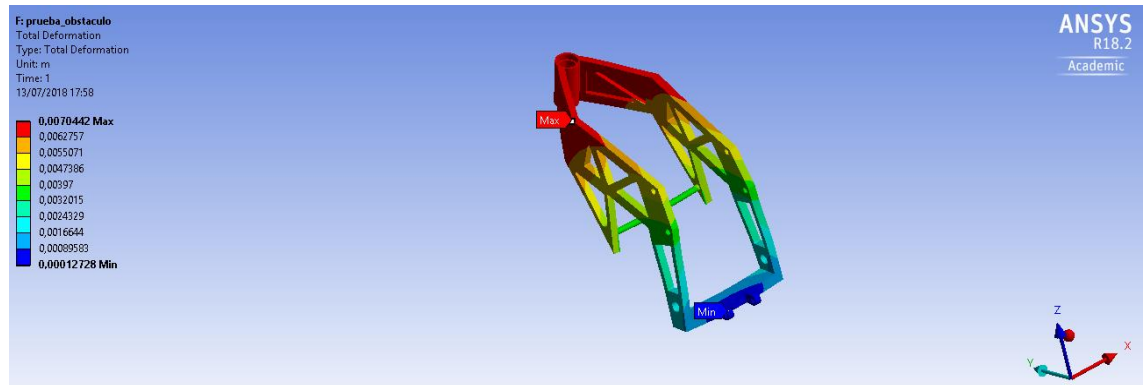


Figura 5. 8: Deformación Total (chasis definitivo - paso por obstáculo)

Tensión Equivalente (Von Mises)

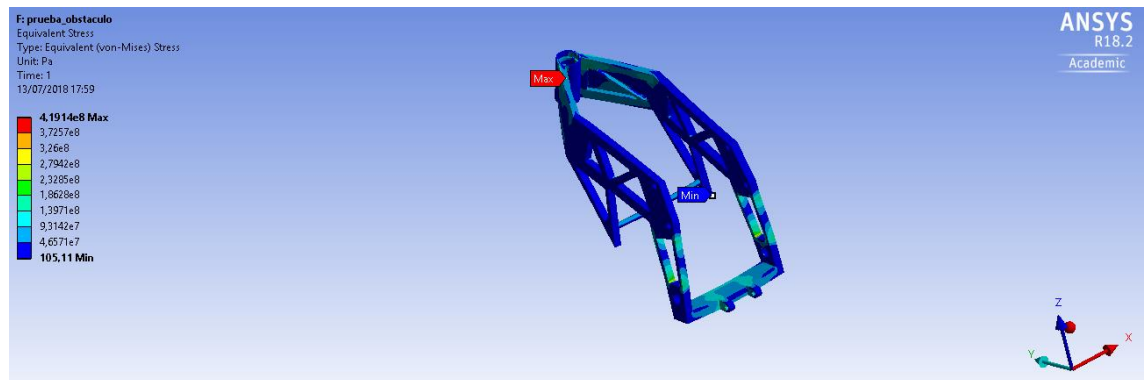


Figura 5. 9: Tensión Equivalente Von Mises (chasis definitivo - paso por obstáculo)

Frenada máxima

Deformación Total

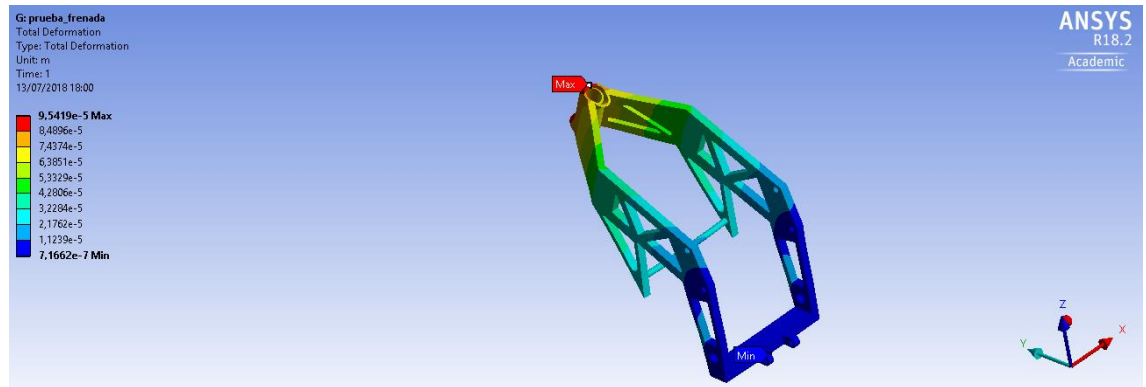


Figura 5. 10: Deformación total (chasis definitivo - frenada máxima)

Tensión Equivalente (Von Mises)

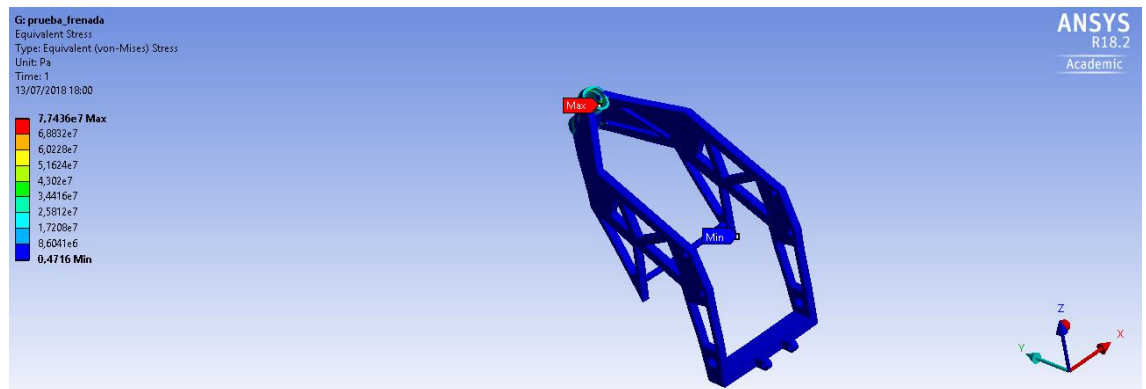


Figura 5. 11: Tensión Equivalente Von Mises (chasis definitivo - frenada máxima)

Resumen de los resultados:

		max	min
Matricial	Total Deformation [mm]	0,71721	1,40E-03
	Equivalent Stress [MPa]	93,945	7,59E-06

		max	min
Estático	Total Deformation [mm]	0,30839	3,79E-09
	Equivalent Stress [MPa]	38,483	3,10E-05

		max	min
Paso por curva	Total Deformation [mm]	0,20035	3,80E-11
	Equivalent Stress [MPa]	42,923	1,16E-05

		max	min
Paso por obstáculo	Total Deformation [mm]	7,0442	0,12728
	Equivalent Stress [MPa]	419,14	1,05E-04

		max	min
Frenada máxima	Total Deformation [mm]	0,0095419	0,00071662
	Equivalent Stress [MPa]	77,436	4,72E-07

Tabla 5. 1: Resultados chasis definitivo

A la hora de verificar si el chasis es válido o no, únicamente se tendrán en cuenta los resultados de los ensayos matricial y estático. Esto es debido a que, como ya se ha mencionado anteriormente, los resultados obtenidos por Giuseppe Polucci en su tesis doctoral “Dimensionamento di un telaio di motocicletta: Modello di simulazione e risultati de calcolo”, son para el modelo de motocicleta Aprilia RSV1000, es decir, para una motocicleta de 1000 cc.

Se verifica que el chasis propuesto para la competición no supera la tensión máxima admisible ($93.945 \text{ MPa} < 250 \text{ MPa}$) y se deformará como máximo 0.72mm.

Se concluye que el chasis propuesto es válido para la competición de MotoStudent Petrol.

6. Bibliografía

- Arias Paz: Motocicletas, 32ª Edición, 2003.
- Motorcycle Handling and Chassis Design: The Art and Science, Tony Foale, 2002.
- Polucci, Giuseppe: “Dimensionamento di un telaio di motocicletta: Modello di simulazione e risultati de càcolo”, Università degli studi di Roma la Sapienza, 2005.
- Vergara, Patxi: “Modelado, análisis y simulación de un chasis de motocicleta”, Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- Reglamento de la competición de MotoStudent.

7. Apéndices

7.1. Apéndice I: Cálculo matricial

BARRA AB

A	E	I	L	α
0,00282743	700000000000	6,36173E-07	0,65	1,186823891

Matriz de rigidez local [k]

	1	2	3	4	5	6
1	304492826,4	0	0	-304492826,4	0	0
2	0	1945871,317	632408,178	0	-1945871,317	632408,178
3	0	632408,178	274043,5438	0	-632408,178	137021,7719
4	-304492826,4	0	0	304492826,4	0	0
5	0	-1945871,317	-632408,178	0	1945871,317	-632408,178
6	0	632408,178	137021,7719	0	-632408,178	274043,5438

Matriz de rotación [R]

	1	2	3	4	5	6
1	0,374606593	0,927183855	0	0	0	0
2	-0,927183855	0,374606593	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0,374606593	0,927183855	0
5	0	0	0	-0,927183855	0,374606593	0
6	0	0	0	0	0	1

BARRA BC

A	E	I	L	α
0,00152	700000000000	0,000002304	0,455	5,899212872

Matriz de rigidez local [k]

	1	2	3	4	5	6
1	295384615,4	0	0	-295384615,4	0	0
2	0	20546013,58	4674218,09	0	-20546013,58	4674218,09
3	0	4674218,09	1417846,154	0	-4674218,09	708923,0769
4	-295384615,4	0	0	295384615,4	0	0
5	0	-20546013,58	-4674218,09	0	20546013,58	-4674218,09
6	0	4674218,09	708923,0769	0	-4674218,09	1417846,154

Matriz de rotación [R]

	1	2	3	4	5	6
1	0,927183855	-0,374606593	0	0	0	0
2	0,374606593	0,927183855	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0,927183855	-0,374606593	0
5	0	0	0	0,374606593	0,927183855	0
6	0	0	0	0	0	1

Matriz de rigidez global [K]

	1	2	3	4	5	6
1	44402315,73	105083387,4	586358,6521	-44402315,73	-105083387,4	-586358,6521
2	105083387,4	262036382	236904,2732	-105083387,4	-262036382	236904,2732
3	-586358,6521	236904,2732	274043,5438	586358,6521	-236904,2732	137021,7719
4	-44402315,73	-105083387,4	586358,6521	44402315,73	105083387,4	586358,6521
5	-105083387,4	-262036382	-236904,2732	105083387,4	262036382	-236904,2732
6	-586358,6521	236904,2732	137021,7719	586358,6521	-236904,2732	274043,5438

Matriz de rigidez global [K]

	1	2	3	4	5	6
1	256816487	-95459467,63	1750992,915	-256816487	95459467,63	1750992,915
2	-95459467,63	59114142,01	433859,545	95459467,63	-59114142,01	433859,545
3	1750992,915	433859,545	1417846,154	-1750992,915	-433859,545	708923,0769
4	-256816487	95459467,63	-1750992,915	256816487	-95459467,63	-1750992,915
5	95459467,63	-59114142,01	433859,545	-95459467,63	59114142,01	-433859,545
6	1750992,915	433859,545	708923,0769	-1750992,915	-433859,545	1417846,154

BARRA CD

A	E	I	L	α
0.00192	70000000000	0.000007304	0.1	5.061454831

Matriz de rigidez local [K]

	1	2	3	4	5	6
1	672000000	0	0	-672000000	0	0
2	0	967680000	64512000	0	-967680000	32256000
3	0	64512000	4838400	0	-64512000	1612800
4	-672000000	0	0	672000000	0	0
5	0	-967680000	-64512000	0	967680000	-32256000
6	0	32256000	1612800	0	-32256000	1612800

Matriz de rotación [R]

	1	2	3	4	5	6
1	0.342020143	-0.939690621	0	0	0	0
2	0.939690621	0.342020143	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0.342020143	-0.939690621	0
5	0	0	0	0.939690621	0.342020143	0
6	0	0	0	0	0	1

BARRA DF

A	E	I	L	α
0.0013872	70000000000	8.68952E-07	0.25452	4.71238898

Matriz de rigidez local [K]

	1	2	3	4	5	6
1	190759075,9	0	0	-190759075,9	0	0
2	0	22135002,52	3755867,227	0	-22135002,52	1877933,614
3	0	3755867,227	716957495	0	-3755867,227	238985,8317
4	-190759075,9	0	0	190759075,9	0	0
5	0	-22135002,52	-3755867,227	0	22135002,52	-1877933,614
6	0	1877933,614	238985,8317	0	-1877933,614	238985,8317

Matriz de rotación [R]

	1	2	3	4	5	6
1	-1,83772E-16	-1	0	0	0	0
2	1	-1,83772E-16	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0	-1,83772E-16	0
5	0	0	0	0	1	-1,83772E-16
6	0	0	0	0	0	1

Matriz de rigidez global [K]

	7	8	9	10	11	12
7	983092030,5	96029720,22	60621450,35	-933892010,5	-95029720,22	30310725,18
8	96029720,22	706587989,5	22064403,49	-95029720,22	-706587989,5	11032201,74
9	60621450,35	22064403,49	4838400	-60621450,35	-22064403,49	3612800
10	-933092030,5	-95029720,22	-60621450,35	933092030,5	95029720,22	-30310725,18
11	-95029720,22	-706587989,5	-22064403,49	95029720,22	706587989,5	-11032201,74
12	30310725,18	11032201,74	3612800	-30310725,18	-11032201,74	3612800

C11	0,5
C21	0,666666667
C22	0,75
C41	0,333333333
C42	0,5
C44	0,25

Matriz de rigidez global [K]

	1	2	3	4	5	6
10	22135002,52	3,09884E-08	3755867,227	-22135002,52	-3,09884E-08	1877933,614
11	3,09884E-08	190759075,9	6,90224E-10	-3,09884E-08	-190759075,9	-3,45112E-10
12	3,45112E-10	-3,09884E-08	716957495	3755867,227	238985,8317	238985,8317
13	22135002,52	-3,09884E-08	-3755867,227	22135002,52	3,09884E-08	-1877933,614
14	3,09884E-08	190759075,9	6,90224E-10	-3,09884E-08	-190759075,9	-3,45112E-10
15	-3,45112E-10	-3,09884E-08	716957495	3755867,227	238985,8317	238985,8317
16	22135002,52	3,09884E-08	3755867,227	-22135002,52	-3,09884E-08	1877933,614
17	3,09884E-08	190759075,9	6,90224E-10	-3,09884E-08	-190759075,9	-3,45112E-10
18	3,45112E-10	-3,09884E-08	716957495	3755867,227	238985,8317	238985,8317
19	22135002,52	-3,09884E-08	-3755867,227	22135002,52	3,09884E-08	-1877933,614
20	3,09884E-08	190759075,9	6,90224E-10	-3,09884E-08	-190759075,9	-3,45112E-10
21	-3,45112E-10	-3,09884E-08	716957495	3755867,227	238985,8317	238985,8317
22	22135002,52	3,09884E-08	3755867,227	-22135002,52	-3,09884E-08	1877933,614
23	3,09884E-08	190759075,9	6,90224E-10	-3,09884E-08	-190759075,9	-3,45112E-10
24	3,45112E-10	-3,09884E-08	716957495	3755867,227	238985,8317	238985,8317
25	22135002,52	-3,09884E-08	-3755867,227	22135002,52	3,09884E-08	-1877933,614
26	3,09884E-08	190759075,9	6,90224E-10	-3,09884E-08	-190759075,9	-3,45112E-10
27	-3,45112E-10	-3,09884E-08	716957495	3755867,227	238985,8317	238985,8317
28	22135002,52	3,09884E-08	3755867,227	-22135002,52	-3,09884E-08	1877933,614
29	3,09884E-08	190759075,9	6,90224E-10	-3,09884E-08	-190759075,9	-3,45112E-10
30	3,45112E-10	-3,09884E-08	716957495	3755867,227	238985,8317	238985,8317

C11	0,5
C21	0,666666667
C22	0,75
C41	0,333333333
C42	0,5
C44	0,25

BARRA CE

A	E	I	L	α
0,0048	70000000000	0,000036	0,25452	4,71238898

Matriz de rigidez local [k]

	1	2	3	4	5	6
1	66006006,6	0	0	-66006006,6	0	0
2	0	917035287,2	155602547,5	0	-917035287,2	77801273,76
3	0	155602547,5	29702970,3	0	-155602547,5	9900990,099
4	-66006006,6	0	0	66006006,6	0	0
5	0	-917035287,2	-155602547,5	0	917035287,2	-77801273,76
6	0	77801273,76	9900990,099	0	-77801273,76	9900990,099

Matriz de rotación [k]

	1	2	3	4	5	6
1	-1,83772E-16	-1	0	0	0	0
2	1	-1,83772E-16	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	-1,83772E-16	-1	0
5	0	0	0	0	1	-1,83772E-16
6	0	0	0	0	0	1

BARRA DE

A	E	I	L	α
0,0048	70000000000	0,000036	0,25452	4,71238898

Matriz de rigidez local [k]

	1	2	3	4	5	6
1	66006006,6	0	0	-66006006,6	0	0
2	0	917035287,2	155602547,5	0	-917035287,2	77801273,76
3	0	155602547,5	29702970,3	0	-155602547,5	9900990,099
4	-66006006,6	0	0	66006006,6	0	0
5	0	-917035287,2	-155602547,5	0	917035287,2	-77801273,76
6	0	77801273,76	9900990,099	0	-77801273,76	9900990,099

Matriz de rotación [k]

	1	2	3	4	5	6
1	-1,83772E-16	-1	0	0	0	0
2	1	-1,83772E-16	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	-1,83772E-16	-1	0
5	0	0	0	0	1	-1,83772E-16
6	0	0	0	0	0	1

Matriz de rigidez global [k]

1	917035287,2	-4,72238E-08	155602547,5	-917035287,2	4,72238E-08	77801273,76
2	-4,72238E-08	66006006,6	-2,85954E-08	4,72238E-08	-66006006,6	-1,42977E-08
3	155602547,5	-2,85954E-08	29702970,3	-155602547,5	2,85954E-08	9900990,099
4	-917035287,2	4,72238E-08	-155602547,5	917035287,2	-4,72238E-08	-77801273,76
5	4,72238E-08	-66006006,6	2,85954E-08	-4,72238E-08	66006006,6	1,42977E-08
6	77801273,76	-1,42977E-08	9900990,099	-77801273,76	1,42977E-08	9900990,099

C11	0,5
C21	0,666666667
C22	0,75
C41	0,333333333
C42	0,5
C44	0,25

Matriz de rigidez global [k]

	10	11	12	13	14	15	16
1	917035287,2	-4,72238E-08	155602547,5	-917035287,2	4,72238E-08	77801273,76	-4,72238E-08
2	-4,72238E-08	66006006,6	-2,85954E-08	4,72238E-08	-66006006,6	-1,42977E-08	155602547,5
3	155602547,5	-2,85954E-08	29702970,3	-155602547,5	2,85954E-08	9900990,099	-917035287,2
4	-917035287,2	4,72238E-08	-155602547,5	917035287,2	-4,72238E-08	-77801273,76	-4,72238E-08
5	4,72238E-08	-66006006,6	2,85954E-08	-4,72238E-08	66006006,6	1,42977E-08	155602547,5
6	77801273,76	-1,42977E-08	9900990,099	-77801273,76	1,42977E-08	9900990,099	-77801273,76

C11	0,5
C21	0,666666667
C22	0,75
C41	0,333333333
C42	0,5
C44	0,25

ANEXO 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	4440215,73	-105083387,4	5862584,521	4440215,73	-105083387,4	5862584,521	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	105083387,4	262016182	-286041732	-105083387,4	-262016182	286041732	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	-105083387,4	2109842732	286041732	105083387,4	-2109842732	-286041732	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	-4440215,73	-105083387,4	5862584,521	30121802,77	5623915,777	233781,568	-26810487	95459667,63	-1705958,515	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	-105083387,4	262016182	-286041732	9620315,777	221505,24	409695,272	5914442,01	483899,545	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	-105083387,4	262016182	-286041732	1877883,614	-1451121,10	218095,8117	1877883,614	-1451121,10	218095,8117	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	25601487	95459667,63	-1705958,515	21050487,63	-429242,481	58610487,63	-91082910,5	-95089780,22	1013727,18	-91082910,5	-95089780,22	1013727,18	0	0	0	0
8	0	0	0	95459667,63	-1705958,515	433389,545	-429242,481	1770541,54	58610487,63	9502970,32	-7058487,95	1103202,74	4723387,08	-60506600,6	-1429776,08	0	0	0	0
9	0	0	0	179050,015	433389,545	208621,0769	58610487,63	1770541,54	65621450,35	-22084483,49	-1412600	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	-91082910,5	-95089780,22	-60621450,35	18772810,01	9602970,32	-2054887,95	-91082910,5	-95089780,22	-60621450,35	18772810,01	-91082910,5	-95089780,22	-60621450,35
11	0	0	0	0	0	0	-95089780,22	-2054887,95	-2104403,49	9602970,32	1057410,72	-1031307,74	-95089780,22	-2054887,95	-2104403,49	9602970,32	1057410,72	-1031307,74	-95089780,22
12	0	0	0	0	0	0	1770541,54	58610487,63	1122600	-91082910,5	2129757,485	0	18487082,4	-944776,08	135015842,5	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	433389,545	-429242,481	0	4723387,08	-44006038,6	0	-844776,08	135015842,5	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	4723387,08	-44006038,6	0	4723387,08	-44006038,6	0	-844776,08	135015842,5	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	77801273,76	-1429776,08	0	77801273,76	-1429776,08	0	-15502347,5	2859546,08	19001980,2	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2218008,32	3,08844,08	-3755867,227	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1,00844,08	-10079075,9	6,902246,10	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1877883,614	-1451121,10	218095,8117	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-15502347,5	-2859546,08	0	-15502347,5	-2859546,08	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15502347,5	-2859546,08	0	15502347,5	-2859546,08	0	0	0	0	0

ANEXO 2

Fuente de empalme: fmp
No hay

Fuente en los nudos: fn

fn-fmp

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2541
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

[illegible]

ESTUARIOS

BARRA AB

44402315,73	105043387,4	-586358,6521	-44402315,73	-105043387,4	-586358,6521
105043387,4	-262036382	236904,2732	-105043387,4	-262036382	236904,2732
-586358,6521	236904,2732	274043,5438	186358,6521	-236904,2732	137021,7719
-44402315,73	-105043387,4	586358,6521	44402315,73	105043387,4	-586358,6521
-105043387,4	-262036382	-236904,2732	35083387,4	262036382	-236904,2732
-586358,6521	236904,2732	117021,7719	586358,6521	-236904,2732	274043,5438

BARRA BC

256816487	-95459467,63	1750992,915	-256816487	95459467,63	1750992,915
-95459467,63	59114142,01	4333859,545	95459467,63	-59114142,01	-4333859,545
1750992,915	4333859,545	1417846,154	-1750992,915	-4333859,545	708923,0769
-256816487	95459467,63	-1750992,915	256816487	-95459467,63	-1750992,915
95459467,63	-59114142,01	-4333859,545	-95459467,63	59114142,01	-4333859,545
1750992,915	4333859,545	708923,0769	-1750992,915	-4333859,545	2417846,154

BARRA CD

933092030,5	95029720,22	60621450,35	-933092030,5	-95029720,22	30310725,18
95029720,22	706587989,5	27064403,49	-95029720,22	-706587989,5	11032201,74
60621450,35	22064403,49	4838400	-60621450,35	-22064403,49	1612800
-933092030,5	-95029720,22	-60621450,35	933092030,5	95029720,22	-30310725,18
-95029720,22	-706587989,5	-27064403,49	95029720,22	706587989,5	-11032201,74
30310725,18	11032201,74	1612800	-30310725,18	-11032201,74	1612800

BARRA DE

22135002,52	3,09884E-08	3755867,227	-22135002,52	-3,09884E-08	1877933,614
3,09884E-08	190759075,9	-690224E-10	-3,09884E-08	-190759075,9	-3,45112E-10
3755867,227	-690224E-10	716957,495	-3755867,227	690224E-10	238995,8317
-22135002,52	-3,09884E-08	-3755867,227	22135002,52	3,09884E-08	-1877933,614
-3,09884E-08	-190759075,9	690224E-10	3,09884E-08	190759075,9	3,45112E-10
1877933,614	-3,45112E-10	238995,8317	-1877933,614	3,45112E-10	238995,8317

BARRA CE

917035287,2	-4,72238E-08	155602547,5	-917035287,2	4,72238E-08	77801273,76
-4,72238E-08	66006006,6	-2,85954E-08	4,72238E-08	-66006006,6	-1,42977E-08
155602547,5	-2,85954E-08	29702970,3	-155602547,5	2,85954E-08	9900990,099
-917035287,2	4,72238E-08	-155602547,5	917035287,2	-4,72238E-08	-77801273,76
4,72238E-08	-66006006,6	2,85954E-08	-4,72238E-08	66006006,6	1,42977E-08
77801273,76	-1,42977E-08	9900990,099	-77801273,76	1,42977E-08	9900990,099

BARRA DE

917035287,2	-4,72238E-08	155602547,5	-917035287,2	4,72238E-08	77801273,76
-4,72238E-08	66006006,6	-2,85954E-08	4,72238E-08	-66006006,6	-1,42977E-08
155602547,5	-2,85954E-08	29702970,3	-155602547,5	2,85954E-08	9900990,099
-917035287,2	4,72238E-08	-155602547,5	917035287,2	-4,72238E-08	-77801273,76
4,72238E-08	-66006006,6	2,85954E-08	-4,72238E-08	66006006,6	1,42977E-08
77801273,76	-1,42977E-08	9900990,099	-77801273,76	1,42977E-08	9900990,099

S

1	2943
2	2764,689372
3	9,10138E-11
4	-2943
5	-2764,689372
6	-1100,470291

4	2943
5	2764,689372
6	1100,470291
7	-2943
8	-2764,689372
9	567,4880711

7	7838,708113
8	-16956,39351
9	-567,4880711
10	7838,708113
11	16956,39351
12	-749,05336

10	2943
11	317,1893722
12	749,05336
16	-2943
17	-312,1893722
18	-2,27374E-13

7	10781,70811
8	19721,00280
9	7,98082E-11
13	10781,70811
14	17268,58289
15	2744,160349

10	-10781,70811
11	-17268,58289
12	-3,66072E-11
13	10781,70811
14	17268,58289
15	-2744,160349

Estueros	
1	2943
2	2764,689372
3	0
4	2943
5	2764,689372
6	1100,470291
7	-2943
8	-2764,689372
9	567,4880711
10	2943
11	312,1893722
12	749,05336
13	10781,70811
14	17268,58289
15	-2744,160349
16	-2943
17	-312,1893722
18	0
19	0
20	0

7.2. Apéndice II: Plano chasis definitivo

