



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Diseño y Validación del Chasis de una Moto  
Eléctrica de Competición

Design and Validation of a Racing Electric  
Motorcycle Frame

Autor

**Daniel Espada Gargallo**

Director

**Juan Diego Jaria Gazol**

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia  
2021





**Escuela Universitaria  
Politécnica** - La Almunia  
Centro adscrito  
**Universidad Zaragoza**

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA  
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

**MEMORIA**

**Diseño y Validación del Chasis de una  
Moto Eléctrica de Competición**

**Design and Validation of a Racing Electric  
Motorcycle Frame**

**424.21.64**

Autor: Daniel Espada Gargallo

Director: Juan Diego Jaria Gazol

Fecha: martes, 22 de junio de 2021





## INDICE BREVE

<b>1. Resumen.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Abstract.....</b>	<b>2</b>
<b>3. Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>4. Estado del arte.....</b>	<b>7</b>
<b>5. Marco teórico .....</b>	<b>36</b>
<b>6. Desarrollo.....</b>	<b>77</b>
<b>7. Conclusiones .....</b>	<b>138</b>
<b>8. Bibliografía.....</b>	<b>142</b>

# INDICE DE CONTENIDO

<b>1. Resumen .....</b>	<b>1</b>
1.1. Palabras clave .....	1
<b>2. Abstract .....</b>	<b>2</b>
2.1. Key-words .....	2
<b>3. Introducción .....</b>	<b>3</b>
3.1. Motivación .....	3
3.2. Contexto.....	3
3.2.1. MotoStudent .....	3
3.2.2. EUPLA Racing Team .....	4
3.2.3. Covid-19.....	5
3.3. Objetivos .....	5
3.4. Metodología del proyecto .....	6
<b>4. Estado del arte .....</b>	<b>7</b>
4.1. Definición de chasis .....	7
4.2. Antecedentes.....	9
4.2.1. EUPLA Racing Team .....	9
4.2.1.1. IV edición (2015-16) .....	9
4.2.1.2. V edición (2017-18) .....	11
4.2.2. Otros prototipos .....	13
4.2.2.1. Universidad Politécnica de Valencia 2020 (Alcoy).....	13
4.2.2.2. Escuela Técnica Superior de Ingeniería 2018 (Madrid) .....	15
4.2.2.3. Universidad Politécnica de Cataluña 2015 (Villanueva y Geltrú) .....	17
4.2.3. Modelos comerciales.....	18
4.2.3.1. Energica Ego .....	19
4.2.3.2. Zero S.....	21
4.2.3.3. Mission R .....	24
4.3. Tipos de chasis .....	28
4.3.1. Según su integridad estructural .....	28
4.3.1.1. Portantes .....	29
4.3.1.2. Autoportantes .....	29

4.3.2. Según su estructura .....	30
4.3.2.1. Tubular .....	30
4.3.2.1.1. Monoviga de simple cuna .....	31
4.3.2.1.2. Monoviga de doble cuna .....	31
4.3.2.1.3. Multitubular o triangulado .....	32
4.3.2.2. Doble viga .....	33
4.3.2.2.1. Perimetral .....	33
4.3.2.2.2. Cerrado .....	34
4.3.2.3. Monocasco.....	34
<b>5. Marco teórico .....</b>	<b>36</b>
<b>5.1. Materiales .....</b>	<b>36</b>
5.1.1. Acero.....	36
5.1.2. Aluminio.....	38
5.1.3. Magnesio .....	39
5.1.4. Titanio .....	39
5.1.5. Materiales compuestos .....	40
5.1.5.1. Fibra de carbono .....	41
<b>5.2. Geometría.....</b>	<b>42</b>
5.2.1. Lanzamiento .....	42
5.2.2. Avance .....	44
5.2.3. Distancia entre ejes .....	45
5.2.3.1. Ángulo de giro requerido .....	46
5.2.3.2. Ángulo de la rueda trasera.....	47
5.2.3.3. Efectos de la inercia .....	48
5.2.4. Peso y su posición .....	48
<b>5.3. Comportamiento dinámico.....</b>	<b>50</b>
5.3.1. Condiciones para el movimiento .....	50
5.3.1.1. Fuerza de rozamiento .....	50
5.3.1.2. Resistencia a la aceleración .....	51
5.3.1.3. Resistencia por pendiente .....	51
5.3.1.4. Resistencia a la rodadura.....	52
5.3.1.5. Resistencia aerodinámica .....	52
5.3.1.6. Resistencia relativa del viento .....	53
5.3.2. Movimientos angulares .....	53
5.3.3. Transferencia de carga.....	54



**INDICES**

5.3.4.	Rigidez .....	55
5.3.5.	Manejo .....	56
5.3.5.1.	Estabilidad .....	56
5.3.5.2.	Control .....	56
5.3.5.3.	Ergonomía .....	57
<b>5.4.</b>	<b>Técnicas y procesos utilizados .....</b>	<b>58</b>
5.4.1.	Modelado 3D .....	59
5.4.2.	Hipótesis de carga .....	60
5.4.2.1.	Reposo .....	61
5.4.2.2.	Transferencia de carga .....	63
5.4.2.2.1.	Aceleración máxima .....	63
5.4.2.2.2.	Frenada máxima .....	65
5.4.2.2.2.1.	Antes de frenar .....	65
5.4.2.2.2.2.	Instante de frenar .....	66
5.4.2.2.3.	Paso por curva .....	69
5.4.3.	Análisis por elementos finitos .....	72
<b>6.</b>	<b>Desarrollo .....</b>	<b>77</b>
<b>6.1.</b>	<b>Datos de partida .....</b>	<b>77</b>
6.1.1.	Restricciones .....	77
6.1.2.	Geometría y parámetros de diseño .....	78
6.1.3.	EUPLA Racing Team .....	81
<b>6.2.</b>	<b>Justificaciones de diseño .....</b>	<b>81</b>
6.2.1.	Tipología de chasis .....	82
6.2.2.	Estudio y selección de material .....	84
6.2.2.1.	Materiales descartados .....	85
6.2.2.2.	Acero .....	86
6.2.2.2.1.	1.1730 (F-114 - C45) .....	86
6.2.2.2.2.	1.7227 (F-125 - 42CrMo4) .....	87
6.2.2.2.3.	1.7218 (F-222 - 25CrMo4) .....	87
6.2.2.2.4.	1.4006 (F-311 - X12Cr13) .....	88
6.2.2.3.	Aluminio .....	88
6.2.2.3.1.	5083 .....	89
6.2.2.3.2.	6082 .....	89
6.2.2.3.3.	7075 .....	90
6.2.2.4.	Comparativa y decisión .....	90

<b>6.3. Diseño al detalle .....</b>	<b>93</b>
6.3.1. Chasis de partida.....	94
6.3.2. Estudio de uniones.....	95
6.3.2.1. Pipa de dirección.....	96
6.3.2.2. Anclaje del motor.....	99
6.3.3. Diseño final .....	102
6.3.3.1. Vigas laterales .....	103
6.3.3.2. Pipa de dirección.....	104
6.3.3.3. Anclajes del motor .....	106
6.3.3.4. Travesaños .....	107
<b>6.4. Estudio de cargas .....</b>	<b>109</b>
6.4.1. Reposo .....	110
6.4.2. Aceleración máxima.....	111
6.4.3. Frenada máxima .....	113
6.4.4. Paso por curva .....	115
6.4.5. Anclaje del motor.....	116
<b>6.5. Análisis por elementos finitos.....</b>	<b>117</b>
6.5.1. Aceleración máxima.....	119
6.5.1.1. Resultados.....	120
6.5.2. Frenada máxima .....	123
6.5.2.1. Resultados.....	124
6.5.3. Paso por curva .....	127
6.5.3.1. Resultados.....	129
6.5.4. Anclaje del motor.....	131
6.5.4.1. Resultados.....	132
6.5.5. Evaluación de los resultados.....	134
<b>7. Conclusiones .....</b>	<b>138</b>
<b>7.1. Trabajos futuros.....</b>	<b>140</b>
<b>8. Bibliografía.....</b>	<b>142</b>
<b>8.1. Referencias bibliográficas.....</b>	<b>149</b>

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Logotipos MotoStudent (Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, 2018) .....	4
Ilustración 2: Motos de EUPLA Racing Team en las ediciones V y IV .....	4
Ilustración 3: Prototipo de Sylvester Roper de 1869 (Motorcycle Museums, 2008) .....	7
Ilustración 4: Estructura de una motocicleta (Fraboulet, 2017).....	8
Ilustración 5: Chasis de EUPLA Racing Team en la edición IV .....	10
Ilustración 6: Estructura de EUPLA Racing Team en la edición IV .....	10
Ilustración 7: Chasis de EUPLA Racing Team en la edición V.....	11
Ilustración 8: Estructura de Eupla Racing Team en la edición V .....	12
Ilustración 9: Chasis de Engineering Project Alcoy en la edición VI (Soria Guijarro, 2020) .....	13
Ilustración 10: Tubos de Engineering Project Alcoy en la edición VI (Soria Guijarro, 2020) .....	14
Ilustración 11: Anclajes del motor Engineering Project Alcoy en la edición IV (Soria Guijarro, 2020) .....	15
Ilustración 12: Chasis de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería en la edición V (Reinares Gozalo, 2018) .....	16
Ilustración 13: Comparativa de materiales Escuela Técnica Superior de Ingeniería (Reinares Gozalo, 2018) .....	16
Ilustración 14: Chasis final Escuela Técnica Superior de Ingeniería en la edición V (Reinares Gozalo, 2018) .....	17
Ilustración 15: Estructura principal de Àlex Salmerón Ruiz (Salmerón Ruiz, 2015) .....	18
Ilustración 16: Detalles de la estructura de Àlex Salmerón Ruiz (Salmerón Ruiz, 2015) .....	18
Ilustración 17: Energica Ego Corsa (MotorBike Magazine, 2019) .....	19
Ilustración 18: Energica Ego Corsa sin carenado (mamaktalk, 2019).....	20
Ilustración 19: Detalles de los anclajes de la Energica Ego Corsa (Beeler, Under the Hood of the Energica Ego, 2019).....	20

Ilustración 20: Detalles de la pipa y batería de la Energica Ego Corsa (Beeler, Under the Hood of the Energica Ego, 2019) .....	21
Ilustración 21: Zero S (Zero Motorcycles, 2020) .....	22
Ilustración 22: Chasis, basculante y subchasis de la Zero S (MediaWiki, 2020) .....	22
Ilustración 23: Montaje de la batería de la Zero S (NewZeroland, 2019) .....	23
Ilustración 24: Detalle del eje del basculante de la Zero S (Zero Motorcycles, 2020) .....	24
Ilustración 25: Mission R (Rasopariso, 2015) .....	25
Ilustración 26: Planta y perfil de la Mission R (Cathcart & Wing, 2012) .....	25
Ilustración 27: Chasis de la Mission R (Font, 2011) .....	27
Ilustración 28: Detalle de la pipa de la Mission R (Font, 2011) .....	28
Ilustración 29: Chasis portante (Stonehocker, 2011) .....	29
Ilustración 30: Chasis autoportante (Stéphane, 2020) .....	30
Ilustración 31: Chasis monoviga de simple cuna (Fall, 2013) .....	31
Ilustración 32: Chasis monoviga de doble cuna (Logan, 2021) .....	32
Ilustración 33: Chasis multitubular (EUPLA Racing Team, 2018) .....	32
Ilustración 34: Chasis de doble viga perimetral (Daer Design, 2020) .....	33
Ilustración 35: Chasis de doble viga cerrado (Brazeau, 2015) .....	34
Ilustración 36: Taylormade Carbon 2, con estructura monocasco (Beeler, Brouch Superior Debuts Familiar Moto2 Race Bike, 2013) .....	35
Ilustración 37: Material compuesto reforzado (OxyBlack, 2021) .....	41
Ilustración 38: Lanzamiento .....	42
Ilustración 39: Influencia del lanzamiento sobre la altura de la pipa (Foale, 2002, pág. 85) .....	43
Ilustración 40: Avance .....	44
Ilustración 41: Efecto del avance positivo, negativo y nulo (Cossalter, 2006, pág. 16) .....	45
Ilustración 42: Distancia entre ejes .....	46
Ilustración 43: Ángulo de giro según distancia entre ejes (Foale, 2002) .....	47



**INDICES**

Ilustración 44: Desplazamiento lateral según distancia entre ejes (Foale, 2002)  
.....47

Ilustración 45: Peso, reacciones de los apoyos y posición del centro de gravedad  
.....49

Ilustración 46: Peso de un cuerpo sobre pendiente (Wikipedia, s.f.) .....51

Ilustración 47: Deformación por rodadura (Cossalter, 2006) .....52

Ilustración 48: Fuerza ejercida por el viento (IVAO, 2020) .....53

Ilustración 49: Movimientos angulares de una motocicleta (Foale, 2002, pág. 17)  
.....54

Ilustración 50: Ergonomía de una motocicleta .....58

Ilustración 51: Modelo 3D del prototipo en Autodesk Inventor .....59

Ilustración 52: Grados de libertad de la estructura (Reinares Gozalo, 2018).....61

Ilustración 53: Fuerzas en situación estática .....62

Ilustración 54: Fuerzas en la aceleración .....65

Ilustración 55: Fuerzas en la frenada .....68

Ilustración 56: Aceleración centrípeta (Rodríguez, 2013) .....69

Ilustración 57: Descentramiento del centro de gravedad (vista frontal) .....70

Ilustración 58: Fuerzas en el paso por curva (sistema de referencia global) .....71

Ilustración 59: Fuerzas en el paso por curva (sistema de referencia del vehículo)  
.....72

Ilustración 60: Mallado en llanta trasera .....73

Ilustración 61: Teorías de falla (karlossantiuste, 2015).....76

Ilustración 62: Boceto inicial .....80

Ilustración 63: Ahusamiento en el corte por agua .....95

Ilustración 64: Diseños iniciales.....96

Ilustración 65: Pipa de dirección de EUPLA Racing Team en la edición IV .....97

Ilustración 66: Pipa de dirección de EUPLA Racing Team en la edición V .....97

Ilustración 67: Pipa de dirección inicial .....98

Ilustración 68: Resultado de ensayos de plegado de aluminio 6082 T651.....99



Ilustración 69: Dimensiones del motor Engiro MS1920 .....	100
Ilustración 70: Anclajes del motor de EUPLA Racing Team en la edición IV.....	100
Ilustración 71: Anclajes del motor de EUPLA Racing Team en la edición IV.....	101
Ilustración 72: Anclajes del motor iniciales .....	101
Ilustración 73: Diseño final .....	102
Ilustración 74: Vigas laterales .....	104
Ilustración 75: Pipa de dirección .....	105
Ilustración 76: Ensanchamiento del espacio interior .....	106
Ilustración 77: Ángulo de giro de la dirección .....	106
Ilustración 78: Ensamblaje chasis y motor .....	107
Ilustración 79: Anclajes del motor .....	107
Ilustración 80: Detalle del anclaje del amortiguador .....	108
Ilustración 81: Detalle del anclaje de la batería .....	109
Ilustración 82: Detalle de los rigidizantes.....	109
Ilustración 83: Peso de la moto y del piloto.....	110
Ilustración 84: Cargas en situación estática .....	111
Ilustración 85: Cargas durante la aceleración máxima .....	112
Ilustración 86: Cargas durante la frenada máxima .....	114
Ilustración 87: Cargas en el paso por curva .....	116
Ilustración 88: Centro de gravedad del motor en el paso por curva (vista frontal) .....	117
Ilustración 89: Módulo de análisis estructural estático de Ansys.....	117
Ilustración 90: Condiciones de contorno de la aceleración máxima.....	120
Ilustración 91: Problema de convergencia en el anclaje de la pipa .....	121
Ilustración 92: Tensión equivalente de Von Mises en aceleración máxima .....	122
Ilustración 93: Desplazamiento total en aceleración máxima .....	122
Ilustración 94: Condiciones de contorno de la frenada máxima.....	124
Ilustración 95: Problema de convergencia en el eje del basculante.....	125
Ilustración 96: Tensión equivalente de Von Mises en la frenada máxima .....	126



---

**INDICES**

Ilustración 97: Desplazamiento total en la frenada máxima .....	126
Ilustración 98: Condiciones de contorno del paso por curva .....	129
Ilustración 99: Tensión equivalente de Von Mises en el paso por curva.....	130
Ilustración 100: Desplazamiento total en el paso por curva.....	130
Ilustración 101: Condiciones de contorno de los anclajes del motor .....	132
Ilustración 102: Tensión equivalente de Von Mises de los anclajes del motor (motor no visible) .....	133
Ilustración 103: Desplazamiento total de los anclajes del motor (motor no visible) .....	133
Ilustración 104: Moto de EUPLA Racing Team de la VI edición en un banco de potencia .....	139

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de los aceros según UNE-36010 (Ingemecanica, 2021) ..37	
Tabla 2: Clasificación de los aluminios (Wikipedia, s.f.) .....38	
Tabla 3: Componentes MotoStudent (Moto Engineering Foundation, 2019) .....77	
Tabla 4: Restricciones geométricas (Moto Engineering Foundation, 2019).....78	
Tabla 5: Restricciones de materiales (Moto Engineering Foundation, 2019) .....78	
Tabla 6: Dimensiones de motocicletas de competición (García García, 2013)....79	
Tabla 7: Comparativa de tipologías de chasis .....84	
Tabla 8: Propiedades del acero 1.1730 .....87	
Tabla 9: Propiedades del acero 1.7227 .....87	
Tabla 10: Propiedades del acero 1.7218 .....87	
Tabla 11: Propiedades del acero 1.4006 .....88	
Tabla 12: Propiedades del aluminio 5083 .....89	
Tabla 13: Propiedades del aluminio 6082 .....90	
Tabla 14: Propiedades del aluminio 7075 .....90	
Tabla 15: Comparativa de materiales .....92	
Tabla 16: Propiedades del aluminio 6082 T651 según proveedor .....93	
Tabla 17: Propiedades del acero 1.1730 según proveedor .....93	
Tabla 18: Cargas durante la aceleración máxima .....119	
Tabla 19: Resultados aceleración máxima .....123	
Tabla 20: Cargas durante la frenada máxima .....123	
Tabla 21: Cargas en el paso por curva.....128	
Tabla 22: Resultados del estudio de los empotramientos .....128	
Tabla 23: Resultados del paso por curva.....131	
Tabla 24: Cargas del anclaje del motor en el paso por curva .....131	
Tabla 25: Resultados de los anclajes del motor.....134	
Tabla 26: Resultados del análisis .....134	
Tabla 27: Peso de los chasis de EUPLA Racing Team .....138	

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo supone el desenlace a un viaje de cuatro años cuyo recorrido comencé con el apoyo de mi familia y amigos, pero que finalizo habiendo difuminado los límites entre ambos, rodeado de una familia aun mayor y con nuevos amigos a los que puedo llamar familia. Es gracias a ellos que todo esto ha sido posible.

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia por haberme acompañado de forma incondicional en todo momento: a mis abuelas, a mi madre y a Javier, a mi hermana, a mis tíos, a mis primos, a mi madrina y, sobre todo, a mi padre, quien hizo todo lo posible por que llegase hasta aquí. Gracias de corazón.

Agradecer a todo el personal de la EUPLA su profesionalidad y cercanía: profesores, equipo directivo, secretaría, conserjes, personal de mantenimiento y limpieza; gracias por todo lo que me habéis enseñado con un trato inigualable. Mención especial para Juan Diego Jaria y David Asiain por su dedicación y esfuerzo extra como tutores del proyecto.

Al personal de la residencia Ramón y Cajal, quienes han sido como una familia para mí en todos los sentidos: Pilar, Loli, Mari, Ana, Esme, Abdul y el resto de trabajadores, gracias por vuestra hospitalidad y por haberme tratado como a un hijo.

A todos los miembros del equipo EUPLA Racing Team, tanto a los compañeros de esta edición como a aquellos que ya no forman parte de él, así como a aquellas personas y empresas que con su apoyo han hecho esto posible. Mención especial para Fernando Moral, Sergio Ruíz, David Gallardo, Alvaro Rina y Carlos Barcelona por haber estado aquí hasta el final.

Finalmente, agradecer a todos mis amigos y compañeros con los que he vivido esta experiencia, tanto a los que me han visto crecer con ella como a los que se han unido a mitad del camino. A la Cuaya, a mis panas de Sanse y, especialmente, a los carperos. Me llevo a unas personas fantásticas, por vosotros ha merecido la pena todo esto.

Muchas gracias por haber formado parte de esta etapa de mi vida.

# 1. RESUMEN

El presente trabajo de final de grado (TFG) tiene como finalidad desarrollar el diseño y validación del chasis para una motocicleta de competición eléctrica que participará en la VI edición del campeonato internacional MotoStudent.

Siendo esta la tercera edición en la que participan motos eléctricas, el primer paso que se realiza es un estudio del estado del arte. Además de estudiar modelos comerciales, se aprovecha la experiencia del equipo EUPLA Racing Team para analizar los antecedentes de la competición y así encontrar las mejores alternativas.

El chasis es el principal elemento estructural de una motocicleta, por lo que su geometría influye tanto en el comportamiento estático como dinámico del vehículo. Por tanto, es importante conocer cómo afecta su diseño en aspectos como la resistencia estructural y en parámetros dinámicos como la estabilidad o el *squat*.

El chasis diseñado se somete a un análisis estructural estático para conocer su validez estructural frente a las situaciones de máxima aceleración, máxima frenada y en el paso por curva.

## 1.1. PALABRAS CLAVE

Chasis, Motocicleta eléctrica, Competición internacional, Diseño, Análisis por elementos finitos.



## **2. ABSTRACT**

The purpose of this final degree project is to develop the design and validation of the frame for an electric racing motorcycle which is going to race in the VI edition of the MotoStudent international championship.

As it is the third edition in which electric motorcycles participate, our first step will be a study of the state of the art. In addition to studying commercial motorcycles, the experience of the EUPLA Racing Team is used to analyse the background of the competition and thus find the best alternatives.

The frame or chassis is the main structural element of a motorcycle, so its geometry affects both the static and dynamic behaviour of the vehicle. Therefore, it is important to know how its design influences features such as structural resistance and dynamic parameters like stability or squat.

The frame undergoes a static structural analysis to determine its structural efficiency in situations of maximum acceleration, maximum braking and when cornering.

### **2.1. KEY-WORDS**

Frame, Electric Motorcycle, International competition, Design, Finite Elements Analysis.

## 3. INTRODUCCIÓN

La ingeniería mecatrónica abarca un amplio abanico de posibilidades en cuanto a su implementación se refiere, siendo una de las áreas en pleno auge los vehículos de propulsión eléctrica.

La posibilidad de reducir el impacto de las emisiones de carbono y de alcanzar sistemas de transporte alternativos que propicien la movilidad sostenible ha hecho que en los últimos años crezca la demanda de vehículos eléctricos que, además de mejorar la movilidad, han demostrado su rendimiento y prestaciones en circuito gracias a la participación en numerosas competiciones.

### 3.1. MOTIVACIÓN

El auge de los vehículos eléctricos ha propiciado la continua evolución e innovación en los diferentes componentes que los integran, debiendo adaptarse para satisfacer los nuevos requisitos que demanda la propulsión eléctrica. En el caso de las motocicletas, el depósito se sustituye por una batería con ángulos rectos y los motores modifican su tamaño, peso y sistemas de sujeción.

Por tanto, el desarrollo de un chasis para una motocicleta de competición eléctrica requiere idear una nueva geometría que permita alojar y sujetar todos los componentes que integran el vehículo, garantizando siempre su resistencia estructural.

### 3.2. CONTEXTO

#### 3.2.1. *MotoStudent*

Este trabajo se enmarca en la participación del equipo EUPLA Racing Team en la VI edición del campeonato internacional de MotoStudent. Esta es una competición oficial promovida por Moto Engineering Foundation (MEF) y TechnoPark MotorLand que busca enfrentar a equipos de estudiantes universitarios de todo el mundo, permitiéndoles aplicar el conocimiento adquirido en sus estudios en un proyecto industrial, diseñando, desarrollando y fabricando un prototipo de competición real que será evaluado y testeado en el circuito de la Federación Internacional de Motociclismo (FIM) de MotorLand Aragón. Los equipos adquieren el rol de una firma de motos que debe diseñar, fabricar y evaluar un prototipo de motocicleta para el sector de la competición.



*Ilustración 1: Logotipos MotoStudent (Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, 2018)*

La primera fase del proyecto requiere implantar un modelo de negocio que será evaluado por la Fundación en aspectos como el coste, el diseño, la innovación o la presentación.

La segunda fase somete a los prototipos a una serie de pruebas para garantizar su seguridad y el cumplimiento de requisitos. Entre otros, se realiza una inspección técnica, una prueba de frenada y test de rendimiento. Esta fase finaliza con una carrera en la que participan todos los equipos en el circuito de MotorLand Aragón.

### 3.2.2. EUPLA Racing Team

El desarrollo del chasis se realiza debido a la participación del equipo EUPLA Racing Team en la categoría eléctrica de la VI edición del campeonato internacional MotoStudent.



*Ilustración 2: Motos de EUPLA Racing Team en las ediciones V y IV*

Con dos ediciones de experiencia a sus espaldas, el equipo cuenta con dos prototipos verificados y testeados que han llegado a la fase final de la competición en las ediciones IV y V. Gracias a esto, el diseño del chasis actual se beneficia del conocimiento que EUPLA Racing Team ha recolectado hasta la fecha, partiendo de una base fundamentada.



### 3.2.3. Covid-19

La VI edición del campeonato internacional de MotoStudent abrió su periodo de registro en enero de 2019, con la previsión de realizar el evento final en el que todos los equipos competirían en MotorLand Aragón en otoño de 2020.

El Gobierno de España aprobó el 14 de marzo de 2020 declarar el Estado de Alarma en todo el territorio español para afrontar la situación de emergencia sanitaria provocada por el Covid-19, enfermedad infecciosa causada por el virus SARS-CoV-2. Esto implica que se ve limitada la circulación de personas y el uso y consumo de servicios en la medida que el Gobierno estime oportuna según el avance de la pandemia.

Esta situación ha generado problemas sanitarios, económicos, estructurales y de abastecimiento en todos los equipos participantes en MotoStudent, por lo que el calendario de la competición se ha visto modificado varias veces para adaptarse a la situación.

## 3.3. OBJETIVOS

Este trabajo se centra en desarrollar el chasis que incorporará el prototipo del equipo EUPLA Racing Team en su participación en la categoría eléctrica de la VI edición de la competición internacional MotoStudent.

Se tiene como objetivo final el diseño de la estructura portante de una motocicleta eléctrica de competición, con la previsión de que esta compita en el circuito de Motorland de Alcañiz. Por tanto, es prioritario y fundamental que el chasis cumpla con la normativa impuesta por el órgano administrativo de la competición, garantizando la seguridad del piloto y cumpliendo con los diferentes requisitos de diseño. Como elemento estructural, debe ser capaz de alojar todos los componentes necesarios para el correcto funcionamiento de la motocicleta y garantizar que es capaz de soportar las cargas derivadas de la operativa prevista.

Gracias a la experiencia del equipo en las anteriores ediciones, el objetivo planteado en esta edición ha sido combinar las virtudes de ambos prototipos. Para ello, en el apartado electrónico se sigue una línea de diseño similar a la de la V edición mientras que, en el apartado mecánico, se apuesta por reducir el peso y conseguir una estructura fiable y fácil de montar como la de la IV edición.

Adicionalmente, debido a la situación sanitaria ocasionada por el COVID-19, se prima reducir los costes lo máximo posible. El patrocinio de determinadas empresas



en la fabricación afecta al presupuesto y, por tanto, el diseño se ve afectado para favorecer aquellos procesos de fabricación que resultan más económicos.

### 3.4. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

En primer lugar, se realiza un estudio en profundidad consultando numerosas fuentes, tanto propias como aportadas por el equipo EUPLA Racing Team, para discernir las mejores alternativas de diseño y los procedimientos de análisis que mejor se ajustan a los objetivos del proyecto. Este estudio se desarrolla en los apartados 4. *Estado del arte*, que explica las soluciones y alternativas adoptadas en la actualidad, y en el 5. *Marco teórico*, que sirve como base para comprender cómo afectan los parámetros de diseño al comportamiento de la motocicleta.

En el apartado 6. *Desarrollo* se detallan el diseño de la estructura y los cálculos y simulaciones a los que se somete para verificar su validez. Los planos de conjunto y de fabricación del chasis obtenidos aquí se adjuntan en los Anexos del proyecto.

Por su parte, la validación de la estructura se realiza mediante un análisis por elementos finitos que sigue la teoría de transferencia de cargas de Vittore Cossalter, descrita en el capítulo 5.4.2. *Hipótesis de carga*.

## 4. ESTADO DEL ARTE

Para afrontar el desarrollo de un nuevo proyecto lo más importante es realizar un estudio de otros diseños y trabajos similares ya existentes, con la finalidad de comprender las tecnologías y metodologías empleadas. Esto permite construir nuestro trabajo sobre una base fundamentada y ya testada, aprovechando el legado de aquellas personas que ya han recorrido el camino que nosotros seguimos.

La historia de las motocicletas se remonta casi dos siglos en el tiempo, con unos primeros prototipos que aprovechaban la estructura de una bicicleta para incorporar un motor de vapor que proporcionara la propulsión. Pioneros como el ingeniero Lucius Day Copeland, quien en 1884 consiguió un velocípedo a vapor que alcanzaba los 24km/h con una hora de autonomía, o Sylvester Howard Roper, que es considerado el padre de las motocicletas con su prototipo de 1869. (Vogel, 2009, pág. 31)



*Ilustración 3: Prototipo de Sylvester Roper de 1869 (Motorcycle Museums, 2008)*

Aunque las primeras motocicletas eléctricas datan de 1911, a día de hoy los motores de combustión siguen siendo los más extendidos.

Con la mejora en la tecnología de las baterías, los vehículos eléctricos están experimentando un gran crecimiento en los últimos años, lo que ha provocado la aparición de nuevos modelos comerciales que apuestan por incorporar un motor eléctrico, así como numerosos proyectos DIY (Do it yourself, o "Hazlo tú mismo" en español) que buscan adaptar motocicletas ya existentes.

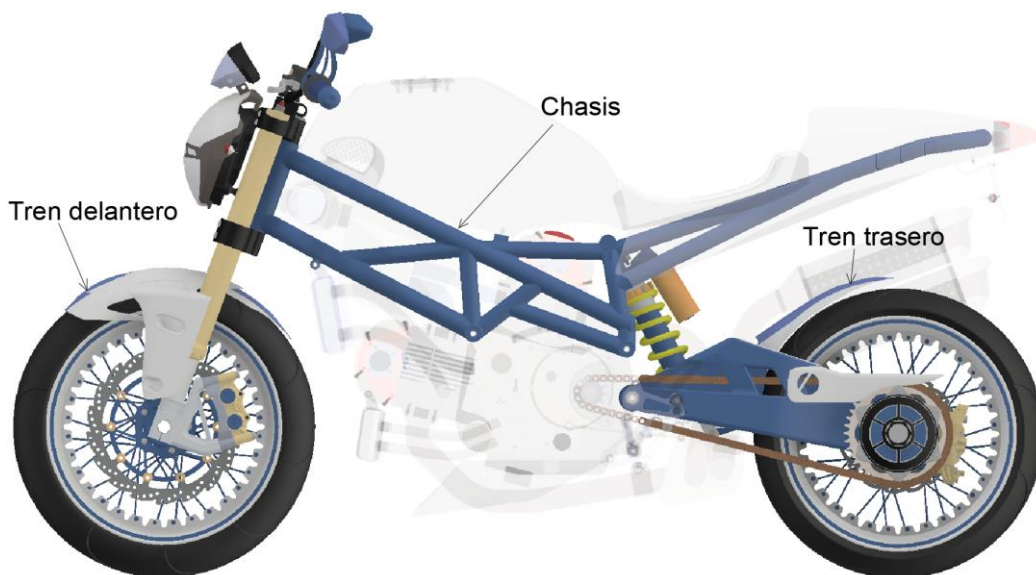
En lo que a este trabajo concierne, el estudio se va a centrar en analizar los diferentes chasis empleados en diversos modelos de motocicletas eléctricas en la actualidad.

### 4.1. DEFINICIÓN DE CHASIS

Antes de comenzar a trabajar es necesario concretar el objeto de estudio para delimitar y acotar el alcance del proyecto, de forma que podamos determinar los requisitos funcionales.

Una motocicleta es definida como un vehículo automóvil de dos ruedas en el que, habitualmente, únicamente es motriz la trasera. De esta manera, la rueda delantera queda libre para actuar sobre la dirección de la marcha cambiando su posición.

Por tanto, tenemos una clara diferenciación entre el tren delantero, encargado principalmente de la dirección, y el tren trasero, que es el que proporciona la propulsión. El chasis es el elemento que une estos dos subensamblajes.



*Ilustración 4: Estructura de una motocicleta (Fraboulet, 2017)*

El chasis es aquella estructura que proporciona integridad, uniendo todos los elementos en un único ensamblaje y sirviendo como esqueleto que da forma a la moto. Debe ser capaz de alojar todos los componentes y cumplir requisitos tanto estáticos como dinámicos, garantizando un control de dirección preciso, buen agarre, maniobrabilidad y confort.

Como cargas estáticas que el chasis debe soportar nos encontramos el peso de la propia moto y del piloto, mientras que los esfuerzos dinámicos se generan en las situaciones de aceleración, frenada y paso por curva. Esto requiere una alta rigidez y resistencia, que evite deformaciones y proporcione seguridad al piloto. (Foale, 2002, pág. 18)

Cabe destacar la diferenciación entre chasis y subchasis. Aunque en muchas motocicletas estos elementos se encuentren unidos en una sola pieza, entendemos

como subchasis a la estructura anclada o soldada al chasis sobre la que se coloca el colín para dar asiento al piloto.

## 4.2. ANTECEDENTES

Desde los primeros prototipos del Siglo XIX, las motocicletas han experimentado un gran avance. El chasis ha evolucionado desde aquellas primeras adaptaciones en las que se incluía una máquina de vapor a una bicicleta, sucedidas por la proliferación de los motores de combustión.

Actualmente, los vehículos eléctricos están adquiriendo una gran importancia que ha permitido un aumento en la investigación, el desarrollo y la comercialización de estos. Por lo tanto, se procede a estudiar aquellos proyectos que ya se han encontrado con la necesidad de diseñar e implementar un chasis para una motocicleta eléctrica de altas prestaciones.

### 4.2.1. *EUPLA Racing Team*

Este trabajo de fin de grado enfoca su realización en el desarrollo de la tercera motocicleta eléctrica de competición del equipo EUPLA Racing Team para la VI edición del campeonato internacional MotoStudent.

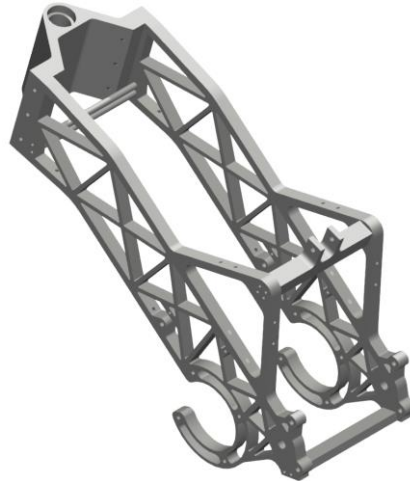
Utilizando como fundamento la documentación recopilada en la participación de las dos ediciones anteriores, se busca construir un chasis que se adecúe a las condiciones actuales que plantea la organización del campeonato. Por tanto, para su desarrollo se toma como base el trabajo anterior del equipo y toda su bibliografía.

#### 4.2.1.1. *IV edición (2015-16)*

La IV edición del campeonato internacional MotoStudent fue la primera en incorporar la categoría eléctrica. De esta manera, el equipo EUPLA Racing Team presentó su primer prototipo para competir en dicha división, con elementos tan importantes como la batería o el chasis realizados con un diseño propio.

Debido a carecer de antecedentes propios en la fabricación de motocicletas, se decidió realizar un diseño sencillo y económico, pero funcional y resistente.

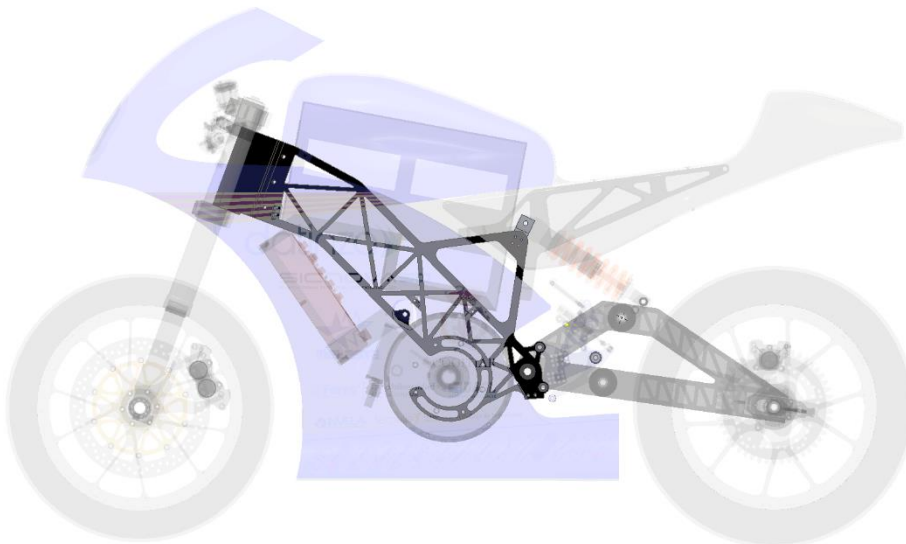
Se optó por usar un chasis de tipología de doble viga frente a un monoviga o tubular, en un proceso de selección en el que se valoraron criterios como la facilidad de fabricación o el coste.



*Ilustración 5: Chasis de EUPLA Racing Team en la edición IV*

La fabricación del chasis se realizó en su mayoría mediante corte por agua, de manera que el proveedor realizase el corte de la plancha de material bruto y lo entregase finalizado. Gracias a esto, se diseñó una estructura con dos vigas simétricas unidas entre sí mediante travesaños, prescindiendo de soldaduras en favor de los pernos. Así se simplifica el montaje y desmontaje, facilitando las operaciones de mantenimiento.

Esta geometría proporciona un gran espacio libre en el interior del chasis, permitiendo alojar la batería con facilidad. Además, se aprovecha la simetría de las vigas para dar soporte al motor eléctrico, que se sujeta atornillado a ambas paredes.



*Ilustración 6: Estructura de EUPLA Racing Team en la edición IV*

El principal inconveniente de este tipo de unión son las vibraciones, puesto que podrían aflojar los pernos con el uso. Sin embargo, debido a la naturaleza de la

competición, esto se palió mediante el desmontaje previo a la carrera de todos los tornillos y el uso de fijador de roscas.

El material utilizado en la estructura fue aluminio 6082 T6, con un límite elástico de 240MPa y una densidad de 2,70g/cm<sup>3</sup>.

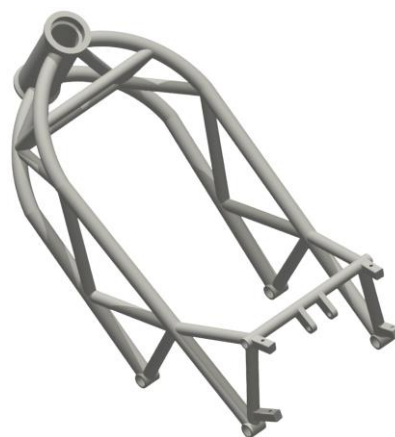
Los cálculos de validación del chasis se realizaron mediante análisis por elementos finitos empleando el software Autodesk Inventor, previa determinación de los esfuerzos que sufriría la motocicleta en las condiciones de aceleración máxima, frenada máxima y paso por curva mediante el estudio de cargas descrito por Vittore Cossalter. Para el análisis, tanto los empotramientos como las cargas se efectuaron únicamente en los puntos de unión con los trenes delantero y trasero, es decir, sobre la pipa de dirección y el eje del basculante.

Cabe destacar el descontento del equipo con las capacidades y fiabilidad del módulo de análisis estructural de Inventor, razón por la cual se decidió emplear Ansys en su lugar para la siguiente edición. (EUPLA Racing Team, 2016)

#### *4.2.1.2. V edición (2017-18)*

El segundo prototipo del equipo EUPLA Racing Team vino con la V edición del campeonato internacional MotoStudent, de nuevo en la categoría eléctrica. Con la experiencia adquirida en el desarrollo del primer prototipo, se estableció como objetivo principal mejorar la fiabilidad del conjunto electrónico y del acumulador, quedando el apartado mecánico libre para la experimentación.

Gracias a esto, la línea de diseño del chasis tomó un cambio de dirección de 180°, realizando un diseño completamente nuevo. Se escogió una tipología tubular que, al requerir de un ensamblaje mediante soldadura, propició la sustitución del aluminio a favor del acero.

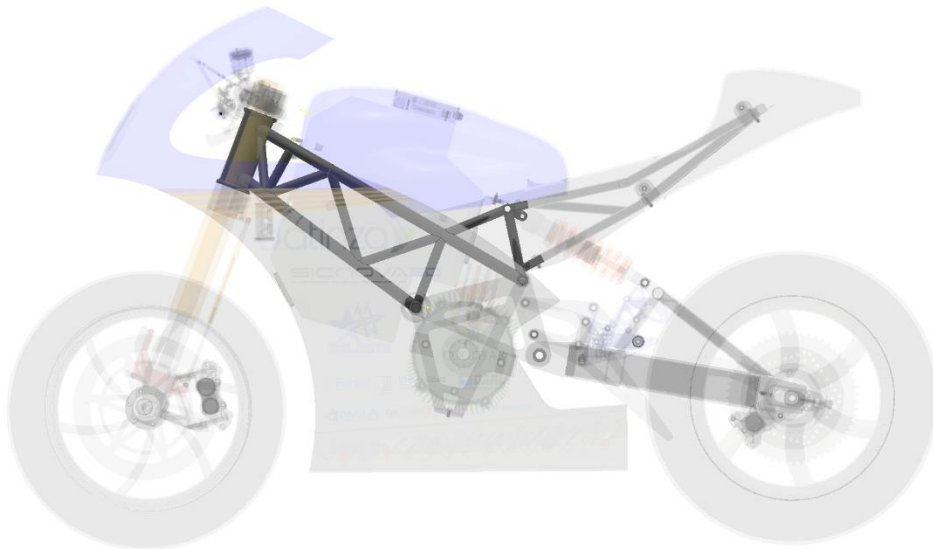


*Ilustración 7: Chasis de EUPLA Racing Team en la edición V*



La propia naturaleza de los chasis tubulares requiere realizar la fabricación mediante soldadura, por lo que es necesario preparar las piezas antes de proceder a su unión. Para ello, los tubos se cortaron mediante laser, con el objetivo de que se generase un biselado preciso para maximizar la resistencia de los cordones de soldadura.

El calor que se genera durante el proceso de soldadura puede producir deformaciones en los tubos que, por pequeñas que sean, son capaces de afectar a la geometría general de la moto y, con ello, a su rendimiento. Por lo tanto, para asegurar que se mantiene la forma deseada en todo momento, se realizó una bancada que mantuviese los puntos de unión inmóviles en su posición correcta. Además, se facilitó el proceso de soldadura gracias a la proyección grabada a laser sobre la bancada del diseño del chasis en planta a tamaño real, para poder contar en todo momento con las cotas reales.



*Ilustración 8: Estructura de Eupla Racing Team en la edición V*

El material utilizado en la estructura fue acero 1.7218, con un límite elástico de 600MPa y una densidad de  $7.75\text{g/cm}^3$ , seleccionado debido a su extraordinaria capacidad de soldadura.

El principal inconveniente de este chasis es su peso puesto que, para otorgarle la suficiente rigidez como para soportar las cargas a las que iba a ser sometido, se estableció un espesor de 2mm para los tubos. Esto supuso un incremento de peso con respecto al planteado en un primer momento, resultando en una estructura cara y poco ligera. Sin embargo, este chasis resulta mucho más estético que el de la IV



edición por lo que, a pesar de ser inferior en el ámbito de la competición, resulta mucho más eficaz en exposiciones y eventos de cara a los patrocinadores.

Este componente estético se vio potenciado gracias a la capa de pintura azul utilizada para paliar la necesidad de aplicar un tratamiento superficial a la estructura para proteger el material del óxido y la corrosión, especialmente en las zonas de soldadura.

Una vez más, el estudio de cargas se basó en la obra de Vittore Cossalter. Sin embargo, en esta ocasión el software empleado para realizar los análisis por elementos finitos fue Ansys, lo que permitió obtener unos resultados mucho más precisos gracias a sus superiores capacidades con respecto al módulo de cálculo estructural de Inventor, empleado en la IV edición. Sin embargo, y pese al espesor extra que se le dio a los tubos del chasis, los resultados obtenidos reflejaban un peor comportamiento frente a las cargas que la anterior estructura.

## 4.2.2. Otros prototipos

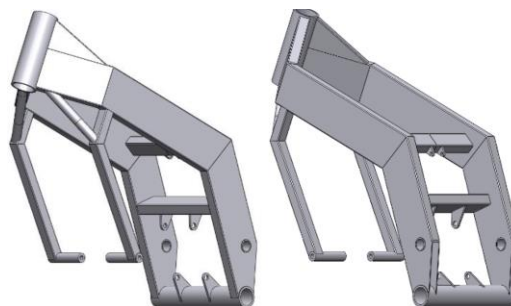
A lo largo de sus seis ediciones, en el campeonato MotoStudent han participado numerosos equipos, con cada vez una mayor afluencia.

Aunque la categoría eléctrica se inauguró hace tan solo dos ediciones, podemos estudiar un gran abanico de alternativas.

### 4.2.2.1. Universidad Politécnica de Valencia 2020 (Alcoy)

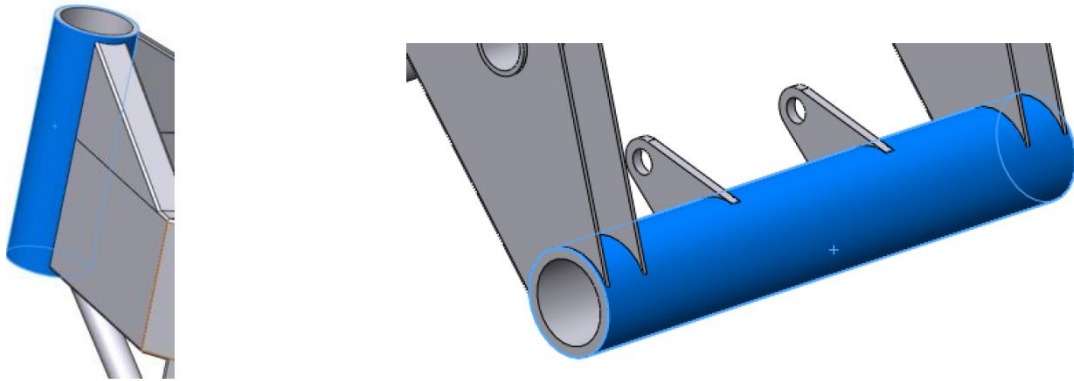
El chasis se desarrolló para el equipo Engineering Project Alcoy en la VI edición de MotoStudent, donde participan por tercera vez consecutiva.

Tanto el diseño como los cálculos estructurales se realiza en el software SolidWorks y se establece como objetivo mejorar las prestaciones del prototipo empleado en el año 2018. Tras realizar una comparativa entre diferentes modelos de chasis, con su correspondiente modelado y simulación, optan por un diseño de doble viga.



*Ilustración 9: Chasis de Engineering Project Alcoy en la edición VI (Soria Guijarro, 2020)*

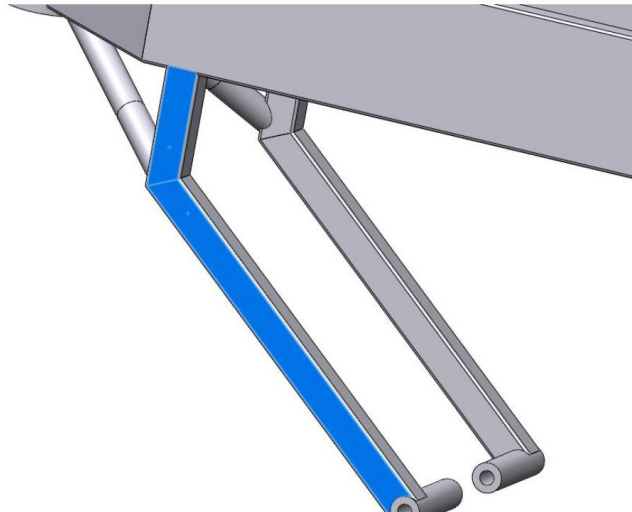
Sin embargo, a diferencia del primer chasis de EUPLA Racing Team, optan por emplear perfiles rectangulares de 2mm de espesor de aluminio, ampliando hasta los 7mm en el tubo de la pipa de dirección. Este mismo tubo lo reutilizaron en el eje del basculante para aportar un extra de rigidez a la estructura al emplearlo a modo de travesaño para unir ambas paredes.



*Ilustración 10: Tubos de Engineering Project Alcoy en la edición VI (Soria Guijarro, 2020)*

A pesar de la ligereza que implica un diseño mediante perfiles, es importante considerar la necesidad de subdividir las vigas principales en tres secciones diferentes. Estas secciones fueron mecanizadas mediante fresadora y taladro de columna, haciendo uso de brocas de hasta 60mm de diámetro para asegurar que todo encajase a la perfección sobre el banco de soldadura. Además, debido a la eliminación de algunas de las paredes de los perfiles al realizar estos cortes, se vieron obligados a incorporar un refuerzo en una zona cercana al eje del basculante, que se aprovechó para anclar el motor.

De la misma manera, tanto para realizar la sujeción del motor como del amortiguador trasero se sueldan pletinas y tubos mecanizados a perfiles rectangulares, previo posicionamiento en el potro de soldadura. En el caso de los tirantes que sirven como sujeción delantera del motor, es necesario añadir un perfil de refuerzo, por lo que optan por hacer uso de un tubo circular tras valorar otras alternativas, como una chapa de acero plegada.



*Ilustración 11: Anclajes del motor Engineering Project Alcoy en la edición IV (Soria Guijarro, 2020)*

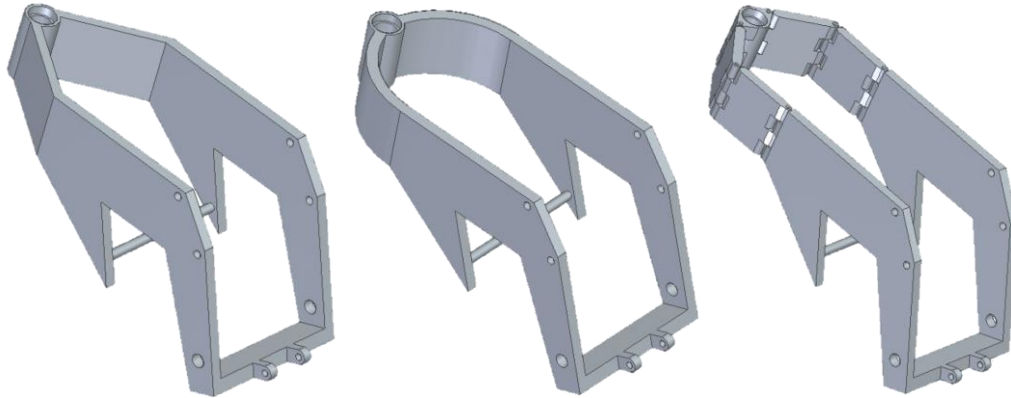
Para la fabricación de la estructura, el material seleccionado es el acero estructural S275 debido a la necesidad de garantizar una cierta rigidez. Sin embargo, las partes del chasis que más esfuerzos deben soportar, como las vigas de unión a la pipa o de sujeción del amortiguador, se realizan en perfiles de acero S355 con un espesor de 3mm

El soporte trasero superior del motor está formado por un perfil de 60x25 con 2 mm de espesor, igual que el anterior tiene soldados unos soportes a partir de una pletina de 5 mm de espesor donde irán alojados los tornillos de sujeción del motor, además de soportar el motor también añade rigidez uniendo las dos vigas perimetrales, este perfil va soldado al chasis previo posicionamiento en el potro de soldadura. (Soria Guijarro, 2020)

#### ***4.2.2.2. Escuela Técnica Superior de Ingeniería 2018 (Madrid)***

En el equipo de Madrid participante en la V edición se estableció como uno de los objetivos la realización de tres diseños diferentes para poder analizar el comportamiento de cada uno de ellos por separado.

Aunque todos ellos siguen una tipología de doble viga, la diferencia principal radica en las uniones con la pipa de dirección, que se realizan tanto en ángulo recto, como curvada o modular. El chasis modular que plantean tiene su origen en la participación de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería en ambas categorías del campeonato internacional MotoStudent, debiendo desarrollar tanto una motocicleta de combustión como una eléctrica. Las diferencias en el volumen y dimensión de ambos motores los llevan a plantear una estructura cuyo espacio interior pueda verse modificado según las necesidades del proyecto.



*Ilustración 12: Chasis de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería en la edición V (Reinares Gozalo, 2018)*

Los materiales que estudiaron fueron el aluminio 6082 T6 y la fibra de carbono y, tras realizar una comparativa en profundidad entre ambos, se determina que el más idóneo para la fabricación del chasis es el aluminio debido a la diferencia de precio de casi 12 veces, en detrimento de sufrir un aumento de peso de 3.5kg

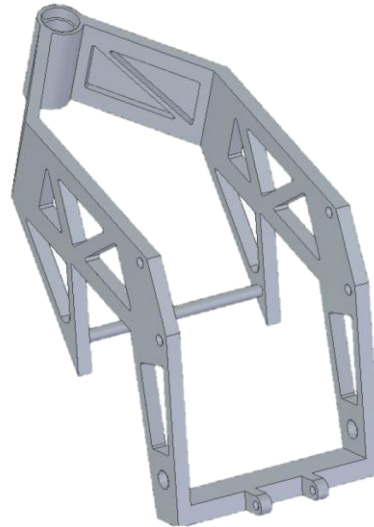
	Aluminio 6082 T6	Fibra de Carbono
Módulo de Young [GPa]	70	380
Límite elástico [MPa]	250	2000
Resistencia a tracción [MPa]	300	2400
Resistencia a compresión[MPa]	300	4000
Coefficiente de Poisson [-]	0.3	0.1
Densidad [ kg/m <sup>3</sup> ]	2700	1820
Precio [€/kg]	2.3	42.25

*Ilustración 13: Comparativa de materiales Escuela Técnica Superior de Ingeniería (Reinares Gozalo, 2018)*

Para la realización de los análisis por elementos finitos se hizo uso del software Ansys, estudiando la situación de paso por curva, frenada máxima y paso por obstáculo. Sin embargo, se encontraron ante la imposibilidad de analizar el chasis modular mediante elementos finitos, por lo se alcanzaron las siguientes conclusiones:

- Ambos chasis resultan válidos al superar la tensión máxima admisible en menos del 5%, con las cargas mayoradas, y un desplazamiento de apenas 4.5mm en la situación de frenada máxima
- El chasis curvado reporta una tensión equivalente de Von Mises un 56.6% mayor que el recto, por lo que se decide usar este último.

Conocidas las tensiones y desplazamientos que experimentará el chasis y sus zonas de aplicación, se realiza una optimización topológica mediante una serie de vaciados hasta alcanzar un diseño definitivo con peso reducido.



*Ilustración 14: Chasis final Escuela Técnica Superior de Ingeniería en la edición V (Reinares Gozalo, 2018)*

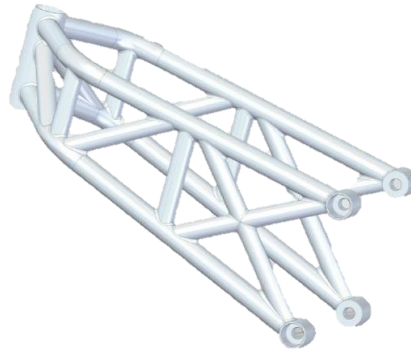
De esta manera, consiguen un chasis de apenas 6.96kg cuya tensión máxima es de 93.945MPa, con un desplazamiento de tan solo 0.72mm (Reinares Gozalo, 2018)

#### ***4.2.2.3. Universidad Politécnica de Cataluña 2015 (Villanueva y Geltrú)***

Se realiza el diseño completo de la motocicleta eléctrica con la finalidad de, en un futuro, analizar y verificar cada uno de los elementos por separado, asegurando así el cumplimiento de todos los requisitos, pero tomando dicho trabajo como referencia. La finalidad no es la competición en MotoStudent, por lo que no sigue la misma normativa que la que incumbe a este Trabajo de Fin de Grado.

La tipología seleccionada para el desarrollo de este chasis es tubular, por lo que se desestimará utilizar aluminio como material. Al estar formado por un entramado de tubos soldados, las aleaciones de aluminio más utilizadas y con mejores propiedades, como la 7075-T6 o la 6061-T6 presentan peor soldabilidad e incluso, alguna de ellas, no pueden soldarse. Por lo tanto, se opta por utilizar acero al cromo molibdeno.

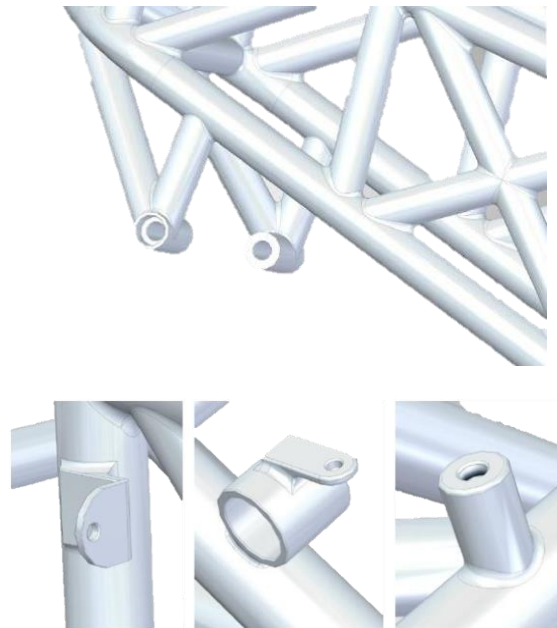
Una vez determinado el material, se realiza un diseño progresivo, en el que en primer lugar se define la pipa de dirección con los alojamientos de los rodamientos correspondientes. Tras ello, el siguiente paso es la realización de los anclajes del motor mediante tubos de acero de 3.5mm de espesor, unidos a la pipa con tirantes de 2mm de grosor que envuelven a la batería lateralmente. Con la finalidad de aportar rigidez al conjunto, se establece una celosía de tubos de 2mm de espesor para que trabajen tanto a tracción como a compresión



*Ilustración 15: Estructura principal de Àlex Salmerón Ruiz (Salmerón Ruiz, 2015)*

A pesar de esto, se decide reforzar la zona delantera debido a las cargas que transmitirá la pipa de dirección, por lo que se opta por dos tubos a modo de largueros que unan ambos laterales.

Una vez definida la estructura per se, el siguiente paso llevado a cabo fue diseñar los anclajes de las diferentes partes de la motocicleta. Mediante tubos roscados se posicionan las sujeciones de la batería, tanto en la zona trasera como en la delantera mediante una extensión de la batería con una nueva triangulación de tubos, cuya rigidez se verá aumentada gracias a un eje transversal.



*Ilustración 16: Detalles de la estructura de Àlex Salmerón Ruiz (Salmerón Ruiz, 2015)*

Finalmente, se incorporan una serie de lengüetas fabricadas en chapa de acero que serán soldadas a la estructura para poder sujetar elementos como el cubredepósito o el carenado. (Salmerón Ruiz, 2015)

### 4.2.3. Modelos comerciales

La comercialización de los vehículos eléctricos en los últimos años ha dejado numerosos exponentes de motocicletas eléctricas que, debido a la necesidad de incluir una batería y un motor diferentes a los convencionales, han presentado diferentes soluciones en la implementación de su chasis.

#### 4.2.3.1. Energica Ego

La primera motocicleta que viene a la cabeza cuando piensas en competición eléctrica es la Energica Ego Corsa. Se trata de la variante de competición de la motocicleta eléctrica comercial Energica Ego, que participa en el campeonato de Moto E con una potencia de 120kW con la que es capaz de alcanzar los 100km/h en menos de 2.8 segundos, llegando hasta los 270km/h. (MotorBike Magazine, 2019)



*Ilustración 17: Energica Ego Corsa (MotorBike Magazine, 2019)*

Esta moto cuenta con un chasis de tipología tubular fabricado en acero, con un entramado de tubos unidos entre sí mediante soldadura. Algunos de los tubos requieren un proceso de curvatura para darles la forma deseada.

Por debajo del carenado podemos observar cómo se unen los diferentes componentes, resultando especialmente llamativa la sujeción de la batería, que se encuentra sujeta únicamente por sus laterales.





*Ilustración 18: Energica Ego Corsa sin carenado (mamaktalk, 2019)*

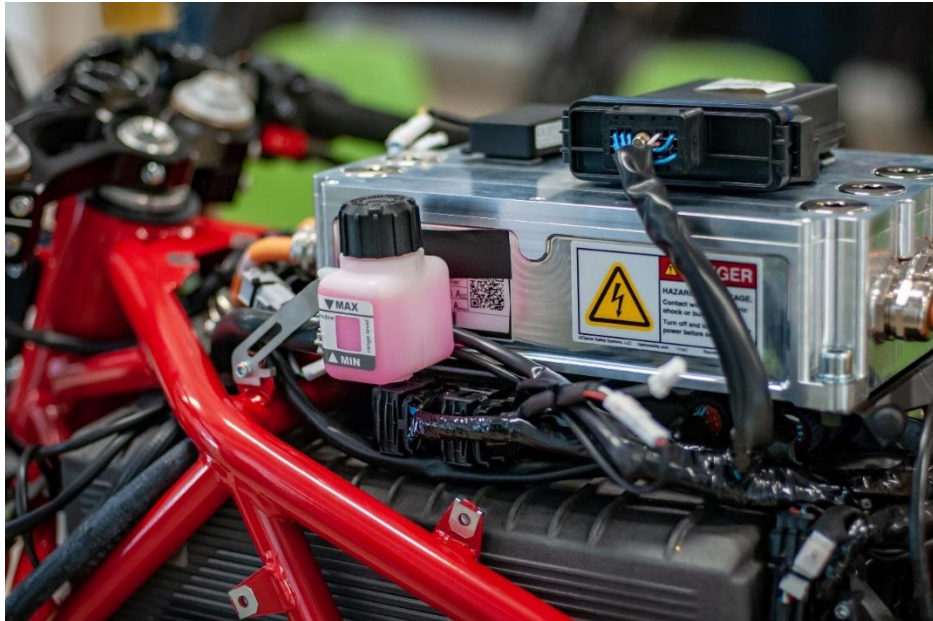
La sujeción tanto de la batería como la del motor se realizan mediante travesaños que se anclan a unos pequeños tubos soldados en posición transversal en los laterales del chasis. Por lo tanto, estos anclajes se sueldan perpendiculares a la dirección del resto de tubos de la estructura para alojar los ejes que soportan los demás componentes de la motocicleta.



*Ilustración 19: Detalles de los anclajes de la Energica Ego Corsa (Beeler, Under the Hood of the Energica Ego, 2019)*

La pipa se encuentra soldada directamente a la estructura tubular y se incluyen también pequeñas pestañas de chapa para poder fijar los diferentes componentes eléctricos que permiten el correcto funcionamiento de la motocicleta.





*Ilustración 20: Detalles de la pipa y batería de la Energica Ego Corsa (Beeler, Under the Hood of the Energica Ego, 2019)*

Como podemos comprobar, el chasis de la Energica Ego se encuentra fabricado a medida para poder alojar la batería, con una gran apertura lateral y totalmente vacío en el eje vertical. Esto permite un gran margen a la hora de dimensionar la batería ya que, virtualmente, tenemos todo el espacio que queremos para añadir celdas u otros componentes de forma vertical.

Para realizar el anclaje de otros elementos se sueldan tanto pequeñas chapas agujereadas como tubos en posición transversal. La inclusión de estos tubos permite realizar la sujeción mediante travesaños que aportarán un extra de rigidez al conjunto y añadirán una mayor resistencia estructural, mientras que las pestañas de chapa otorgan una gran versatilidad al poder añadir todas las que queramos conforme surjan nuevas necesidades en el periodo de fabricación.

#### 4.2.3.2. Zero S

La marca de Motocicletas eléctricas Zero S Motorcycles lanzó en 2009 su modelo Zero S que desde entonces se ha establecido como una de las más vendidas en su sector, sentando un precedente para todas las motocicletas eléctricas de carretera comerciales.



*Ilustración 21: Zero S (Zero Motorcycles, 2020)*

Desde su lanzamiento, la Zero S ha ampliado su familia ofertando incluso modelos enfocados al motocross. En su revisión de 2020, esta motocicleta de 11kw cuenta con una autonomía de casi 300km y una velocidad punta de 139km/s por un precio base de 16570€.

A pesar de no ser un modelo orientado a la competición, se trata de una de las motocicletas eléctricas que mayor impacto ha generado en los últimos años por lo que es conveniente prestarle especial atención.

El chasis está fabricado en aluminio anodizado y tiene un peso total de 10.5kg. Su estructura de doble viga está constituida por la combinación de piezas elaboradas mediante fundición y tubos cuadrados con una anchura de apenas una pulgada (25.4mm) que se unen mediante soldadura.



*Ilustración 22: Chasis, basculante y subchasis de la Zero S (MediaWiki, 2020)*

La primera diferencia de este chasis con otros utilizados en motocicletas eléctricas es la presencia de una cuna similar a la que encontraríamos en un vehículo de combustión para sujetar el motor. En este caso, es utilizado para alojar la batería con tan solo cuatro tornillos en la parte inferior de forma que sea fácilmente extraíble por arriba.



*Ilustración 23: Montaje de la batería de la Zero S (NewZeroland, 2019)*

Al haber empleado la mayor parte de la cuna para alojar la batería, el motor debe desplazarse hacia la parte trasera de la motocicleta. La solución de Zero Motorcycles es hacer coincidir la posición del eje del motor con el eje del basculante. Como el motor se encuentra en el lugar en el que habitualmente está el eje del basculante atravesando el chasis transversalmente, en este caso se elimina dicha barra para unir de forma separada ambas paredes del basculante a la correspondiente pared del chasis. Es decir, el motor se coloca en medio de los dos anclajes al basculante, siendo concéntricos el eje del piñón y el eje del basculante.



*Ilustración 24: Detalle del eje del basculante de la Zero S (Zero Motorcycles, 2020)*

Esta unión permite un mayor aprovechamiento del espacio y, además, se evita perder rigidez por la carencia de un eje transversal al utilizar el motor como elemento estructural, anclándolo a ambas vigas del chasis.

También cabe destacar el tubo hueco que une ambas paredes por la parte superior. Este travesaño es utilizado como anclaje del amortiguador y, en los modelos de 2012-2014, servía para guardar el cable de carga. (MediaWiki, 2020)

#### ***4.2.3.3. Mission R***

La Mission R era la motocicleta deportiva que compitió junto a la Lightning LS-218 E por la mayor autonomía del mercado con 370km, a un precio de 23000€. Con el objetivo de lanzar una primera tirada de 40 unidades de su versión de competición, en 2015 Mission Motorcycles entró en bancarrota y apenas se pudieron llevar a cabo unos pocos prototipos. (Somoza, 2015)

Sin embargo, el diseño de la parte ciclo de esta motocicleta es totalmente único y permite aprovechar al máximo la geometría de la batería.





*Ilustración 25: Mission R (Rasopariso, 2015)*

Aunque a primera vista pueda parecer que el chasis de esta motocicleta es de tipología tubular como el de la Energica Ego, debajo del carenado esconde un diseño completamente diferente que, realmente, se asemeja más a un chasis de doble viga.

La estructura tubular que vemos se limita tan solo a las paredes laterales, siendo la pipa un componente totalmente independiente y actuando el motor como elemento estructural.



*Ilustración 26: Planta y perfil de la Mission R (Cathcart & Wing, 2012)*

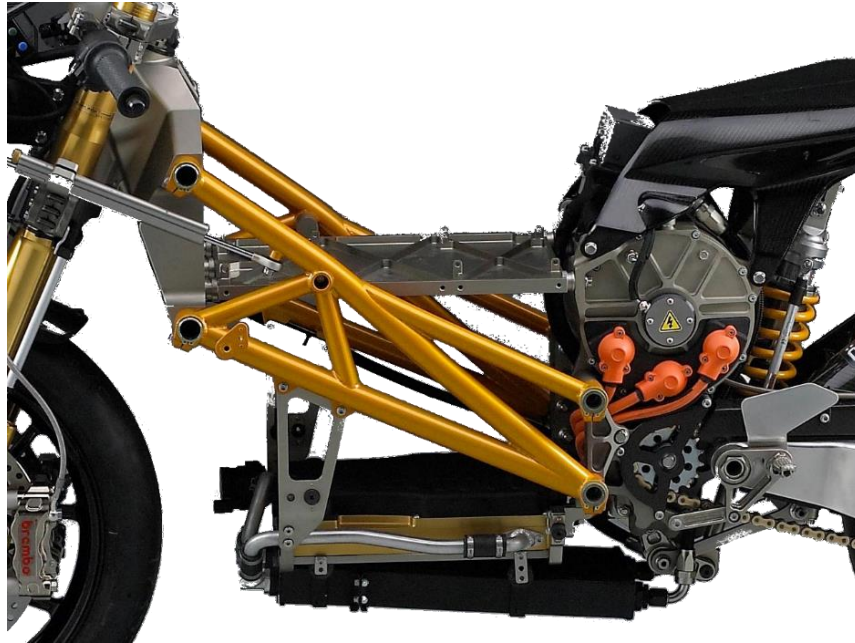
Sus creadores declararon que el diseño de la Mission R está concebido para aunar tres conceptos:

- **Los componentes básicos:** motor, chasis, suspensión, ruedas, frenos, manillar, reposapiés...
- **La geometría:** relación espacial entre los diferentes componentes, sus medidas y las trayectorias en las que los componentes se mueven. Avance, el lanzamiento de la horquilla, la distancia entre ejes, los recorridos de las ruedas, el centro de gravedad...
- **Los "paquetes":** espacios que ocupan los componentes y su geometría, que deben encajar entre sí. Tenemos el paquete ergonómico, el aerodinámico y el de montaje y acceso a los componentes. (Font, 2011)

Gracias a ello, esta motocicleta presenta un diseño único en el que todos sus componentes están concebidos para ser instalados en una posición y con una finalidad concreta. Es un vehículo que ha sido diseñado con una visión holística y de conjunto, que es posible únicamente gracias a una gran simplicidad difícilmente perceptible a simple vista.

Las vigas laterales del chasis están formadas por una estructura tubular de acero al cromo molibdeno y su principal propósito es la unión de la pieza frontal de aluminio que forma la pipa con el motor. (Beeler, Mission R Electric Superbike Breaks Cover, 2010)

La estructura tubular está formada por dos barras principales a las que se le sueldan otras tres para aportar un extra de rigidez, encontrando en los extremos unas bridas que servirán como sujeción principal para los demás elementos.

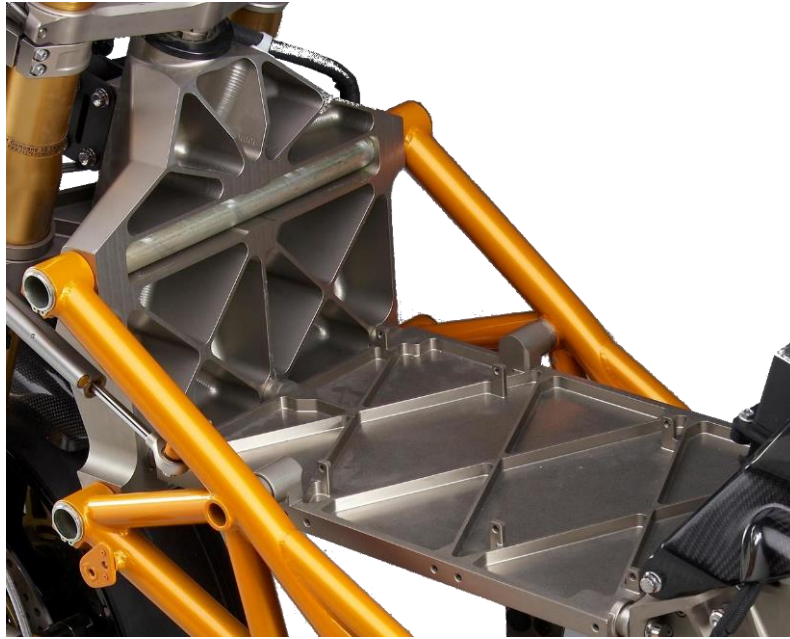


*Ilustración 27: Chasis de la Mission R (Font, 2011)*

Este diseño modular proporciona una gran libertad y versatilidad ya que, por ejemplo, en caso de incorporar una batería más ancha únicamente habría que adaptar la pipa de dirección para poder alojarla. No sería necesario un rediseño completo.

Al igual que sucedía en la Zero S, el basculante se encuentra anclado únicamente a las paredes de, en este caso, el motor. Gracias a esto, es posible implementar un sistema de bieletas para la suspensión trasera en el hueco libre al prescindir de un eje transversal.

Además, el haber separado las vigas laterales de la pipa ha permitido diferenciar completamente ambos elementos. Mientras las paredes están soldadas en barras de acero, la pipa se encuentra mecanizada desde un macizo de aluminio, permitiendo reforzarla frente a los grandes esfuerzos que soportará durante la conducción mediante un patrón de vaciado triangulado.



*Ilustración 28: Detalle de la pipa de la Mission R (Font, 2011)*

La Mission R es una motocicleta única que presenta un diseño modular, efectivo y elegante. A pesar de ello, a nivel de producción industrial su fabricación resulta cara al no unificar los procesos de fabricación. Como en nuestro caso la fabricación de la motocicleta es de una única tirada, el coste añadido por la diversificación de procesos no debería suponer mayor problema, como sí lo sería en caso de querer realizar una gran producción.

### 4.3. TIPOS DE CHASIS

En el estudio de los antecedentes hemos observado que la mayoría de las motocicletas deportivas incorporan un chasis de tipología tubular o de doble viga. Sin embargo, existen otros tipos de estructuras que podemos considerar para nuestro diseño.

En general, clasificaremos los chasis según dos conceptos diferenciados: su integridad estructural y la propia estructura. (Rosiña Lopez, 2016)

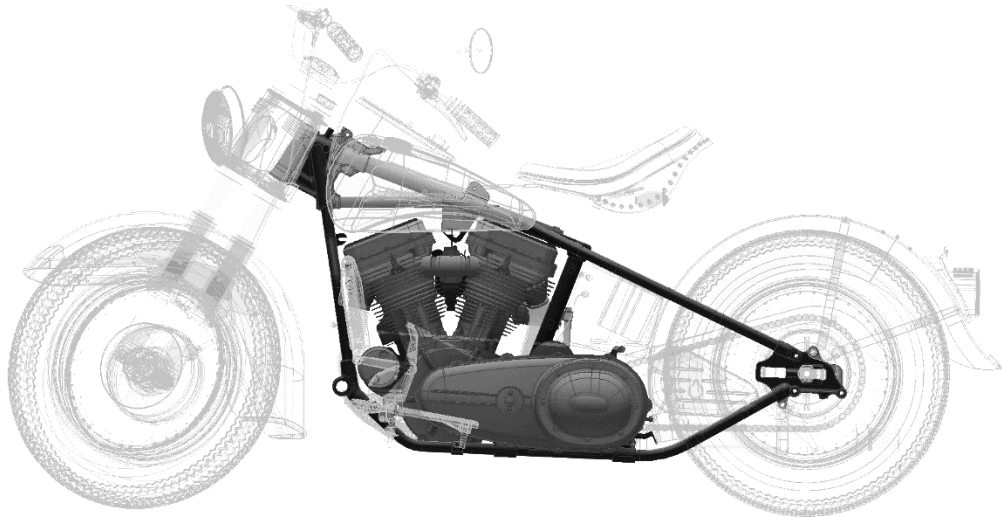
#### 4.3.1. *Según su integridad estructural*

El chasis es el principal elemento estructural de la motocicleta, y se encarga de vincular todos los elementos garantizando la resistencia del conjunto. La diferenciación en cuanto a la integridad estructural depende de si el motor tan solo está sujetado por el chasis o si, en cambio, también actúa como elemento estructural del vehículo.



#### 4.3.1.1. Portantes

Los chasis portantes son aquellos que sirven de esqueleto a la motocicleta en su totalidad. Es decir, el chasis es el único elemento que resiste los esfuerzos estructurales derivados de componentes como el basculante o el subchasis.



*Ilustración 29: Chasis portante (Stonehocker, 2011)*

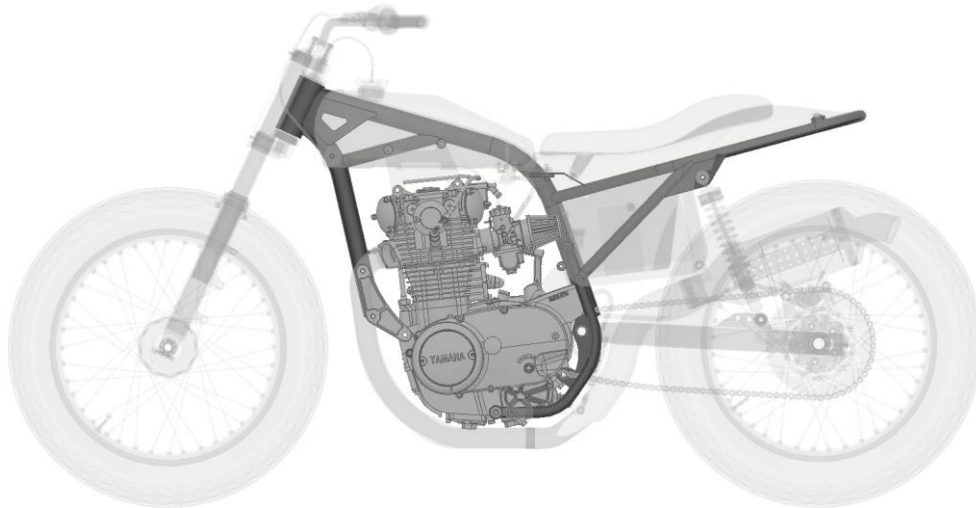
Por lo tanto, en estos chasis el motor se encuentra sujeto por la estructura y sobre él no se ejerce ninguna carga derivada del uso habitual de la motocicleta.

Todos los componentes del vehículo deben estar vinculados y sostenidos por el chasis, incluido el motor.

#### 4.3.1.2. Autoportantes

Se entiende como un chasis autoportante como aquel en el que el motor actúa como elemento estructural. Esto quiere decir que recibirá esfuerzos provenientes de la conducción.

Debido a su propia naturaleza, el motor es un elemento muy rígido y resistente por sí mismo. Los chasis autoportantes se aprovechan de esto para aligerar el peso mediante la reducción del tamaño del chasis, permitiendo que sea el propio motor el que mantenga la integridad estructural y absorba parte de los esfuerzos de la motocicleta.



*Ilustración 30: Chasis autoportante (Stéphane, 2020)*

A pesar de las grandes ventajas que aporta esta tipología, limita completamente el diseño a la propia geometría del motor, que generalmente viene dada por el fabricante y es invariable.

Además, los chasis autoportantes buscan establecer como principal elemento estructural el componente con mayor masa de toda la motocicleta que, en el caso de una moto de combustión, sería el motor. Sin embargo, en un vehículo eléctrico la batería suele tener el mayor peso de todo el conjunto, seguido del motor.

### **4.3.2. Según su estructura**

El chasis es el principal elemento estructural de la motocicleta, y se encarga de vincular todos los elementos garantizando la resistencia del conjunto. La diferenciación en cuanto a la estructura depende de su propia geometría y del tipo de material base con el que está construido.

#### **4.3.2.1. Tubular**

Los chasis tubulares son aquellos formados por un entramado de tubos, ya sean circulares o rectangulares, que crean una envolvente alrededor del motor y la batería hasta conectar el basculante con la pipa de dirección.

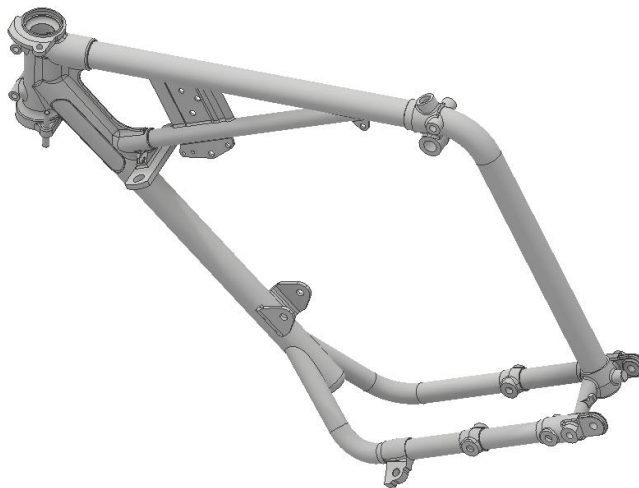
El material más extendido son las aleaciones de aceros al cromo molibdeno, puesto que permite una buena soldadura de los tubos entre sí. La distribución de estos es fundamental para alcanzar un comportamiento dinámico adecuado, por lo que es habitual aplicar diferentes estrategias de diseño que permitan repartir los esfuerzos.

Se trata de una tipología que, por sí misma, no es especialmente resistente. Por esta razón, se tiende a utilizar tubos de bajo diámetro, compensando la pérdida de

rigidez con la implementación del motor como elemento estructural. (EUPLA Racing Team, 2016)

#### 4.3.2.1.1. *Monoviga de simple cuna*

Se le conoce como chasis monoviga de simple cuna, ya que una única viga situada encima del motor es la que se encarga de unir la pipa de dirección con el basculante. La cuna, por su parte, se encarga de soportar el peso del motor y de proporcionar una mayor rigidez y consistencia al conjunto.



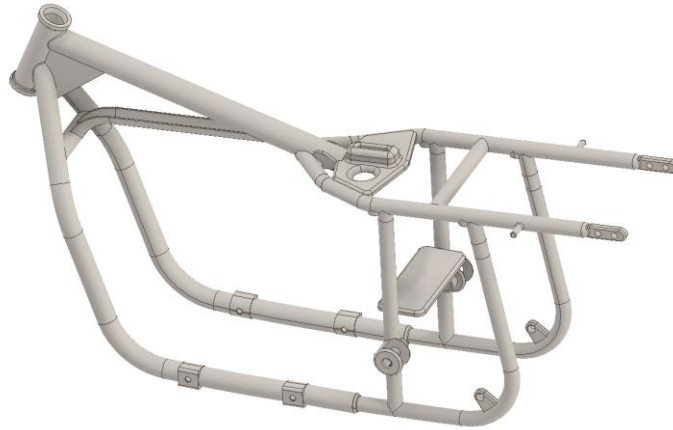
*Ilustración 31: Chasis monoviga de simple cuna (Fall, 2013)*

El chasis de simple cuna es aquel en el que parte un único tubo desde la pipa de dirección hacia la parte inferior. Este tubo pasa por debajo del motor y, generalmente, se bifurca en dos tramos para facilitar su anclaje.

Se trata de una estructura muy económica pero poco rígida, por lo que es habitual encontrarla en motocicletas de bajas prestaciones.

#### 4.3.2.1.2. *Monoviga de doble cuna*

Un chasis monoviga de simple cuna es aquel en que una única viga situada encima del motor es la que se encarga de unir la pipa de dirección con el basculante. La cuna, por su parte, se bifurca en todo su recorrido para soportar el peso del motor y proporcionar una mayor rigidez y consistencia al conjunto.



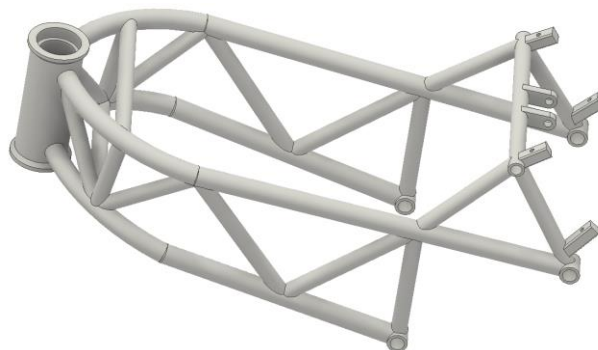
*Ilustración 32: Chasis monoviga de doble cuna (Logan, 2021)*

La diferencia con el chasis de simple cuna es que, en el chasis de doble cuna, de la pipa de dirección parten dos tubos hacia la parte inferior en lugar de uno solo. Estos tubos abrazan el motor por su parte inferior y finalizan con la unión a la viga superior, ya sea en el eje del basculante o en el subchasis.

Es una estructura más sólida y rígida que la de simple cuna, y se utiliza en motocicletas de grandes cilindradas de tipo custom, ya que permiten alojar un motor de gran tamaño con relativa facilidad. Para facilitar su montaje, en ocasiones esta parte inferior va atornillada.

#### ***4.3.2.1.3. Multitubular o triangulado***

Se entiende como chasis multitubular o triangulado a aquel formado por dos vigas compuestas por tubos que abrazan lateralmente la batería y el motor. La colocación de los tubos, que suelen ser de acero al cromo molibdeno con sección circular, se dispone de forma triangulada a modo de celosía.



*Ilustración 33: Chasis multitubular (EUPLA Racing Team, 2018)*

La propia estructura de esta tipología de chasis requiere que la unión se realice mediante soldadura, por lo que es necesario diseñar la geometría de forma que los tubos solo trabajen a tracción o a compresión.

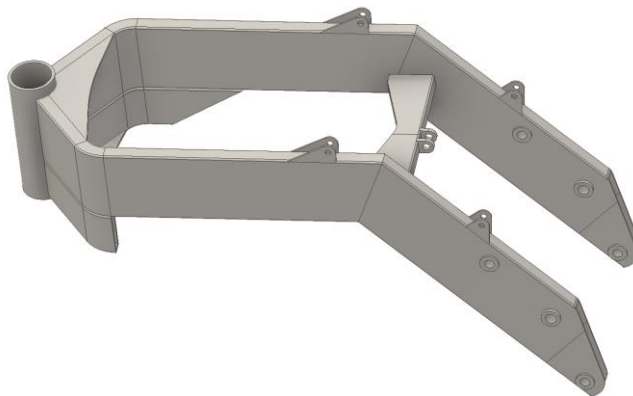
Se trata de una estructura que no es especialmente rígida, por lo que es muy importante crear una envolvente alrededor de la batería y/o el motor de forma que resistan parte de la carga. Es habitual encontrarnos con diseños autoportantes, en los que el motor actúa como elemento estructural para liberar de esfuerzos al chasis.

#### 4.3.2.2. Doble viga

Se trata de la tipología de chasis más extendida en el mundo de la competición. Consiste en el uso de dos vigas de sección rectangular que unen lateralmente la pipa de dirección con el basculante, creando una envolvente alrededor de la batería y el motor. Generalmente, son fabricados en aluminio.

##### 4.3.2.2.1. Perimetral

El chasis de doble viga perimetral consiste en la unión de la pipa con el basculante mediante el uso de dos vigas laterales, que pueden ser tanto huecas como macizas. En caso de contener material en todo su espesor, es habitual realizar vaciados parciales o totales para aligerar el peso de la estructura.



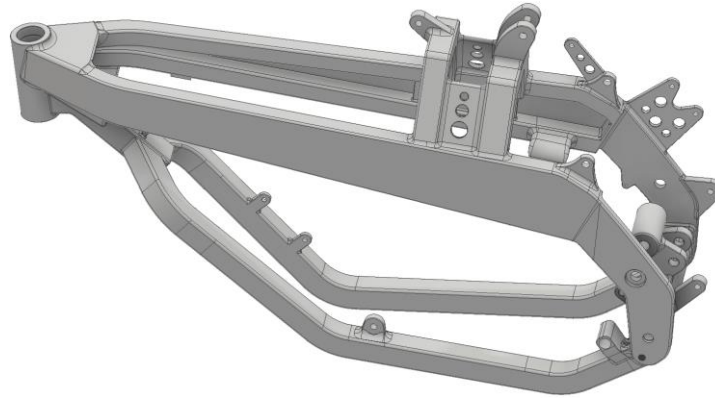
*Ilustración 34: Chasis de doble viga perimetral (Daer Design, 2020)*

Esta tipología de chasis abraza perimetralmente tanto la batería como el motor, sujetándolos de forma directa. El hecho de contener en su interior los elementos con mayor masa de toda la motocicleta permite que estos actúen como elemento estructural, aportando rigidez ante esfuerzos que tiendan a "plegar" el chasis.

Los puntos que reciben mayores cargas, como son la pipa o la unión con el basculante, deben estar reforzadas por lo que es habitual encontrar piezas fundidas y macizas en dichos puntos. Al tratarse, esencialmente, de un sistema formado tan solo por dos vigas unidas en dos puntos fijos, el análisis mediante elementos finitos resulta más sencillo que en otras tipologías de chasis.

#### 4.3.2.2.2. Cerrado

El chasis de doble viga cerrado se diferencia del perimetral por la presencia de dos tubos que parten de la pipa para abrazar al motor en los laterales de su parte inferior, a modo de cuna.



*Ilustración 35: Chasis de doble viga cerrado (Brazeau, 2015)*

Gracias a la inclusión de esta cuna, el conjunto es capaz de soportar mayores esfuerzos que en un chasis de doble viga perimetral, por lo que se reduce el espesor de las vigas para compensar el aumento de peso.

En el mundo de los campeonatos de velocidad está en desuso, sin embargo, cobra una gran importancia en las categorías Off-Road ya que aporta un extra de protección al motor ante posibles golpes.

#### 4.3.2.3. Monocasco

Se conoce como chasis monocasco a aquel sistema estructural en el que las cargas las soporta una fina capa externa, similar a como lo haría el cascarón de un huevo. Esta filosofía de diseño se emplea especialmente en barcos, aunque, gracias al avance de los materiales compuestos, poco a poco se ha comenzado a usar en otros sectores.





*Ilustración 36: Taylormade Carbon 2, con estructura monocasco (Beeler, Brouch Superior Debuts Familiar Moto2 Race Bike, 2013)*

En el mundo del motociclismo es relativamente habitual encontrar colines fabricados en fibra de carbono que no requieren de un subchasis, ya que se anclan directamente al chasis y son capaces de soportar el peso del piloto por sí mismos, sin necesidad de una estructura interna.

Un diseño monocasco como el del prototipo Taylormade Carbon2 permite unir el carenado y el chasis en una única pieza, aunando capacidades tanto estructurales como aerodinámicas en el mismo componente. Además, gracias a materiales como la fibra de carbono, al prescindir completamente de estructuras metálicas se consigue una gran disminución de peso.

Sin embargo, esta tipología de chasis todavía no ha sufrido una gran expansión ya que presenta importantes inconvenientes como la dificultad en su fabricación, la necesidad de incluir elementos metálicos en las uniones o el coste. (Crowe, 2009)

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1. MATERIALES

El material con el que se fabrica un chasis determina, junto a su geometría, características tan importantes como la rigidez, la densidad, la ductilidad, la resistencia, la vida a fatiga, el coste y los procesos de fabricación y ensamblado. Los requisitos de nuestro proyecto será lo que determine las características prioritarias y, con ello, podremos seleccionar aquel material que mejor se ajuste a nuestras necesidades para un diseño determinado. (Sánchez Catalán & Pons Ruiz, 2014)

#### 5.1.1. Acero

Son aceros aquellos materiales metálicos formados por una aleación hierro-carbono (Fe-C) en las cuales el contenido de carbono es inferior al 2%. En caso de superar este valor, se clasifican como fundiciones. Sin embargo, si el carbono es inferior al 0.03% se considera simplemente hierro.

Para mejorar la resistencia de los aceros al carbono, se puede realizar la adición de elementos de aleación como el níquel, el cromo, el aluminio, el molibdeno o el cobre.

Posee una densidad media cercana a  $7.8\text{g/cm}^3$  e históricamente ha sido el material más empleado en la fabricación de chasis y, aunque actualmente han cobrado mayor importancia otras alternativas, en la tipología tubular el acero sigue siendo el metal más extendido.

Se trata de un material muy tenaz y relativamente dúctil, que además es maleable y permite una buena mecanización. Que a día de hoy sea el material más utilizado en los chasis tubulares es debido, principalmente, a su soldabilidad.

Actualmente en España, la clasificación de los aceros se regula según la normativa UNE-EN 10020:2001, que establece un sistema de numeración para distinguir la composición del metal. Sin embargo, a efectos prácticos, la normativa más extendida sigue siendo la UNE-36010.



*Tabla 1: Clasificación de los aceros según UNE-36010 (Ingemecanica, 2021)*

Serie	Grupo	Denominación	Descripción
Serie 1	Grupo 1	Aceero al carbono	Son aceros al carbono y por tanto no aleados. Cuanto más carbono tienen sus respectivos grupos son más duros y menos soldables, pero también son más resistentes a los choques. Son aceros aptos para tratamientos térmicos que aumentan su resistencia, tenacidad y dureza. Son los aceros que cubren las necesidades generales de la Ingeniería de construcción, tanto industrial como civil y de comunicaciones.
	Grupos 2 y 3	Aceero aleado de gran resistencia	
	Grupo 4	Aceero aleado de gran elasticidad	
	Grupos 5 y 6	Aceros para cementación	
	Grupo 7	Aceros para nitruración	
Serie 2	Grupo 1	Aceros de fácil mecanización	Son aceros a los que se incorporan elementos aleantes que mejoran las propiedades necesarias que se exigen a las piezas que se vayan a fabricar con ellos como, por ejemplo, tornillería, tubos y perfiles para el caso de los grupos 1 y 2. Núcleos de transformadores y motores para los aceros del grupo 3. Piezas de unión de materiales férricos con no férricos sometidos a temperatura para los que pertenezcan al grupo 4. Piezas instaladas en instalaciones químicas y refinerías sometidas a altas temperaturas los del grupo 5.
	Grupo 2	Aceros para soldadura	
	Grupo 3	Aceros magnéticos	
	Grupo 4	Aceros de dilatación térmica	
	Grupo 5	Aceros resistentes a la fluencia	
Serie 3	Grupo 1	Aceros inoxidables	Estos aceros están basados en la adición de cantidades considerables de cromo y níquel a los que se suman otros elementos para conseguir otras propiedades más específicas. Son resistentes a ambientes húmedos, a agentes químicos y a altas temperaturas. Sus aplicaciones más importantes son para la fabricación de depósitos de agua, cámaras frigoríficas industriales, material clínico e instrumentos quirúrgicos, pequeños electrodomésticos, material doméstico como cuberterías, cuchillería, etc.
	Grupos 2 y 3	Aceros resistentes al calor	
Serie 5	Grupo 1	Aceero al carbono para herramientas	Son aceros aleados con tratamientos térmicos que les dan características muy particulares de dureza, tenacidad y resistencia al desgaste y a la deformación por calor. Los aceros del grupo 1 de esta serie se utilizan para construir maquinaria de trabajos ligeros en general, desde la carpintería y la agrícola (aperos). Los grupos 2,3 y 4 se utilizan para construir máquinas y herramientas más pesadas. El grupo 5 se utiliza para construir herramientas de corte.
	Grupos 2, 3 y 4	Aceero aleado para herramientas	
	Grupo 5	Aceros rápidos	
Serie 8	Grupo 1	Aceros para moldeo	Son aceros adecuados para moldear piezas mediante vertido en moldes de arena, por lo que requieren cierto contenido mínimo de carbono con el objetivo de conseguir estabilidad. Se utilizan también para el moldeo de piezas geométricas complicadas, con características muy variadas, que posteriormente son acabadas en procesos de mecanizado.
	Grupo 3	Aceros de baja radiación	
	Grupo 4	Aceros para moldeo inoxidable	

El contenido en carbono influye en gran medida en las propiedades de soldadura del acero. Por lo tanto, los aceros con buena soldabilidad suelen tener un bajo porcentaje en carbono y no están aleados.

Debido a las características que requiere un chasis de tipología tubular (que es, previsiblemente, el tipo de chasis en que se usaría este material), el acero más indicado para su fabricación estará contenido en los grupos F-21X y F-22X. Esto es debido a que presentan una elevada soldabilidad y capacidad de ser mecanizados, por lo que conseguiríamos una buena geometría sin comprometer propiedades estructurales. En caso de requerir una elevada resistencia en algún elemento concreto, como pueden ser ejes, conviene utilizar aceros del grupo F-12X.

Uno de los aceros más extendidos en la fabricación de chasis para motocicletas deportivas y de competición es el F-222 (1.7218 - 25CrMo4), que presenta una gran soldabilidad sin por ello comprometer la resistencia. Además de tener buena

resistencia a la corrosión, su límite elástico se sitúa alrededor de los 460MPa. (Soria Guijarro, 2020)

### 5.1.2. Aluminio

El aluminio es un metal muy dúctil y maleable de color blanco, que presenta una densidad de  $2.7\text{g/cm}^3$ . En este sentido, es claramente superior al acero. Sin embargo, aunque presenta una gran resistencia a la corrosión debido a una capa de óxido que se forma en contacto con el aire húmedo, el aluminio puro es un metal mecánicamente débil, que debe alearse con otros metales para mejorar su resistencia mecánica.

Se trata de un material que, a pesar de su facilidad para mecanizar, presenta dificultades para soldar. Esto puede compensarse mediante la modificación de sus propiedades con la aleación de diferentes materiales, como el cadmio, el cobre, el magnesio, el níquel, el silicio o el titanio. Dependiendo de la aleación escogida, las características del material final variarán en mayor o menor medida, por lo que el aluminio es usado en una gran cantidad de aplicaciones.

*Tabla 2: Clasificación de los aluminios (Wikipedia, s.f.)*

Serie	Aleante principal	Características
<b>1XXX</b>	99% Aluminio	Impurezas de hierro o cobre, empleado para laminación.
<b>2XXX</b>	Cobre (Cu)	Con un tratamiento T6 adquiere un límite elástico de 442MPa, apto para estructura de aviones.
<b>3XXX</b>	Manganeso (Mn)	Límite elástico de 110MPa, con buen comportamiento al mecanizado
<b>4XXX</b>	Silicio (Si)	Resistencia al calor y al desgaste, usado como piezas de máquinas.
<b>5XXX</b>	Magnesio (Mg)	Tras el recocido, su límite elástico alcanza 193MPa
<b>6XXX</b>	Magnesio (Mg) y Silicio (Si)	Con un tratamiento T6 es apto para perfiles y estructuras, con una resistencia de 290MPa
<b>7XXX</b>	Zinc (Zn)	Sometido a tratamiento T6 adquiere 504MPa de límite elástico, apto para fabricar aviones

Las diferentes cualidades que presentan cada una de las series de aluminio lo hacen adecuado para todo tipo de trabajo. Además, al tratarse del segundo material

más abundante en el planeta, resulta relativamente más económico que otros metales empleados en el motociclismo.

En el desarrollo de chasis de doble viga es habitual encontrar aluminio 6082 T6 ya que se trata de un metal con un límite elástico cercano a los 300MPa que, sin embargo, también destaca por su buena soldabilidad y capacidad de mecanizado. En caso de requerir una mayor resistencia, es conveniente optar por una serie 7XXX a costa de incrementar el precio.

### 5.1.3. *Magnesio*

La consideración del magnesio como elemento estructural en la fabricación de un chasis viene motivada por el hecho de ser el metal industrial más ligero, con una densidad de tan solo 1.74g/cm<sup>3</sup>.

Se trata de un material de color blanco que presenta algo más de resistencia que el aluminio no aleado, pero peor ductilidad. Sin embargo, arde fácilmente si se calienta en contacto con el aire, y en presencia de agua o arena se corroe, pudiendo generar quemaduras y agujeros en las piezas.

Debido a todo esto, el magnesio es un material aleante muy empleado en la preparación de aleaciones ligeras y ultraligeras destinadas a la fabricación de émbolos, hélices o la industria aeronáutica en general, aprovechando su buena relación densidad-resistencia mientras se minimizan los inconvenientes relativos a la corrosión y a su capacidad inflamable gracias al segundo material de la aleación.

El magnesio es un metal que no se encuentra libre en la naturaleza, por lo que su producción resulta cara ya que se obtiene a base de sales contenidas en otros materiales. Presenta dificultades para soldar y tiene una vida a fatiga limitada por lo que, actualmente, no es habitual verlo como material base en la fabricación de chasis.

### 5.1.4. *Titanio*

El titanio es un material de color gris plateado con una gran resistencia a la corrosión de numerosos agentes. Su densidad, de 4.5g/cm<sup>3</sup>, se sitúa entre el aluminio y el acero. Sus propiedades mecánicas dependen mucho de su pureza, siendo frágil en un 96% pero dúctil para el 99.5%

Puede alearse con una gran cantidad de elementos, y actualmente se emplea en equipos marinos, en la construcción de cohetes y de aviones, desplazando al aluminio y los aceros inoxidable. La aleación más extendida es Ti-6Al-4V, que incorpora un 6% de aluminio y un 4% de vanadio para alcanzar un límite elástico de 827MPa. Sin

embargo, el principal problema en el uso del titanio es tanto su elevado coste como la dificultad para trabajarlo.

En caso de que su acceso no sea un impedimento, se trata de un material estructural con una relación densidad-resistencia excepcional que proporciona muy buenas propiedades mecánicas.

### 5.1.5. *Materiales compuestos*

Se entienden como materiales compuestos a aquellos que agrupan dos o más materiales diferentes en otro, con propiedades distintas a las de los componentes por separado y que no pueden ser obtenidas en los materiales originales. Las diferentes combinaciones deben generarse sin que se produzca una reacción química, pudiendo ser metal-metal, metal-cerámico, metal-polímero, cerámico-polímero, cerámico-cerámico o polímero-polímero.

De esta manera es posible obtener combinaciones con propiedades inusuales en características de rigidez, resistencia, peso, rendimiento a temperaturas elevadas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad.

Las propiedades que adquiere el material final están muy influenciadas por las características y porcentaje relativo de los componentes individuales que lo conforman, además de la forma, orientación, distribución e integraciones sinérgicas entre ambos.

Podemos diferenciar tres clases de materiales compuestos:

- **Materiales reforzados:** Formados por un material aglutinante (matriz) que sirve de base para acoger al material reforzador, buscan mejorar propiedades físicas. Pueden ser reforzados por dispersión o por fibra.
- **Recubrimientos superficiales:** Mediante compuestos laminares y bimetales, se consigue mejorar la resistencia a la corrosión, desgaste o abrasión. Se emplean como aislante en motores, para engranajes y artículos decorativos.
- **Aglomerados:** Son aquellos materiales formados por fragmentos de una o varias sustancias prensadas y endurecidas con un aglutinante. Los ejemplos más claros son el cemento o el hormigón. (Oxford Languages, 2021)

Los principales compuestos empleados en las estructuras del mundo de la competición son los materiales reforzados. Aunque la fibra de vidrio esté muy extendida en la fabricación de carenados, el claro ganador para la construcción tanto de componentes aerodinámicos como estructurales es la fibra de carbono.

### 5.1.5.1. Fibra de carbono

Se trata de un material compuesto reforzado en el que una matriz de resina (generalmente epoxi) aglutina fuertes fibras de carbono que se encargarán de soportar los esfuerzos a los que sean sometidos.

Se produce por parte de ambos una protección mutua que mejora sus propiedades termoelásticas, donde la matriz transmite fuerza a las fibras proporcionando ductilidad y tenacidad, mientras que las fibras soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. En otras palabras, la matriz forma el medio que transfiere y distribuye la carga que soportan las fibras.

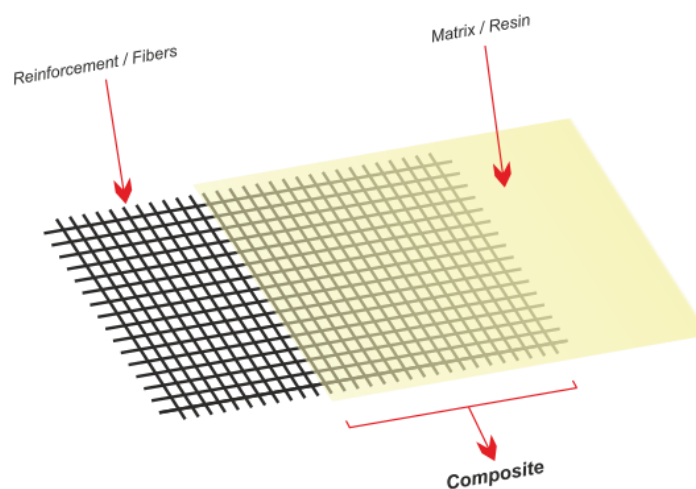


Ilustración 37: Material compuesto reforzado (OxyBlack, 2021)

El contacto entre la fibra y la matriz debe ser lo más perfecto posible para conseguir una adherencia lo suficientemente fuerte para que las deformaciones sean exactamente iguales, evitando las discontinuidades en las superficies de contacto.

La fibra de carbono se obtiene por carbonización de fibras poliméricas orgánicas, y presenta una alta resistencia mecánica y rigidez, pero es débil ante fricción e impacto. Se emplea para conseguir componentes muy resistentes con poco peso (apenas tiene una densidad de  $1.75\text{g/cm}^3$ ), pero tiene el inconveniente de un elevado coste.

Las propiedades del material final pueden variar mucho dependiendo de la matriz empleada y del método de fabricación, pudiendo alcanzar un límite elástico de hasta  $3000\text{MPa}$ . La geometría reforzante del sistema es una parte fundamental para aquellas aplicaciones en las que se requiere alta rigidez y/o resistencia, por lo que la orientación de las fibras debe tenerse en cuenta según los esfuerzos a los que vaya a ser sometida la pieza.

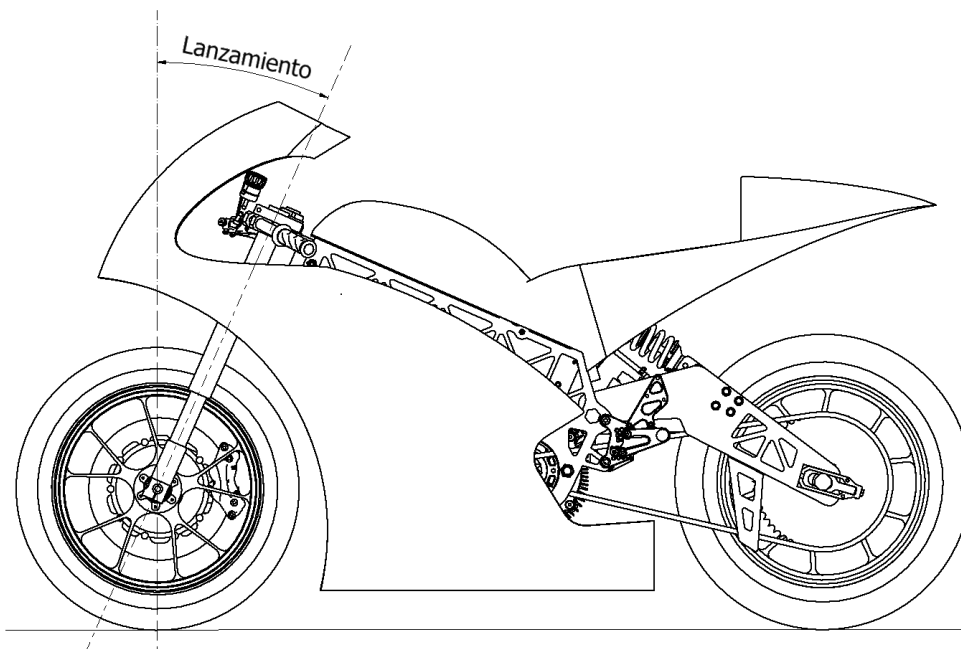
## 5.2. GEOMETRÍA

La geometría de la motocicleta y la distribución de sus componentes constituyentes determina el comportamiento y rendimiento del vehículo. Las prestaciones de la moto variarán en aspectos tan importantes como la maniobrabilidad, la estabilidad o el hundimiento de las suspensiones dependiendo de las decisiones tomadas en cuanto a la posición de los elementos.

Aunque todos los elementos que componen el vehículo afectan a su comportamiento en mayor o menor medida, vamos a centrarnos en los parámetros geométricos más importantes para acotar las necesidades relativas al diseño del chasis.

### 5.2.1. Lanzamiento

El ángulo que forma el eje de dirección con la normal respecto al punto de contacto de la rueda delantera con el suelo se conoce como ángulo de lanzamiento. Este parámetro influye en el comportamiento de la motocicleta, ya que producirá un efecto autoalineante que determinará tanto la facilidad para tomar curvas como la estabilidad del vehículo en el movimiento rectilíneo debido a la variación del avance.



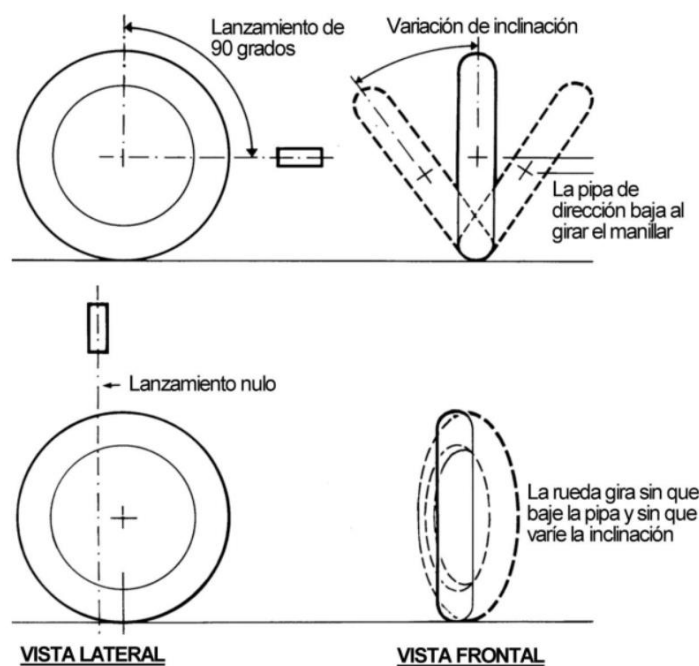
*Ilustración 38: Lanzamiento*

Además, el valor del lanzamiento determina el comportamiento dinámico en factores como los esfuerzos de torsión que experimenten las horquillas, los cambios

de geometría en caso de compresión o la rigidez de la pipa de dirección. (Reinares Gozalo, 2018, pág. 23)

Aunque históricamente la mayoría de motocicletas deportivas han optado por un avance de entre 23 y 30 grados, en la actualidad se tiende a reducir su valor hasta los casi 20 grados para facilitar el montaje y construcción. Con esto también se consigue repartir el peso de la motocicleta más hacia adelante, aumentando la carga en la rueda delantera y con ello los esfuerzos en la horquilla.

Al girar el manillar en el momento de tomar una curva la pipa de dirección baja, lo que provoca un desplazamiento del centro de gravedad que tiende a inclinar el vehículo hacia el lado correspondiente. Por lo tanto, a mayor lanzamiento mayor será la caída de la pipa de dirección y mayor será la fuerza necesaria para enderezar la moto de nuevo. Este es un efecto generado debido a la forma de los neumáticos y es difícil de apreciar a simple vista, pero que cobra gran importancia en la conducción.



*Ilustración 39: Influencia del lanzamiento sobre la altura de la pipa (Foale, 2002, pág. 85)*

El ángulo de lanzamiento está estrechamente relacionado con el avance ya que, por lo general, cuanto mayor sea el lanzamiento más aumentará el avance. Esto influye en la estabilidad de la motocicleta al incrementar o reducir el efecto autoalineante.

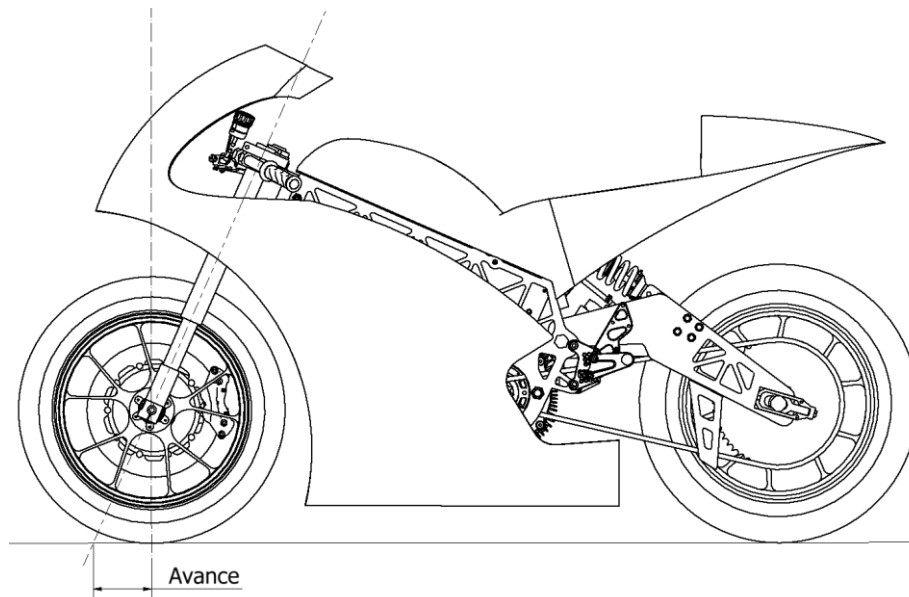
Para corregir el efecto del lanzamiento sobre el avance se hace uso de tijas con offset, que desplazan las botellas de la suspensión delantera respecto al eje de dirección.



## 5.2.2. Avance

El avance es la distancia que separa el punto de contacto de la rueda delantera con el suelo y la intersección del suelo con el eje de dirección.

Esta distancia viene determinada por el ángulo de lanzamiento, el offset de la tija y el radio de la rueda.

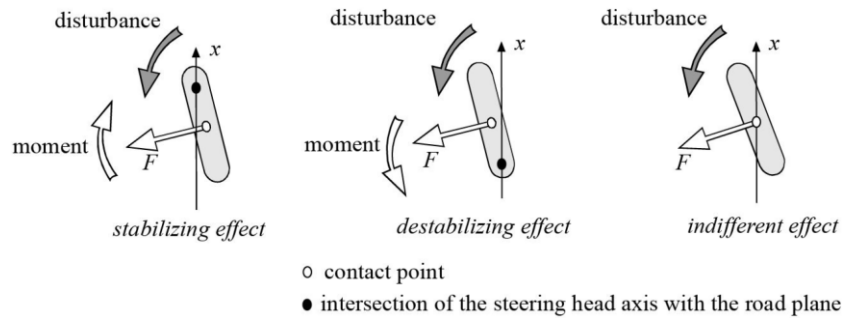


*Ilustración 40: Avance*

El avance tiene una gran influencia sobre la estabilidad direccional a altas velocidades, así como en la facilidad para tomar curvas. Cuanto mayor sea la distancia del avance, mayor será la fuerza autoalineante por lo que la moto se comportará mejor en recta a altas velocidades, pero a cambio, complicará las entradas en curva.

Esto es debido a que la rueda gira alrededor del eje de dirección, pero el contacto con el suelo se encuentra desplazado a una distancia determinada. De esta manera se genera una fuerza lateral debida al ángulo de deriva (ángulo que forman el plano de la rueda y la tangente a la curva) que genera un momento en el eje de dirección contrario al giro, lo que tiende a poner recta a la rueda. El efecto es el mismo que si consideramos a la rueda como una palanca cuyo punto de apoyo (eje de dirección) está desplazado con respecto a la posición sobre la que se aplica la fuerza (contacto con el suelo).





*Ilustración 41: Efecto del avance positivo, negativo y nulo (Cossalter, 2006, pág. 16)*

En el caso de las motocicletas, es habitual encontrar avances positivos, es decir, que el eje de dirección interseque con el suelo por delante de la superficie de contacto del neumático en la dirección de la marcha.

Un claro ejemplo de la importancia del avance lo encontramos en las ruedas locas. En un carrito de supermercado, las ruedas tienen una gran distancia de avance con un ángulo de lanzamiento nulo, lo que provoca que las ruedas siempre tiendan a posicionarse por detrás de su ángulo de giro debido al momento generado. Esto provoca un gran efecto estabilizador en movimientos rectilíneos, pero un gran esfuerzo a la hora de tomar curvas.

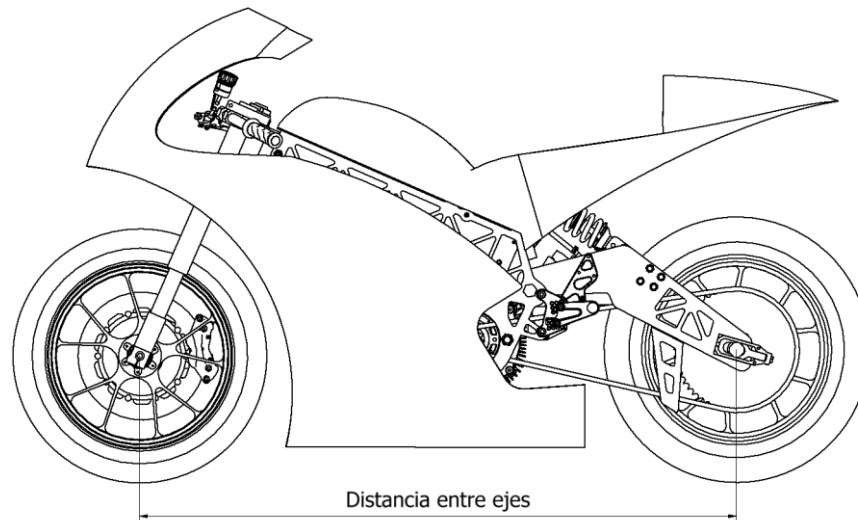
En una motocicleta de competición es muy importante encontrar una distancia de avance pequeña para tomar las curvas con rapidez, pero lo suficientemente grande como para que cualquier bache o desperfecto en el suelo pueda ser contrarrestado por el efecto autoalineante. Generalmente, esta distancia está comprendida entre 75mm y 90mm en motocicletas de competición.

Para poder implantar tanto un ángulo de lanzamiento como un avance determinado al mismo tiempo se utilizan tijas con offset, de manera que se desplace la horquilla respecto al eje de dirección con el objetivo reducir el avance manteniendo constante el lanzamiento. (Cossalter, 2006, pág. 13)

### 5.2.3. Distancia entre ejes

La distancia entre ejes es la longitud que existe entre el eje delantero y el trasero, que se corresponde con la distancia entre los puntos de contacto de la rueda delantera y la trasera con el suelo.

Esta medida es especialmente importante debido a la distribución de cargas de la motocicleta, ya que determinará los esfuerzos que reciben las ruedas tanto en frenada como en aceleración.



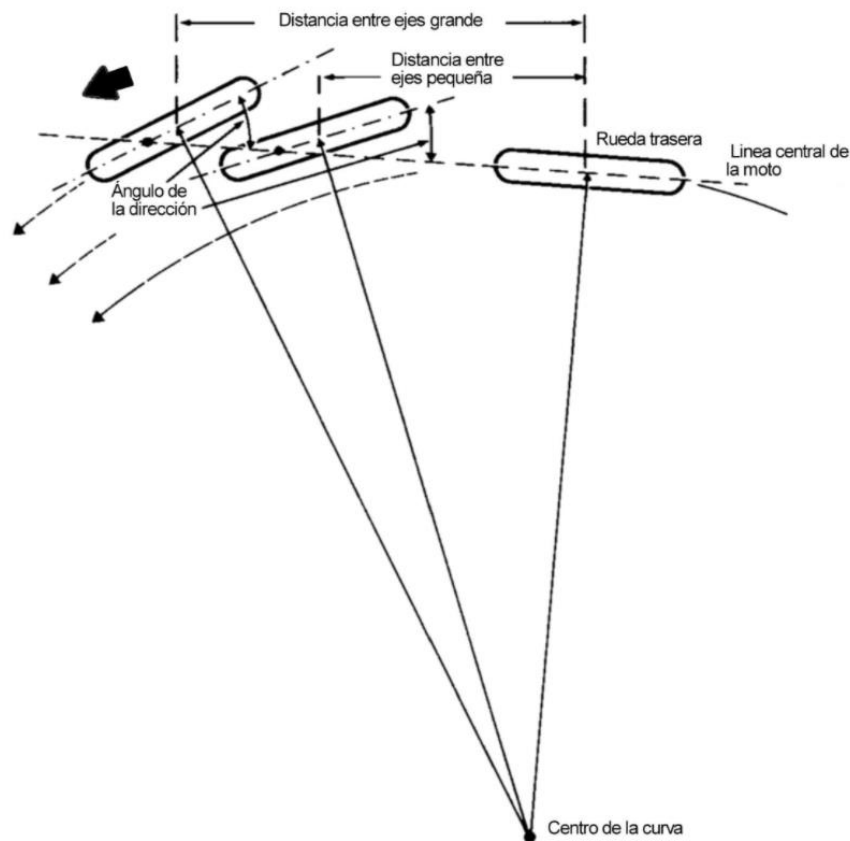
*Ilustración 42: Distancia entre ejes*

En motocicletas deportivas, las distancias entre ejes más habituales rondan los 1400mm. Podemos resumir el efecto de la distancia entre ejes como que, cuanto mayor es dicha longitud mayor es la estabilidad y el efecto autoalineante, a costa de dificultar el paso por curva. Esto se debe a tres razones:

#### ***5.2.3.1. Ángulo de giro requerido***

Ante una curva determinada, cuanto más alargada sea la motocicleta más necesitará girar la rueda delantera. Por lo tanto, la fuerza necesaria para tomar una curva aumenta.

Si consideramos una motocicleta como una estructura rectilínea tangente a la curva en su punto de propulsión (rueda trasera) podemos comprobar que, cuanto más alargada sea mayor será la corrección necesaria de la rueda delantera para mantenerse tangente a la circunferencia.

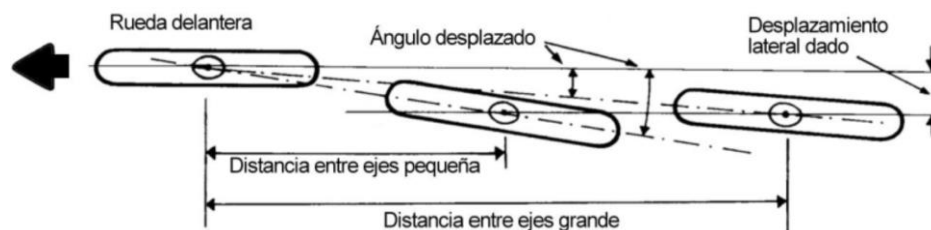


*Ilustración 43: Ángulo de giro según distancia entre ejes (Foale, 2002)*

Que sea necesario un mayor esfuerzo para girar la motocicleta implica que los efectos desestabilizantes causados por imperfecciones en el suelo se minimizan, consiguiendo un comportamiento autoalineante.

### 5.2.3.2. Ángulo de la rueda trasera

En caso de que en un movimiento rectilíneo la rueda trasera se vea desplazada lateralmente, debido a un bache o por la razón que sea, el ángulo que girará el cuerpo de la motocicleta será menor cuanto mayor sea su longitud.



*Ilustración 44: Desplazamiento lateral según distancia entre ejes (Foale, 2002)*

Por lo tanto, aunque la distancia que se ha desplazado la rueda trasera sea la misma, el retorno a una posición rectilínea se realizará con mayor facilidad en motocicletas más alargadas.

### 5.2.3.3. *Efectos de la inercia*

En una aceleración o frenada de la motocicleta se genera una transferencia de cargas que provoca que una de las dos ruedas deba soportar unos esfuerzos muy superiores a los que experimentaría en reposo. Sin embargo, este efecto se reduce conforme aumenta la distancia entre ejes. Esta situación queda mejor reflejada en el apartado 5.4.2. *Hipótesis de carga*.

Además, el momento de inercia de la motocicleta aumentará con una mayor longitud de esta, por lo que se hará más estable tanto en movimientos rectilíneos como en situaciones de aceleración y deceleración. (Foale, 2002, pág. 91)

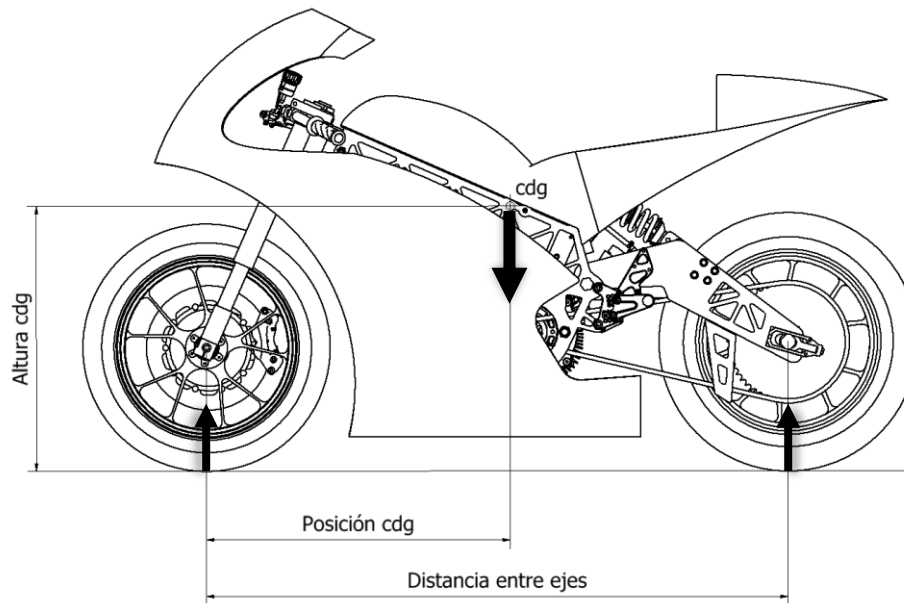
### 5.2.4. *Peso y su posición*

Uno de los parámetros más importantes en una motocicleta es su peso y cómo está distribuido. En general, para mejorar el rendimiento del vehículo es conveniente hacerlo lo más ligero posible y con un centro de gravedad que, cuanto más abajo esté, mejor. El centro de gravedad es un punto imaginario en el que se considera que actúa toda la masa de la motocicleta, es utilizado para facilitar otros cálculos ya que permite reducir el posicionamiento del peso del vehículo a un único punto.

Con un peso reducido no solo acelerará mejor, sino que además el piloto tendrá un manejo mucho más cómodo del vehículo ya que este requerirá de menos fuerza para maniobrar.

Es muy importante conocer la posición del centro de gravedad para realizar un buen dimensionamiento de la estructura portante ya que, dependiendo de la magnitud del peso total y de su posición, los esfuerzos se concentrarán en diferentes partes del chasis. En una motocicleta de combustión el motor es el elemento más pesado, sin embargo, en un vehículo eléctrico el componente con mayor masa es, habitualmente, la batería. Por lo tanto, su posición tiene una gran importancia en la localización del centro de gravedad.

Conocida la distancia entre ejes y el peso total de la motocicleta, si colocamos en parado una de sus ruedas sobre una báscula obtendremos la carga sobre dicha rueda y podremos determinar la posición del centro de gravedad.



*Ilustración 45: Peso, reacciones de los apoyos y posición del centro de gravedad*

Según la *Ilustración 45*, conocido el peso total y la carga sobre la rueda trasera (tomada mediante una báscula) podemos obtener la posición del centro de gravedad de la motocicleta despejando en la siguiente expresión:

$$\text{Peso} \cdot \text{Posición cdg} = \text{Carga rueda trasera} \cdot \text{Distancia entre ejes}$$

El peso del piloto tiene una gran influencia sobre la posición del centro de gravedad durante el movimiento, desplazándolo hacia atrás. Por ello, las motocicletas se diseñan de forma que, en parado, la rueda delantera asuma entre un 50% y un 57% del peso total. Mover el centro de gravedad hacia la parte delantera permite un mayor agarre de la rueda, compensando las fuerzas que tienden a levantarla en momentos de aceleración o de altas velocidades; sin embargo, también aumenta las posibilidades de perder adherencia en la rueda trasera en las frenadas.

De la misma manera, la altura del centro de gravedad juega un papel importante en situaciones de aceleración y frenada ya que, con una posición elevada, se mejorarán las capacidades de aceleración y frenada a costa de aumentar las posibilidades de levantar una de las ruedas.

Podemos resumir los efectos producidos por la posición del centro de gravedad de la siguiente manera:

#### **Según eje horizontal**

- **Adelantado:** Aumenta el sobreviraje, deslizando la rueda trasera al tomar curvas.

- **Atrasado:** Disminuye el sobreviraje, deslizando la rueda delantera al tomar curvas.

### Según eje vertical

- **Elevado:** La rueda delantera tiende a levantarse en aceleración y la trasera en frenada.
- **Bajo:** La rueda trasera tiende a perder adherencia en aceleración y la delantera en frenada.

En una motocicleta de competición la altura habitual del centro de gravedad se encuentra entre los 0.4m y los 0.55m, siendo elevado hasta los 0.7m debido a la presencia del piloto. (Cossalter, 2006, pág. 98)

## 5.3. COMPORTAMIENTO DINÁMICO

Es importante conocer cómo se comporta una motocicleta durante la conducción no solo para mejorar su maniobrabilidad, sino también para comprender las cargas que experimenta y cómo afectan a la estructura.

### 5.3.1. Condiciones para el movimiento

Para conseguir el movimiento de un vehículo terrestre que se desplaza sobre ruedas es necesario vencer a aquellas fuerzas que se oponen al movimiento. Por lo tanto, el movimiento se producirá cuando la fuerza que ejercen las ruedas sea superior a la resistencia total a la tracción:

$$F = F_{inercia} + F_{pendiente} + F_{rodadura} + F_{aerodinámica} + F_{aire}$$

Además, debido a la naturaleza de los vehículos terrestres, como su impulsión viene dada por el movimiento de las ruedas es necesario que la fuerza de rozamiento sea en todo momento mayor que el par en la rueda, es decir:  $F < F_r$ .

Por lo tanto, el par en la rueda debe ser siempre inferior a la fuerza de rozamiento, pero superior a aquellas fuerzas que se oponen al movimiento.

Este apartado sigue la metodología descrita en el libro Build Your Own Electric Motorcycle (Vogel, 2009), basada en la obra de Arias Paz (Arias-Paz Gutiérrez, 2003)

#### 5.3.1.1. Fuerza de rozamiento

La fuerza de rozamiento es aquella fuerza que se opone al movimiento de un cuerpo que se encuentra en contacto con otro. El principio de funcionamiento de las ruedas motrices es posible gracias a esta fuerza, ya que es la fuerza de rozamiento la

que permite la rodadura necesaria para impulsar el sistema. Si el rozamiento fuera nulo, la rueda no se adheriría y patinaría.

Viene dado por la expresión:  $F_r = \mu N$

- **$\mu$ :** Coeficiente de rozamiento. Es característico de los materiales, y determina la oposición al deslizamiento de dos superficies en contacto.
- **$N$ :** Fuerza normal, perpendicular al plano (N)

### 5.3.1.2. Resistencia a la aceleración

La resistencia a la aceleración es producida debido a la inercia de los elementos rodantes o, en otras palabras, por la tendencia de los cuerpos de mantener su estado de reposo o de movimiento ante la acción de una fuerza.

Viene definida por la expresión:  $F_{inercia} = C_i W a$

- **$C_i$ :** Factor que representa la masa inercial de las partes rodantes del vehículo. Es dependiente de la relación de transmisión y, en vehículos eléctricos, se estima entre 1.06 y 1.2
- **$W$ :** Masa del vehículo (kg)
- **$A$ :** Aceleración ( $m/s^2$ )

### 5.3.1.3. Resistencia por pendiente

La inclinación del plano sobre el que se desplaza un vehículo terrestre tiene gran influencia sobre la potencia necesaria para producir su movimiento. Sobre una pendiente, el peso del vehículo se descompone en dos componentes.

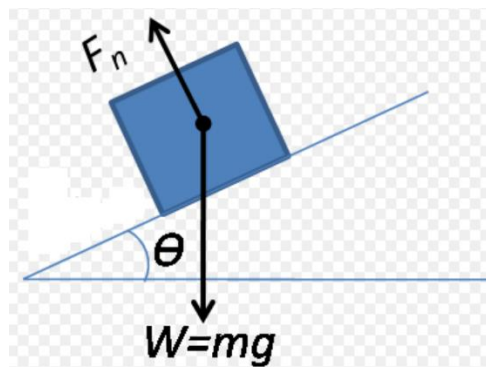


Ilustración 46: Peso de un cuerpo sobre pendiente (Wikipedia, s.f.)

La primera de ellas, la fuerza normal, es siempre tangente al plano e influye sobre la fricción, determinando el agarre que tienen las ruedas. La segunda de ellas se posiciona en dirección de la marcha, pudiendo ser en su mismo sentido o contraria a ella, por lo que determinará la fuerza requerida para desplazar el vehículo.

Podemos expresarla con la siguiente fórmula:  $F_{pendiente} = W \sin \theta$

- **W:** Peso del vehículo (N)
- **$\theta$ :** Ángulo de inclinación de la pendiente (grados)

### 5.3.1.4. Resistencia a la rodadura

La resistencia a la rodadura se presenta cuando las ruedas se deforman al rodar sobre una superficie. Debido a esto, el radio efectivo es menor que el radio nominal de la rueda y se genera estrés en la zona de contacto, en dirección tanto normal (debido a la carga) como paralelo al plano.

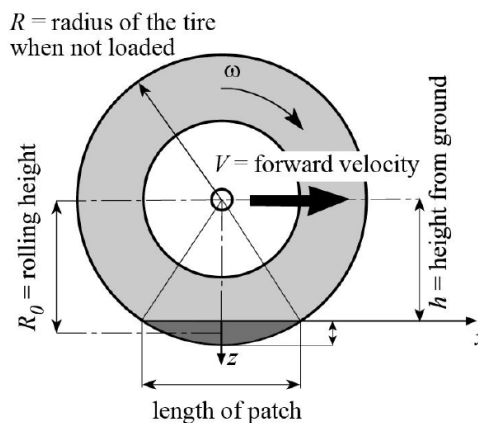


Ilustración 47: Deformación por rodadura (Cossalter, 2006)

Este efecto se cuantifica mediante la expresión:  $F_{rodadura} = C_r W \cos \theta$

- **$C_r$ :** Factor de resistencia a la rodadura, se estima como una constante con valores entre 0.006 y 0.01 para superficies duras (cemento), 0.02 en superficies de dureza media y 0.3 en superficies blandas (arena).
- **W:** Peso del vehículo (N)
- **$\theta$ :** Ángulo de inclinación de la pendiente (grados)

### 5.3.1.5. Resistencia aerodinámica

El desplazamiento a través de un fluido, en este caso el aire, genera una resistencia al movimiento que depende tanto de la geometría del vehículo como de su velocidad. El flujo del aire alrededor del vehículo afecta en gran medida a esta resistencia, es por ello que las motos y los coches de competición prestan tanta atención al diseño de sus carenados y a la forma exterior en general.

Esta fuerza se expresa mediante la fórmula:  $F_{aerodinámica} = \frac{1}{2} \delta C_d A V^2$

- **$\delta$ :** Densidad del fluido, en este caso aire (1.167kg/m<sup>3</sup>)
- **$C_d$ :** Coeficiente de resistencia aerodinámica. Depende de la geometría del vehículo, especialmente de su parte frontal que representa más de un



tercio del porcentaje total en la contribución a este coeficiente. Se estima 0.9 de media para motocicletas deportivas.

- **A:** Área frontal del vehículo ( $m^2$ )
- **V:** Velocidad (m/s)

### 5.3.1.6. Resistencia relativa del viento

Al estar desplazándose a través de un fluido, como en este caso es el aire, aparecen fuerzas debidas a las corrientes naturales de aire. Es decir, el viento de cola es una fuerza que puede disminuir la potencia requerida para que se produzca el movimiento si viene en el sentido de la marcha, o puede actuar en contra del movimiento si su sentido es contrario a la marcha, es lo que se conoce como "headwind".

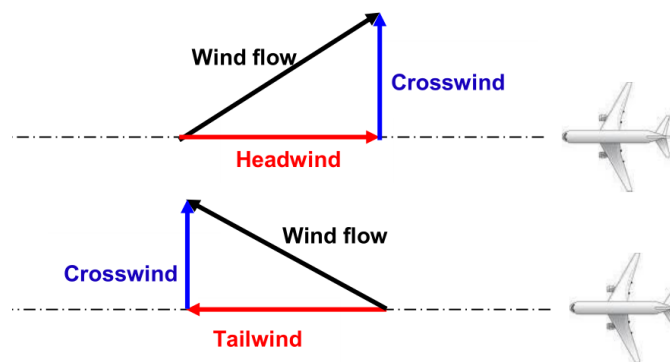


Ilustración 48: Fuerza ejercida por el viento (IVAO, 2020)

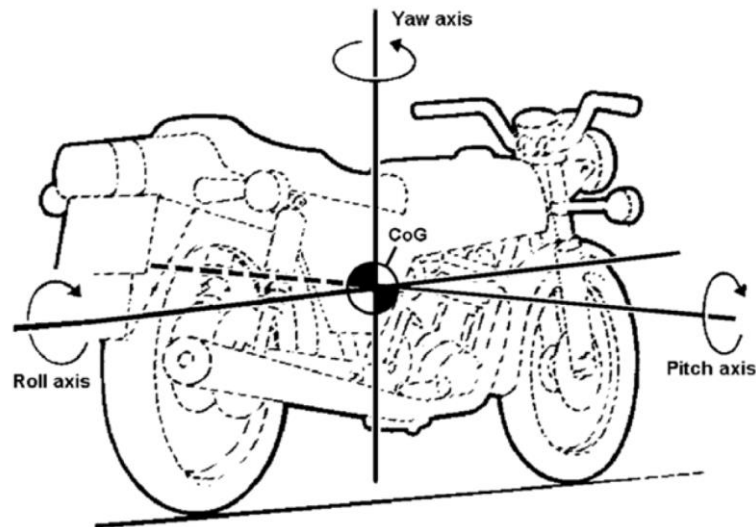
Por lo tanto, la dirección del viento influye sobre la potencia disipada en el movimiento de nuestro sistema, siguiendo la expresión:  $F_{aire} = C_w F_d$

- **C<sub>w</sub>:** Factor de viento relativo, es dependiente de la velocidad media del viento y de la velocidad y geometría del vehículo. Varía entre 4.5 y 0.05
- **F<sub>d</sub>:** Resistencia aerodinámica (N), calculada anteriormente.

### 5.3.2. Movimientos angulares

El movimiento rectilíneo de una motocicleta es controlado mediante la fuerza ejercida tanto por el motor como por los frenos, permitiendo el desplazamiento unidireccional en el sentido de la marcha. Los movimientos rectilíneos en los ejes vertical y transversal tan solo se producen por el efecto de fuerzas externas, como la presencia de colinas o viento lateral.

Sin embargo, para estudiar el comportamiento de una motocicleta es fundamental considerar los movimientos angulares alrededor de los tres ejes del vehículo.



*Ilustración 49: Movimientos angulares de una motocicleta (Foale, 2002, pág. 17)*

Acciones tan importantes como tomar una curva son posibles gracias a los movimientos angulares alrededor de estos ejes, que podemos definir como:

- **Balanceo (Roll):** El movimiento de balanceo es aquel que se produce en la inclinación de la moto para tomar una curva.
- **Cabeceo (Pitch):** Se producen movimientos de cabeceo cuando existe una transferencia de carga hacia una de las ruedas, ya sea en aceleración o frenada, tendiendo a levantar una de ellas.
- **Guiñada (Yaw):** El momento de guiñada tiene una gran importancia en la maniobrabilidad de la motocicleta, ya que puede desestabilizarla en la toma de curvas o con la presencia de viento lateral.

Los momentos de inercia de la motocicleta y la posición de estos ejes dependen en gran medida de la masa del vehículo. Por ejemplo, podemos comprobar que, con un alto peso y el centro de gravedad elevado, los movimientos de balanceo requerirán de un gran esfuerzo por parte del piloto para maniobrar correctamente.

### 5.3.3. *Transferencia de carga*

En el momento de accionar el acelerador o de presionar los frenos de una motocicleta podemos sentir cómo una de las ruedas sufre un incremento en la magnitud de las cargas que soporta, mientras que se reducen en la otra.

Esta transferencia de carga es debida a las fuerzas que actúan en aquellas situaciones en las que el vehículo experimenta una aceleración. Por lo tanto, podemos determinar dónde se concentran las cargas conocido el peso de la motocicleta y la aceleración instantánea.

Si consideramos que la masa total del vehículo se mantiene constante en todo momento podemos asegurar que la carga transferida a una de las ruedas se resta a la otra. Por ejemplo, si en una frenada a la rueda delantera se le transfieren 50kg entonces sobre la rueda trasera actúan 50kg menos. De la misma manera, si en una aceleración se levanta la rueda delantera haciendo un caballito, entonces la rueda trasera soporta todo el peso de la moto por sí sola. Es importante remarcar que no es la masa lo que se transmite, sino la carga.

Esta transferencia de cargas produce movimientos de cabeceo que tienden a levantar la rueda delantera (Squat) en las aceleraciones y la trasera (Hundimiento) durante las frenadas, que son más pronunciados en las motocicletas que en otros vehículos debido a la altura de su centro de gravedad en relación a la distancia entre ejes.

- **Squat:** movimiento de cabeceo en sentido contrario a la marcha que tiende a levantar la rueda delantera debido a las aceleraciones y a las fuerzas aerodinámicas.
- **Hundimiento:** movimiento de cabeceo en el sentido de la marcha que tiende a levantar la rueda trasera en ocasiones de frenada

Existen numerosas configuraciones en cuanto a las suspensiones delantera y trasera para paliar estos fenómenos, debiendo alcanzar una situación favorable que produzca unos resultados acordes a los requisitos del sistema.

Debido a la propia naturaleza de las motocicletas, es fundamental que la rueda trasera tenga un buen contacto con el suelo ya que la fuerza de avance que transmite será proporcional a la carga que soporte, aumentando la tracción con la carga. Sin embargo, la rueda delantera también debe mantener el contacto con el suelo para que puedan hacerse efectivos los cambios de dirección mediante su inclinación. (Foale, 2002, pág. 267)

#### 5.3.4. Rigidez

La rigidez estructural de la motocicleta cobra una gran importancia en el manejo y maniobrabilidad del vehículo. Una alta rigidez garantiza una rápida respuesta a las acciones del piloto, así como una trayectoria precisa. Sin embargo, también se producirá el efecto contrario y el piloto sentirá con mayor fuerza los baches y la conducción en superficies húmedas.

En una motocicleta es muy importante la alineación de las ruedas respecto al plano de simetría y al eje de dirección para mantener estabilidad direccional, por lo

que es fundamental que el chasis cuente con la suficiente rigidez como para mantener dicha proporción. Además, a través del subchasis se le comunicará al piloto la información relativa al comportamiento de la moto por lo que toda la estructura debe tener un movimiento constante. (Cossalter, 2006, pág. 377)

### *5.3.5. Manejo*

Una motocicleta es un vehículo automóvil pilotado, lo que quiere decir que su manipulación depende de una persona que actúa como piloto. Para garantizar una conducción óptima y segura es importante que el sistema goce de buena estabilidad y control, de forma que el piloto se exponga a los mínimos riesgos posibles a la vez que obtiene una respuesta adecuada a sus acciones por parte de la moto.

#### *5.3.5.1. Estabilidad*

Entendemos como estabilidad a la tendencia de un vehículo a regresar a su estado de equilibrio tras sufrir una perturbación. En el caso de las motocicletas, podemos comprobar dos situaciones claramente diferenciadas:

- **Baja velocidad:** La motocicleta tiende a caer mediante un movimiento de balanceo alrededor de su eje longitudinal.

La posición de equilibrio se dará siempre que el centro de gravedad combinado del piloto y de la moto se posicione verticalmente sobre el plano de simetría del vehículo, pero cualquier pequeña perturbación desestabilizará el sistema. (Foale, 2002, pág. 102)

- **Alta velocidad:** La motocicleta tiende a mantener una posición erguida por sí misma.

Esto es debido a la conservación del momento angular de las partes rotatorias de la motocicleta, como las ruedas, que tienden a mantener su plano de rotación constante, por lo que es necesario aplicar una fuerza para modificar su momento. (Foale, 2002, pág. 102)

#### *5.3.5.2. Control*

El propósito del control es el cambio consciente por parte del piloto de una situación de estabilidad a otra. Por ejemplo, para tomar una curva es necesario que la persona conduciendo la motocicleta realice ciertas acciones de control para modificar el estado del vehículo, como girar el manillar o tumbar la moto.

En cierto modo se produce una comunicación entre el piloto y la motocicleta, de forma que la persona que la conduce recibe una serie de información a través de la estructura del vehículo que le indica su comportamiento. En base a las necesidades del

momento, el piloto ejercerá una serie de acciones a modo de input sobre la moto que producirán un cambio en su estado para adaptarse correctamente a la trazada.

La facilidad con la que el piloto pueda ejercer estas acciones de control vendrá determinada en gran parte por la ergonomía del vehículo.

### 5.3.5.3. *Ergonomía*

Se entiende como ergonomía a las condiciones de adaptación de un vehículo a las características físicas y psicológicas del usuario. (Oxford Languages, 2021) Esto implica que el diseño de la moto deberá responder a las peculiaridades de estatura y peso del piloto, de forma que se cumplan las siguientes condiciones para garantizar una conducción óptima y segura:

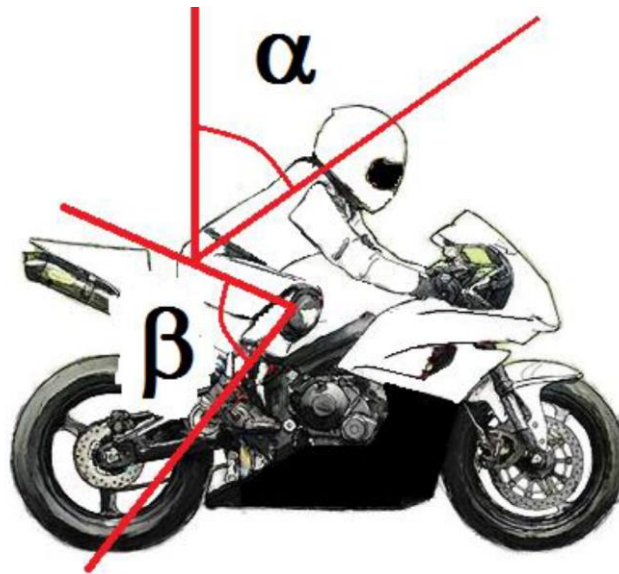
- Los elementos y símbolos reflejados en el cuadro de instrumentos y mandos, así como las indicaciones del display deben ser perfectamente legibles en la posición normal de conducción.
- El piloto debe ser capaz de accionar fácilmente y con comodidad todos los mandos que controlan el movimiento de la motocicleta, al mismo tiempo que se evite la activación involuntaria de cualquiera de ellos.

La ergonomía juega un papel muy importante en la comodidad del vehículo, por lo que cobra gran importancia el bienestar del piloto en sesiones largas de conducción.

Es fácilmente observable cómo cada tipología de motocicleta se adapta a las características de conducción para las que están diseñadas: las motos de Enduro son altas y llevan estriberas planas y resistentes para favorecer que el piloto se ponga de pie, en las Scooter se adquiere una postura similar a la que se tendría al estar sentado en una silla para hacer más cómodas las paradas en la circulación por ciudad, las motocicletas tipo Trail o Adventure requieren de una postura erguida para minimizar la fuerza requerida y la fatiga en sesiones largas de conducción...

En el caso de las motos deportivas, la posición que adquiere el piloto en un estado normal de conducción es muy importante para la aerodinámica del conjunto, por lo que se tiende a adelantar el asiento y a retrasar la posición de las estriberas con el objetivo de propiciar una posición horizontal del piloto, casi como si estuviera tumbado sobre la moto.

Gracias a esto, se consigue reducir enormemente la resistencia aerodinámica a altas velocidades, razón por la que es habitual ver cómo pilotos profesionales se agachan sobre el cubredepósito en rectas para ganar algo de velocidad. Como contraparte, se trata de una postura que requiere de fuerza en los brazos y en la espalda por lo que causa fatiga en sesiones largas de conducción.



*Ilustración 50: Ergonomía de una motocicleta*

Si tomamos como referencia el percentil de tallas P95, que comprende el 95% de la población, se establece que la posición de pilotaje recomendada de una motocicleta deportiva en posición normal de conducción comprende un ángulo  $\alpha$  de la espalda con la vertical de entre  $19^\circ$  y  $40^\circ$  y un ángulo  $\beta$  de flexión de rodillas de entre  $65^\circ$  y  $77^\circ$ , según la *Ilustración 50*. (Moto Engineering Foundation, 2017, pág. 40)

## 5.4. TÉCNICAS Y PROCESOS UTILIZADOS

En la actualidad existen herramientas y metodologías que facilitan el desarrollo de cualquier elemento que nos dispongamos a desarrollar, facilitando la labor del ingeniero para realizar un diseño óptimo y funcional sin necesidad de fabricar prototipos preliminares hasta alcanzar el componente final.

El presente trabajo se enfoca en el diseño y la validación del chasis de una motocicleta eléctrica de competición, por lo que es necesario alcanzar una estructura con una geometría funcional para acoger todos los elementos de la motocicleta. Sin embargo, también es de vital importancia buscar una reducción de peso sin que por ello se comprometa a la resistencia estructural del conjunto.

Para cubrir estas necesidades se opta por realizar un diseño asistido por ordenador (CAD) para trabajar sobre un modelo 3D que nos permita estudiar tanto la geometría de la estructura como su resistencia mediante simulaciones por análisis de elementos finitos (FEA).

### 5.4.1. Modelado 3D

En el ámbito de la ingeniería es muy habitual apoyarse en programas informáticos para realizar prototipos virtuales de los que será el componente final. Es lo que se conoce como Diseño Asistido por Ordenador (CAD).

Históricamente se ha diseñado sobre plano, es decir, mediante dibujos 2D, para después realizar prototipos físicos que validasen la integridad del sistema. Existen herramientas de software como AutoCAD que permiten trabajar cómodamente en el dibujo y la obtención de planos, facilitando mucho la expresión gráfica para los procesos de fabricación.

Sin embargo, actualmente se emplean programas que habilitan el trabajo en entornos tridimensionales. El diseño ha virado hacia esta metodología ya que permite realizar un prototipo virtual del componente que se desea desarrollar, de manera que sea posible comprobar su validez geométrica rápidamente de forma visual, sin necesidad de fabricarlo físicamente. Además, al contar con un prototipo virtual, es posible analizar su comportamiento y verificar su validez estructural sometándolo a simulaciones que repliquen condiciones de trabajo similares a la realidad. En nuestro caso, se realizará un Análisis por Elementos Finitos (FEA).

El software empleado para realizar el modelo 3D del chasis es Autodesk Inventor Professional 2020. Existen numerosas alternativas, pero todas ellas comparten características y tienen metodologías de trabajo muy similares.

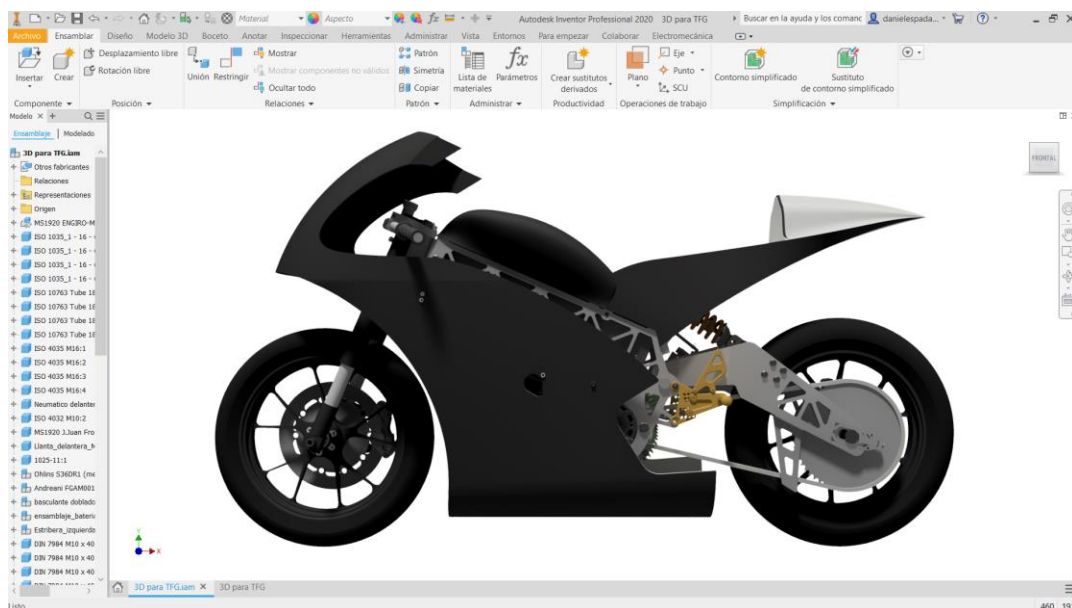


Ilustración 51: Modelo 3D del prototipo en Autodesk Inventor



En estas herramientas podemos observar tres áreas claramente diferenciadas, que nos permiten trabajar en el entorno tridimensional con facilidad:

- **Ventana principal:** Ocupa la mayor parte de la pantalla y se ubica en el centro. Muestra el modelo 3D con el que se está trabajando y permite interactuar con él.
- **Navegador de modelo:** Barra localizada a la izquierda de la pantalla que enumera todos los elementos y operaciones realizadas hasta el momento. Permite localizar rápidamente componentes y modificar acciones ya realizadas.
- **Cinta de opciones:** Ubicada en la parte superior, contiene todas las operaciones realizables ordenadas en diferentes pestañas. Permite generar nuevos modelos, añadir modelos ya creados, personalizar la aplicación...

En el caso de inventor, la forma más común de crear nuevas piezas es realizar bocetos, ya sean 2D o 3D, y después realizar operaciones de modelado 3D como extrusiones o revoluciones sobre ellos. Para unir diferentes piezas individuales se crea un archivo de ensamblaje, que permite establecer relaciones entre ellos de unión o restricción para limitar la movilidad y posición geométrica relativa entre ellos. Por lo tanto, el modelado 3D es una herramienta fantástica para comprobar rápidamente las dimensiones de las piezas que diseñamos.

Además, es posible realizar planos en 2D a partir de un modelo 3D, permitiéndonos extraer directamente las vistas y cotas del prototipo para así obtener los planos con comodidad una vez finalizado el diseño.

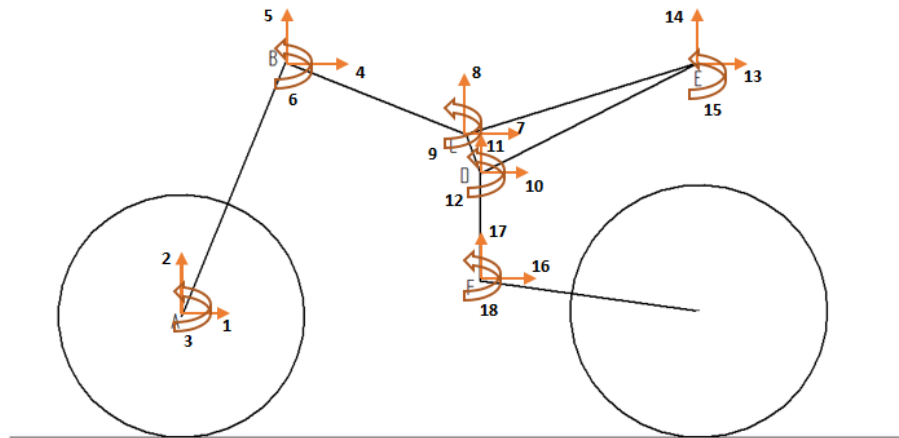
### 5.4.2. Hipótesis de carga

Para realizar la validación del diseño propuesto es necesario conocer los esfuerzos a los que la motocicleta va a estar sometida.

La carga total del sistema vendrá dada por el peso del vehículo y del piloto, cuyas masas se consideran constantes a lo largo de la carrera. Por lo tanto, es posible estimar el esfuerzo que la motocicleta deberá ser capaz de soportar en situaciones tanto de reposo como al sometida a aceleraciones y, conocido el centro de gravedad, podremos determinar cómo se distribuye.

Existen diferentes metodologías de cálculo estructural para determinar los esfuerzos que deberá soportar el chasis de una motocicleta. Uno de los más utilizados es el método de rigidez, el cual consiste en realizar un cálculo matricial empleado para

el cálculo de estructuras que se centra en la obtención de fuerzas y momentos cuando se ha producido un desplazamiento unitario.



*Ilustración 52: Grados de libertad de la estructura (Reinares Gozalo, 2018)*

Para llevarlo a cabo, es necesario conocer los grados de libertad y trazar la matriz de rigidez de toda la estructura.

El método de cálculo empleado en el presente trabajo es la transferencia de cargas, que se fundamenta en la variación de fuerzas que se ejercen sobre los apoyos en una situación de movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. Es descrito por Vittore Cossalter en su libro (Cossalter, 2006), y se trata del método de cálculo de esfuerzos de motocicletas por excelencia en el sector.

### 5.4.2.1. Reposo

En una situación de reposo, sobre la motocicleta actúa una fuerza equivalente a la suma de los pesos del piloto y del vehículo.

$$W = W_{moto} + W_{piloto}$$

Tal y como indica la tercera ley de Newton, *“con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria: quiere decir que las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en sentido opuesto”*. Esta afirmación implica que deberá existir una fuerza de reacción ejercida sobre el punto de contacto del vehículo con el suelo equivalente al peso del vehículo.

Como las motocicletas tienen dos puntos de contacto con el suelo, siendo estos los neumáticos, aparecen dos fuerzas de reacción cuya magnitud es igual al peso combinado del piloto y la moto, pero de sentido contrario.

$$W = W_f + W_r$$

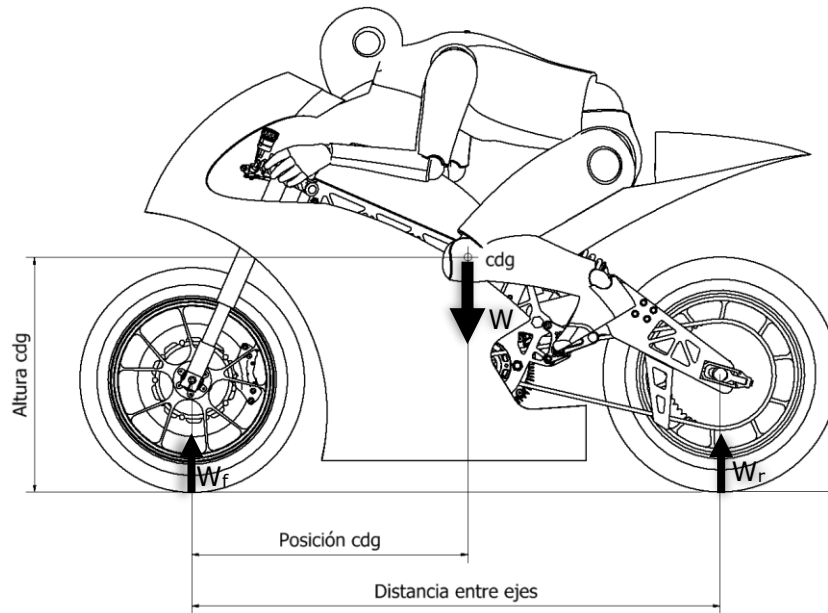


Ilustración 53: Fuerzas en situación estática

Tal y como queda reflejado en la *Ilustración 53*, si conocemos el peso del vehículo y del piloto y la posición del centro de gravedad, podemos determinar la carga ejercida sobre las ruedas.

Según la primera ley de Newton, para que un cuerpo permanezca en reposo o en un movimiento rectilíneo a velocidad constante es necesario que la fuerza neta aplicada sobre él sea nula. Esto quiere decir que la suma de todas las fuerzas y momentos que actúan sobre la moto en una situación de reposo serán cero.

$$\sum \vec{F} = 0 \qquad \sum \vec{M}_{(f)} = 0$$

$$\vec{W} + \vec{W}_f + \vec{W}_r = 0 \qquad \vec{W} \cdot \text{Posición cdg} + \vec{W}_r \cdot \text{Distancia entre ejes} = 0$$

Sabiendo que el peso del sistema y las reacciones siempre serán de sentido contrario, y que la dirección y sentido de las componentes horizontales con respecto a la posición centro de gravedad y de la distancia entre ejes son coincidentes según el sistema de referencia tomado (Eje de la rueda delantera) podemos establecer el siguiente sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas:

$$\begin{cases} W = W_f + W_r \\ W \cdot \text{Posición cdg} = W_r \cdot \text{Distancia entre ejes} \end{cases}$$

De esta manera, conocido el peso del sistema, la distancia entre ejes y la posición del centro de gravedad, podemos determinar las reacciones en cada una de las ruedas en un estado de reposo. Despejando obtenemos:

$$W_r = \frac{W \cdot \text{Posición cdg}}{\text{Distancia entre ejes}} \qquad W_f = W - W_r$$

Una vez determinadas los esfuerzos sobre las ruedas de la motocicleta en reposo, podemos calcular las cargas generadas durante la conducción.

#### 5.4.2.2. *Transferencia de carga*

Para realizar un correcto diseño del chasis es requisito indispensable que este sea capaz de soportar los esfuerzos generados en cualquier situación posible durante su conducción.

En aquellos momentos en los que el vehículo experimenta una aceleración aparece una transmisión de carga hacia una de las ruedas. Este efecto es fácilmente apreciable cuando se produce una frenada, ya que los esfuerzos que soporta la rueda delantera se incrementan, mientras que disminuyen en la trasera, creando un movimiento de cabeceo que tiende a levantar la motocicleta por la parte de atrás.

Existen formas para disminuir esta transferencia de carga, como por ejemplo aumentar la distancia entre ejes, bajar el centro de gravedad o reducir la masa del conjunto. Sin embargo, este fenómeno se dará siempre que la moto experimente una aceleración por lo que, para simplificar los cálculos y asegurarnos de que el chasis es capaz de soportar cualquier situación normal de conducción, vamos a estudiar las situaciones más desfavorables para asegurar su validez.

Este apartado está basado en la teoría de transferencia de cargas descrita por Vittore Cossalter en su libro *Motorcycle Dynamics* (Cossalter, 2006, pág. 102).

##### 5.4.2.2.1. *Aceleración máxima*

La motocicleta experimentará la máxima aceleración en el sentido de la marcha cuando se realice una salida desde reposo. El motor deberá ejercer un par lo suficientemente elevado como para vencer las fuerzas que se oponen al movimiento, sin llegar a superar la fuerza de rozamiento que permite la adherencia de los neumáticos con el suelo.

$$F_r > F_{aceleración} \geq (F_{inercia} + F_{pendiente} + F_{rodadura} + F_{aerodinámica} + F_{aire})$$

Tal y como indica la segunda ley de Newton, también conocida como ley fundamental de la dinámica, la aceleración que experimenta un cuerpo es proporcional a la fuerza neta aplicada sobre él. Por lo tanto, si conocemos la fuerza ejercida sobre un vehículo y su masa podremos determinar su aceleración, y viceversa, según la expresión:

$$F = m \cdot a$$

Suponemos una situación de aceleración desde una posición de parado, en terreno llano y sin viento, por lo que las únicas fuerzas que se oponen al movimiento

en este caso son la inercia  $F_i$  y la resistencia a la rodadura. Cuanto menor sean estas fuerzas mayor aceleración se alcanzará, por lo que vamos a estimar un coeficiente de inercia  $C_i = 1$  y despreciaremos el efecto de la resistencia a la rodadura, consiguiendo una situación más restrictiva.

$$F_r > F_{aceleración} \geq F_i$$

$$F_i = C_i \cdot m \cdot a = m \cdot a$$

Esta fuerza de inercia generará un momento flector que tenderá a levantar la rueda delantera en un movimiento de cabeceo según la altura del centro de gravedad  $h$ .

$$M_{i(f)} = F_i \cdot h$$

Entonces aparecerá una fuerza de reacción en la rueda trasera  $\Delta W_r$  que tiende a mantener el estado de reposo inicial del sistema, esto es lo que conocemos como transferencia de carga. Esta fuerza, a su vez, generará un momento flector de cabeceo en sentido contrario al anterior que, tomando como referencia el punto de contacto de la rueda delantera, podemos expresar como:

$$M_{r(f)} = \Delta W_r \cdot L$$

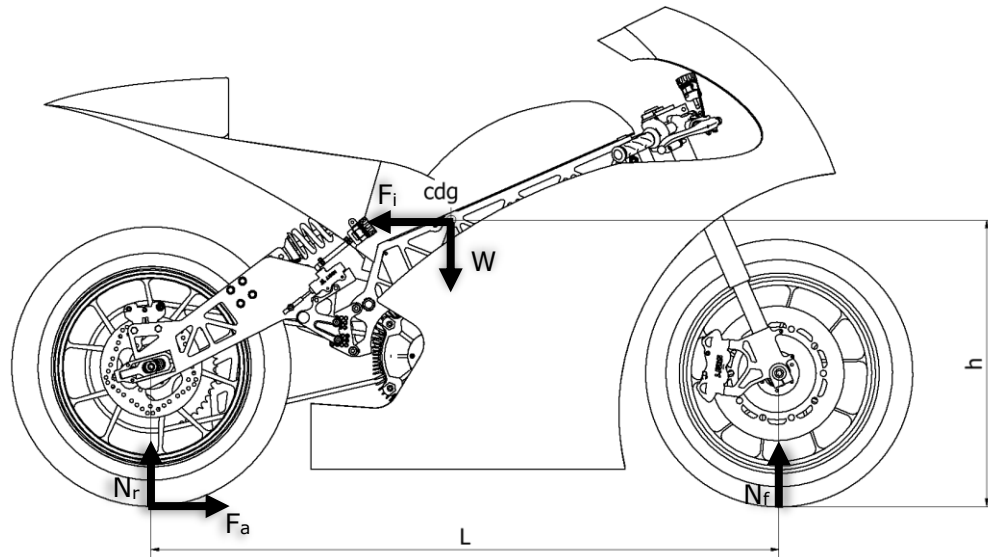
Para mantener el equilibrio en el sistema debe cumplirse que ambos momentos flectores tengan la misma magnitud  $M_{i(f)} = M_{r(f)}$ , por lo tanto, obtenemos la siguiente expresión de la que puede calcularse la transferencia de carga:

$$F_i \cdot h = \Delta W_r \cdot L$$

$$m \cdot a \cdot h = \Delta W_r \cdot L$$

$$\Delta W_r = \frac{m \cdot a \cdot h}{L}$$

El valor de la carga transferida a la rueda de atrás deberá ser de la misma magnitud que la liberada en la rueda de delante, es decir  $\Delta W_r = -\Delta W_f$ , y su magnitud estará directamente influenciada por la masa del sistema  $m$ , la altura del centro de gravedad  $h$ , la distancia entre ejes  $L$  y la aceleración de la motocicleta  $a$ .



*Ilustración 54: Fuerzas en la aceleración*

Aunque a primera vista podríamos pensar que el efecto de la fuerza de inercia debería generar una carga flectora sobre el chasis, lo cierto es que la transmisión de momentos será absorbida por el amortiguador trasero mediante la rotación del basculante.

El esfuerzo real que deben soportar las ruedas durante la aceleración será la suma de la carga en reposo y la transferencia producida, es decir:

$$N_f = W_f - \Delta W_f$$

$$N_r = W_r + \Delta W_r$$

El caballito o levantamiento de la rueda delantera se producirá en aquel momento en el que la transferencia de carga sea tan elevada que el esfuerzo en la rueda delantera sea nulo  $N_f = 0$  y, por consiguiente, la rueda trasera soporte todo el peso de la motocicleta y del piloto  $N_r = W$ .

#### **5.4.2.2.2. Frenada máxima**

La motocicleta experimentará la máxima deceleración en el sentido de la marcha cuando se realice una parada de emergencia desde una situación de máxima velocidad. Es decir, la moto tendrá que pasar de su velocidad más alta a 0km/h en el menor intervalo de tiempo gracias a la activación de los frenos. Prácticamente todo el esfuerzo generado por esta aceleración negativa es absorbido por la suspensión delantera y el chasis.

##### **5.4.2.2.2.1. Antes de frenar**

Para alcanzar la máxima velocidad posible el motor deberá ejercer un par lo suficientemente elevado como para vencer las fuerzas que se oponen al movimiento,

sin llegar a superar la fuerza de rozamiento que permite la adherencia de los neumáticos con el suelo.

$$F_r > F \geq (F_{inercia} + F_{pendiente} + F_{rodadura} + F_{aerodinámica} + F_{aire})$$

Tal y como indica la segunda ley de Newton, también conocida como ley fundamental de la dinámica, la aceleración que experimenta un cuerpo es proporcional a la fuerza neta aplicada sobre él. Por lo tanto, si conocemos la fuerza ejercida sobre un vehículo y su masa podremos determinar su aceleración, y viceversa, según la expresión:

$$F = m \cdot a$$

Suponemos una situación de deceleración desde una situación de máxima velocidad, en terreno llano y sin viento, por lo que las únicas fuerzas que se oponen al movimiento antes de accionar los frenos son las resistencias a la rodadura y la aerodinámica  $F_d$ . Cuanto menor sean estas fuerzas mayor velocidad se alcanzará, por lo que podemos despreciar el efecto de la resistencia a la rodadura, consiguiendo una situación más restrictiva. Resulta de extremada dificultad calcular con precisión la resistencia aerodinámica sin dedicarle un estudio propio.

$$F_r > F_{avance} \geq F_d$$

$$F_d = \frac{1}{2} \delta C_d A V^2$$

Sin embargo, aunque conozcamos la velocidad máxima a la que la motocicleta es capaz de desplazarse, resulta casi imposible determinar de manera analítica el tiempo que tardará en detenerse mediante el accionamiento de los frenos ya que el principal elemento limitador es la propia pericia del piloto y la fuerza que él mismo aplique.

#### 5.4.2.2.2. Instante de frenar

Es necesario determinar el tiempo que la moto tarda en detenerse por completo desde una velocidad determinada mediante ensayos y test. Conocidos estos parámetros, podremos calcular el valor correspondiente a la deceleración aplicando las ecuaciones del movimiento:

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \rightarrow v(t) = v_0 + at$$



De esta manera, si conocemos el valor de la deceleración experimentada, podemos calcular la fuerza de frenada aplicando la ley fundamental de la dinámica  $F = m \cdot a$

Suponemos una situación de deceleración desde una situación de máxima velocidad, en terreno llano y sin viento, por lo que la única fuerza que se opone a detener la moto tras accionar los frenos es la fuerza de inercia  $F_i$ . Cuanto menor sea esta fuerza mayor deceleración se alcanzará, por lo que vamos a estimar un coeficiente de inercia  $C_i = 1$ , consiguiendo una situación más restrictiva.

$$F_r > F_{frenada} \geq F_i$$

$$F_i = C_i \cdot m \cdot a = m \cdot a$$

Esta fuerza de inercia generará un momento flector que tenderá a levantar la rueda trasera en un movimiento de cabeceo según la altura del centro de gravedad  $h$ .

$$M_{i(r)} = F_i \cdot h$$

Entonces aparecerá una fuerza de reacción en la rueda delantera  $\Delta W_f$  que tiende a mantener el estado de reposo inicial del sistema, esto es lo que conocemos como transferencia de carga. Esta fuerza, a su vez, generará un momento flector de cabeceo en sentido contrario al anterior que, tomando como referencia el punto de contacto de la rueda trasera, podemos expresar como:

$$M_{f(r)} = \Delta W_f \cdot L$$

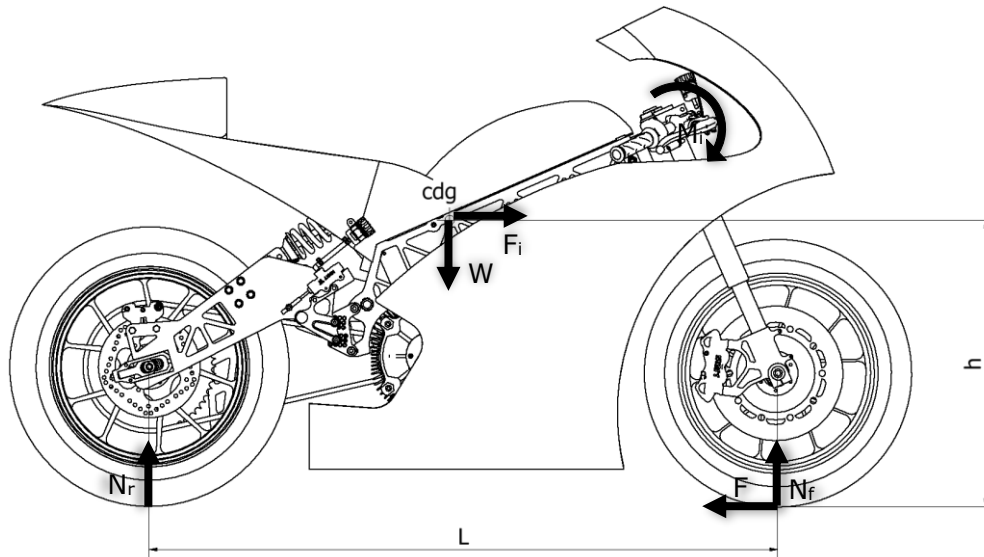
Para mantener el equilibrio en el sistema debe cumplirse que ambos momentos flectores tengan la misma magnitud  $M_{i(r)} = M_{f(r)}$ , por lo tanto, obtenemos la siguiente expresión de la que puede calcularse la transferencia de carga:

$$F_i \cdot h = \Delta W_f \cdot L$$

$$m \cdot a \cdot h = \Delta W_f \cdot L$$

$$\Delta W_f = \frac{m \cdot a \cdot h}{L}$$

El valor de la carga transferida a la rueda delantera deberá ser de la misma magnitud que la liberada en la rueda trasera, es decir  $\Delta W_f = -\Delta W_r$ , y su magnitud estará directamente influenciada por la masa del sistema  $m$ , la altura del centro de gravedad  $h$ , la distancia entre ejes  $L$  y la aceleración de la motocicleta  $a$ .



*Ilustración 55: Fuerzas en la frenada*

El esfuerzo real que deben soportar las ruedas durante la situación de frenada máxima será la suma de la carga en reposo y la transferencia producida, es decir:

$$N_f = W_f + \Delta W_f$$

$$N_r = W_r - \Delta W_r$$

El caballito invertido o levantamiento de la rueda trasera se producirá en aquel momento en el que la transferencia de carga sea tan elevada que el esfuerzo en la rueda trasera sea nulo  $N_r = 0$  y, por consiguiente, la rueda delantera soporte todo el peso de la motocicleta y del piloto  $N_f = W$ .

Debido a la altura del centro de gravedad aparece un momento flector en la pipa de dirección en el sentido de la marcha como consecuencia de la fuerza de reacción que experimenta el vehículo durante la frenada. Este será mayor cuanto más altas sean las horquillas de la suspensión.

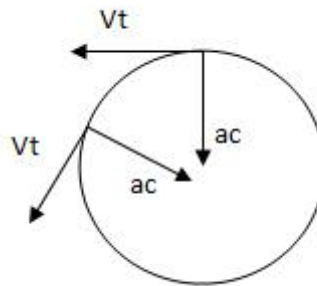
$$M_i = F_i \cdot h_{pipa}$$

Si consideremos el ángulo de lanzamiento del eje de dirección, debería producirse un momento opuesto generado por la fuerza normal de reacción en la rueda. Sin embargo, en una situación de frenada se produce un hundimiento en la horquilla y la tendencia de la rueda trasera a levantarse en un movimiento de cabeceo, por lo que el lanzamiento se aproximaría a un valor nulo, posicionando el eje de dirección casi vertical. Además, si no consideramos este momento flector contrario, la magnitud neta de esfuerzo que deberá soportar la pipa estará mayorada y garantizará una mayor seguridad en nuestros cálculos.

### 5.4.2.2.3. Paso por curva

Cuando un cuerpo experimenta una trayectoria curvilínea sobre el actúa una fuerza en dirección radial hacia el interior de la curva que tiende a cambiar el vector velocidad.

Si consideramos un objeto que se desplaza a velocidad constante en una dirección, su trayectoria se convertirá en una circunferencia si se le aplica una fuerza constante y perpendicular a la dirección en la que se mueve.



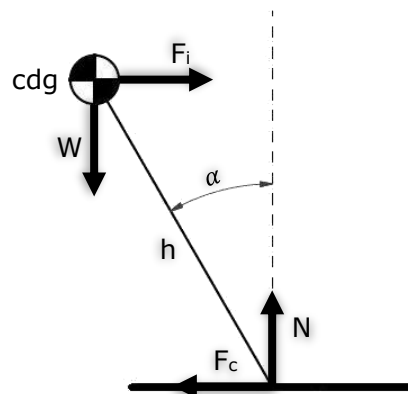
*Ilustración 56: Aceleración centrípeta (Rodríguez, 2013)*

En caso de que la aceleración tangencial sea cero, es decir, que el módulo de la velocidad sea constante, la aceleración centrípeta viene determinada por el radio de la curva y la velocidad a la que es atravesada.

$$a_c = \frac{v^2}{r}$$

El paso por curva de una motocicleta es una situación extremadamente compleja que requiere de un estudio dinámico propio para comprender como actúan todas las fuerzas que intervienen en dicha acción. Para simplificar su comprensión con la finalidad de estimar las cargas a soportar por el chasis, podemos considerar que se generará una fuerza de reacción en la motocicleta en sentido contrario a la fuerza centrípeta que experimente.

Para generar la aceleración centrípeta necesaria para tomar una curva determinada, el piloto de una motocicleta debe girar levemente el manillar, cambiando el ángulo de la rueda delantera con respecto al plano de simetría, al mismo tiempo que mantendrá la moto inclinada un ángulo  $\alpha$  en un movimiento de balanceo hacia el interior de la curva. Por lo tanto, el centro de gravedad del vehículo quedará descentrado con respecto al plano de simetría.



*Ilustración 57: Descentramiento del centro de gravedad (vista frontal)*

Este ángulo de inclinación  $\alpha$  es posible gracias al equilibrio entre los momentos flectores generados por la fuerza centrípeta y su reacción  $F_i$  sobre el centro de gravedad.

$$\sum M_{(cdg)} = 0$$

Por lo tanto, si consideramos el centro de gravedad como punto de referencia, podemos determinar el ángulo de inclinación  $\alpha$  de la motocicleta mediante el equilibrio de momentos, conocidos los esfuerzos a los que es sometida.

$$M_{N(cdg)} = M_{F_c(cdg)}$$

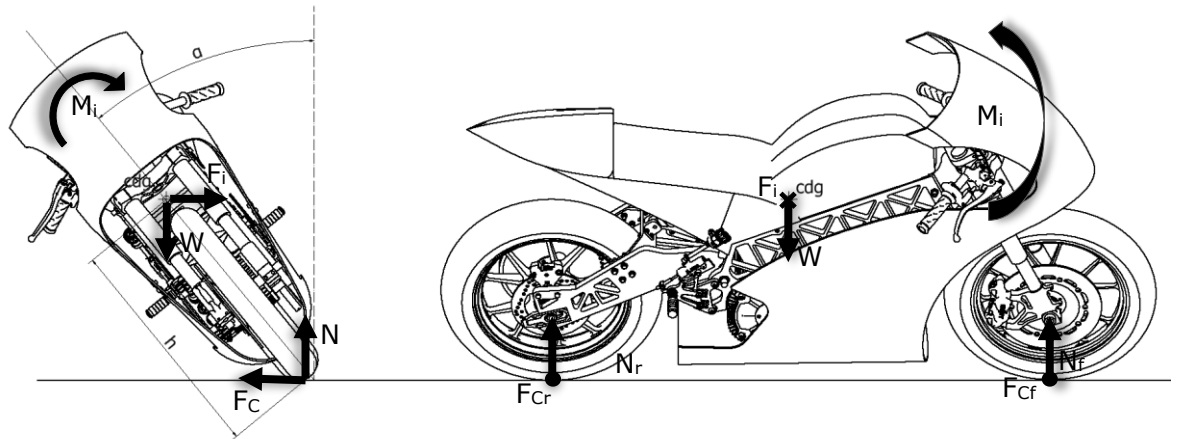
$$N \cdot h \cdot \sin \alpha = F_c \cdot h \cdot \cos \alpha$$

$$\alpha = \text{atan} \frac{F_c}{N}$$

Aunque algunas motocicletas de competición puedan alcanzar ángulos de inclinación superiores a los  $50^\circ$  cuando son manejadas por pilotos experimentados, la estabilización es posible gracias a la fuerza resultante de la suma vectorial entre la normal y la centrípeta. Además, en la práctica los pilotos se descuelgan de las motos hacia el interior de la curva para bajar el centro de gravedad del conjunto por lo que se alcanzaría un menor ángulo real.

Sin embargo, esta inclinación de los pilotos genera un descentramiento en el centro de gravedad del sistema con respecto al plano de simetría del vehículo, produciendo una fuerza de torsión en el instante de entrada en curva debido a la inercia de la motocicleta, que actúa principalmente sobre la pipa de dirección y el eje del basculante. Se trata de una carga muy difícil de calcular que requiere de un estudio dinámico propio para establecer con cierta precisión. Por lo tanto, habitualmente se emplea como valor de referencia los resultados obtenidos en la tesis doctoral de Giuseppe Polucci "*Dimensionamento di un telaio di motocicletta: Modello di*

*simulazione e risultati di calcolo*”, desarrollada en el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Roma, la cual establece un momento torsor de 128.31Nm en el paso de una Aprilia RSV1000 a 100km/h por una curva de 60 metros. (Polucci, 2005)



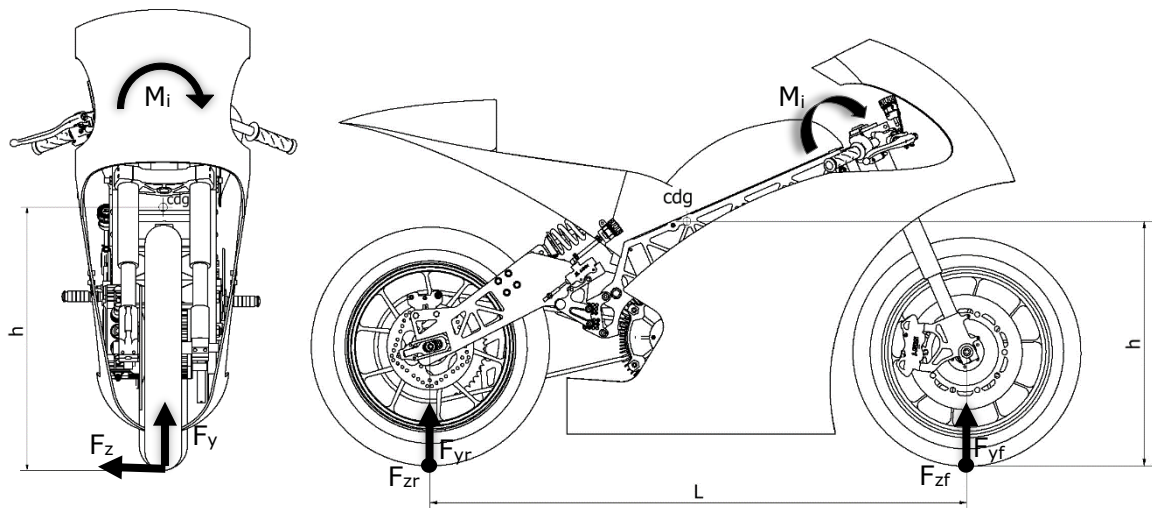
*Ilustración 58: Fuerzas en el paso por curva (sistema de referencia global)*

Dado que en un paso por curva la motocicleta se encuentra inclinada un ángulo  $\alpha$  determinado, las fuerzas que actúan sobre ella estarán desplazadas el mismo ángulo  $\alpha$  con respecto al eje de simetría. Por lo tanto, para facilitar su posterior análisis por elementos finitos, podemos calcular las componentes equivalentes en los ejes del vehículo mediante descomposición trigonométrica de las fuerzas.

$$F_z = N \sin \alpha - F_c \cos \alpha$$

$$F_y = N \cos \alpha + F_c \sin \alpha$$

Por lo tanto, a efectos de calcular los esfuerzos que debe soportar el chasis en el paso por curva de la motocicleta, podemos reducir las cargas ejercidas sobre el vehículo según se indica en la *Ilustración 59*.



*Ilustración 59: Fuerzas en el paso por curva (sistema de referencia del vehículo)*

### 5.4.3. Análisis por elementos finitos

La creación y evolución de herramientas informáticas ha hecho posible el desarrollo y la validación de estructuras cada vez más complejas. Aunque el modelado 3D es una técnica que facilita enormemente el diseño de componentes mecánicos, por sí sola no es capaz de asegurar la validez de un elemento sometido a determinadas condiciones de uso.

A grandes rasgos, si consideramos el modelo 3D como un prototipo virtual de una estructura, el análisis por elementos finitos (FEA) equivaldría a la realización de ensayos sobre dicho prototipo. Existen muchos tipos de análisis por elementos finitos que permiten estudiar problemas tan variados como la transferencia de calor entre objetos, el electromagnetismo, problemas fluidomecánicos e incluso acústicos.

Un análisis por elementos finitos es una técnica de simulación que permite discretizar un modelo 3D en múltiples regiones simplificadas y conectadas entre sí. De esta manera, se consigue la división de una geometría compleja en partes más pequeñas cuyo comportamiento es más fácil de estudiar.



*Ilustración 60: Mallado en llanta trasera*

La división de una estructura en regiones más pequeñas es lo que conocemos como mallado. Cada una de estas divisiones adquiere una forma geométrica simple, generalmente tetraédrica, cuyos vértices están compartidos por otras divisiones. Estos vértices, denominados nodos, dibujan una malla de elementos finitos a lo largo de toda la estructura.

Al estar todos los elementos finitos interconectados, será posible definir el comportamiento de la estructura global mediante la aplicación de ecuaciones de equilibrio, consideraciones físicas y relaciones constitutivas en cada elemento, construyendo un sistema de varias ecuaciones. Este modelado matemático es lo que se conoce como método de elementos finitos (FEM), y permite la resolución numérica de complejos problemas estructurales, de fluidos y físicos.

Como la pieza a estudiar se divide, tal y como indica su nombre, en un número finito de elementos, no es posible realizar un estudio que defina perfectamente el comportamiento de la estructura. Aunque a priori pueda parecer que la precisión de los resultados mejorará a mayor cantidad de elementos, lo cierto es que tiene más relevancia tanto la convergencia de los elementos como el tipo de estos, aportando mejores resultados las formas paralelepípedas que las tetraédricas.

En cualquier sistema a analizar se distinguen:

- **Dominio:** Espacio geométrico en que se describe y analiza el sistema.
- **Condiciones de contorno:** Son aquellas variables conocidas que determinan la respuesta del sistema, tales como desplazamientos, cargas, temperatura...
- **Incógnitas:** Aquellas variables que se desea obtener mediante el análisis, dependientes de las condiciones de contorno del sistema.



De esta manera, un dominio continuo es dividido en elementos discretos sobre los que se definen las incógnitas fundamentales del problema, que son los grados de libertad de cada uno de los nodos, debiendo resolver su desplazamiento nodal en los elementos estructurales para obtener cualquier otra incógnita que nos interese. Conocido el valor nodal, es posible plantear la ecuación diferencial que defina el comportamiento continuo del elemento, obteniendo fórmulas mediante funciones de interpolación que relacionen el comportamiento de cualquier punto individual del continuo con los valores de los nodos.

A grandes rasgos, podemos definir las fuerzas y momentos experimentados por una estructura como el producto de su matriz de rigidez por el vector desplazamientos:

$$\{f\} = [k]\{u\}$$

Por lo tanto, conocidas las condiciones de contorno, tanto en forma de empotramientos (valores nulos en el vector desplazamientos  $\{u\}$ ) como de fuerzas y momentos (aplicados mediante el vector  $\{f\}$ ), y las propiedades del material (reflejadas en la matriz de rigidez  $[k]$ ), podemos resolver el sistema para conocer todos los valores del vector desplazamientos.

Como sabemos, es posible determinar la deformación de un cuerpo conocida su longitud inicial y la variación experimentada, según la expresión  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ . Gracias a ello, conocido el vector desplazamientos podremos determinar tanto la deformación experimentada por la estructura a analizar como la tensión que experimenta mediante la relación  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ , en la que E representa el módulo de elasticidad del material. (The Efficient Engineer, 2021)

La relación entre el sistema de cargas y esfuerzos reales con el sistema virtual de desplazamientos viene dada por la ecuación del principio de los trabajos virtuales:

$$\int_v \{\delta\varepsilon\}^T [C] \{\varepsilon\} dv = \int_v \{\delta u\}^T (\{X\} - \rho\{\ddot{u}\}) dv + \{\delta u\}^T \{\tau\} ds$$

Para definir el campo de desplazamientos del continuo en función de los nodos que lo acota, se toma un conjunto de funciones de interpolación en las que se sustituye la ecuación del principio de los trabajos virtuales, obteniendo el siguiente sistema:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{P\}$$

Por lo tanto, las matrices elementales para cualquier tipo de discretización pueden determinarse mediante la matriz de masa consistente  $[M]$ , la matriz de rigidez  $[K]$  y la matriz de cargas nodales consistentes  $\{P\}$  (Fuentes Calles, 2011)

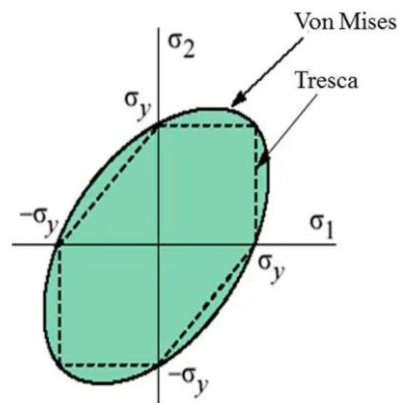
A efectos prácticos, en nuestro caso la metodología a seguir pasará por importar un modelo 3D diseñado en el software Autodesk Inventor, introduciendo los datos que nos faciliten los correspondientes proveedores del material a utilizar. Las cargas se determinarán previamente mediante un estudio dinámico de la motocicleta en las situaciones más desfavorables para acotar correctamente las condiciones de contorno.

El esfuerzo de procesamiento que debe realizar el simulador incrementa conforme disminuimos el tamaño de la malla, lo que mejora precisión de los resultados. Por tanto, es necesario encontrar un punto intermedio que nos permita alcanzar un resultado satisfactorio próximo al real sin que ello dispare el coste computacional. Esto es lo que se conoce como análisis de sensibilidad de malla, cuya finalidad es encontrar el máximo tamaño de malla a partir del cual se estabilizan los resultados. Debido a la dificultad que entraña este estudio, que requiere un trabajo en sí mismo, tras hablar con profesores especialistas en cálculos de estructuras y de realizar diferentes consultas académicas en las fuentes que se citan en el apartado 8. *Bibliografía*, se determina que un tamaño de mallado de 2mm es suficiente para obtener unos resultados satisfactorios en el presente proyecto.

Cabe destacar que el análisis a realizar no es un estudio dinámico real, sino que se realiza una extrapolación a una situación estática gracias al procedimiento descrito en el apartado 5.4.2. *Hipótesis de carga*.

La finalidad de realizar un análisis por elementos finitos es asegurar la validez de un chasis que se implementará en una motocicleta eléctrica de competición, puesto que deberá ser capaz de soportar unos esfuerzos determinados. Por lo tanto, para garantizar la seguridad del piloto será imprescindible que no se alcance en ningún momento una tensión superior al límite elástico del material que pueda afectar a la integridad estructural del sistema.

Existen diferentes teorías de fallo para determinar una tensión equivalente que pueda ser comparada con el límite elástico del material, con el objetivo de verificar la validez de la estructura. Dos de las más empleadas son la teoría de Von Mises y la teoría de Tresca, que se diferencian principalmente en la linealidad de sus funciones de plastificación.



*Ilustración 61: Teorías de falla (karlossantiuste, 2015)*

La función de plastificación que sigue la teoría de Tresca es lineal por tramos, mientras que la de Von Mises es no lineal. A pesar de que ambos criterios aportan resultados muy similares, la teoría de Von Mises garantiza una mayor seguridad en nuestros cálculos debido al mayor rango de valores que recoge frente a Tresca.

Por todo ello, la teoría de fallo más extendida en los análisis por elementos finitos de materiales dúctiles, como los metales, es la tensión equivalente de Von Mises. Se trata de una magnitud proporcional a la energía de distorsión que puede calcularse mediante el tensor tensión de un punto concreto de un sólido deformable, siguiendo la expresión:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 \right] + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)}$$

La tensión equivalente de Von Mises proporciona un valor escalar dependiente de las tensiones normales y tangenciales en cada una de las direcciones del espacio para un punto concreto de la estructura. De esta manera, podemos determinar que una pieza alcanzará la fluencia cuando la tensión equivalente de Von Mises supere el límite elástico del material, lo que arruinaría la estructura al producir deformaciones irreversibles. (Remacha, 2010)

## 6. DESARROLLO

Una vez estudiadas las motocicletas que han antecedido a este proyecto, así como los fundamentos teóricos en los que se basa, procedemos a detallar el desarrollo tanto del diseño como de los cálculos estructurales realizados.

### 6.1. DATOS DE PARTIDA

Es importante establecer unas pautas iniciales que delimiten las capacidades y el alcance del proyecto, debiendo acondicionar su desarrollo a las posibilidades y recursos con los que cuenta el equipo, así como a sus obligaciones.

#### 6.1.1. Restricciones

El presente trabajo está enmarcado en la participación del equipo EUPLA Racing Team en la VI edición del campeonato internacional MotoStudent. Por lo tanto, desde la propia organización promotora de la competición se imponen una serie de obligaciones y restricciones que condicionan el diseño de la motocicleta.

En primer lugar, es requisito indispensable utilizar ciertos componentes comunes para todos los equipos, con la finalidad de igualar las capacidades de cada prototipo.

*Tabla 3: Componentes MotoStudent (Moto Engineering Foundation, 2019)*

Componente	Modelo
Motor eléctrico	Engiro-MS1920
Dispositivo de vigilancia de aislamiento (IMD)	Bender Isometer IR155-3203/IR155-3204
Juego de neumáticos	Bridgestone Battlax
Pinzas y bombas de freno	J.Juan Racing

Estos productos son proporcionados por la organización a todos los equipos en el momento de formalizar la inscripción, por lo que el diseño de todos los prototipos deberá adecuarse a ellos.

Además, la normativa de la competición establece una serie de restricciones en el desarrollo de las motocicletas. Estas se reflejan en mayor detalle en los Anexos, sin embargo, podemos resumirlos a grandes rasgos en restricciones geométricas o restricciones de materiales, según las *Tabla 4* y *Tabla 5*.

*Tabla 4: Restricciones geométricas (Moto Engineering Foundation, 2019)*

Elemento	Min	Max
Anchura semimanillares	480 mm	-
Angulo de inclinación lateral libre	50°	-
Distancia libre al pavimento (descargado)	100 mm	-
Banda de rodadura libre de los neumáticos	15 mm	-
Anchura asiento	-	450 mm
Anchura carenado	-	600 mm
Altura entre asiento y colin	-	150 mm
Peo total sin piloto	95 kg	-
Radios bordes carenado	1mm	-
Radio alerones carenado	2,5mm	-
Capacidad quilla	2,5 L	-
Guardabarros delantero	-	135°
Llanta posterior cubierta	-	180°
Radios piezas manillares	2 mm	-
longitud leva de embrague	-	200 mm
Radio terminaciones estriberas	8 mm	-
Angulo de giro	15°	-
Eje de rueda saliente	-	30 mm

*Tabla 5: Restricciones de materiales (Moto Engineering Foundation, 2019)*

Elemento	Permitidos	Prohibidos
Chasis	Todos	-
Subchasis	Todos	-
Basculante	Todos	-
Topes anticaídas	Nailon fibra o similares	-
Carenado	Todos	-
Manillares	-	Aleación ligera, magnesio y titanio
Discos de freno	Aleaciones de acero	Carbono o cerámicos
Llantas	Acero, aluminio, Magnesio	Composites

### 6.1.2. Geometría y parámetros de diseño

Una de las primeras decisiones que debe tomarse de forma consensuada entre todos los miembros del equipo es el valor de las cotas generales de la motocicleta. La única medida sobre la que no tenemos posibilidad de actuar son los diámetros de las ruedas, ya que los neumáticos Bridgestone a utilizar son proporcionados por la propia organización a todos los equipos.

MotoStudent es un campeonato en el que, a grandes rasgos, las características de las motocicletas participantes equivalen a Moto 3. En la *Tabla 6* se muestran las dimensiones de los modelos participantes en esta competición, y algunos de la antigua categoría de 125cc, que pueden servirnos como orientación para determinar las dimensiones de nuestra motocicleta.

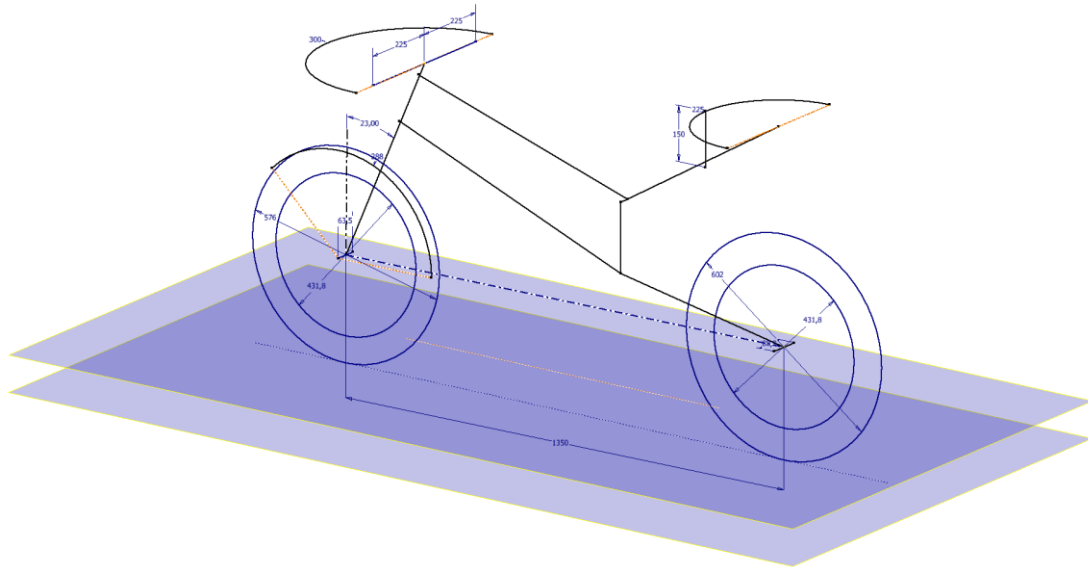
*Tabla 6: Dimensiones de motocicletas de competición (García García, 2013)*

Motocicleta	Lanzamiento	Distancia entre ejes (mm)
Honda NSF250R	22°36'	1245
Aprilia RS	23°	1250
Aprilia RS 125	23°	1345
Derbi GPR 125	23°	1355
Cagiva Mito 125	22°50'	1375
Yamaha YZF R125	23°	1355

Por lo tanto, tras los buenos resultados que reportaron las dimensiones de los prototipos utilizados tanto en la edición IV y V por el equipo EUPLA Racing Team, y habiendo verificado que estas medidas se encuentran ampliamente extendidas en modelos comerciales de altas prestaciones, establecemos un ángulo de lanzamiento de 23° y una distancia entre ejes de 1350mm.

De esta manera, conseguimos una motocicleta con un tamaño similar a otros modelos deportivo, buscando un tamaño reducido para minimizar el peso pero que, a su vez, tenga una gran capacidad para alojar componentes como la batería o el motor. El hacer uso de una distancia entre ejes tan extendida en el mercado facilitará la incorporación de componentes comerciales, especialmente en caso de adquirir un carenado de competición.

Para asegurarnos en todo momento de que se cumplen las medidas establecidas, tanto a nivel de diseño como por normativa, se opta por realizar un boceto inicial en Autodesk Inventor que servirá como referencia para establecer las restricciones geométricas y las dimensiones correctas de todos los elementos diseñados.



*Ilustración 62: Boceto inicial*

Realizar un boceto como elemento de referencia que contenga todas las cotas generales de la motocicleta permitirá diseñar y ensamblar virtualmente los diferentes componentes que la componen, asegurándonos de que en todo momento se cumple con las medidas correctas y permitidas.

Cabe destacar que, durante el proceso de diseño mediante modelado 3D, resulta de extrema dificultad estimar correctamente la compresión que experimentarán las suspensiones en el estado normal de conducción. Debido al peso de la propia motocicleta y del piloto, en un estado de reposo las suspensiones se hundirán una cierta distancia, bajando el centro de gravedad y aumentando el ángulo de lanzamiento.

Es de vital importancia tener en cuenta que la propia estructura de una motocicleta puede experimentar cuatro movimientos angulares y uno lineal, que deberán poder ejecutarse de forma libre en todo momento:

- **Eje trasero:** La rueda trasera deberá estar centrada y poder rodar con libertad, sin que ningún elemento del basculante interfiera en su giro.
- **Eje delantero:** La rueda delantera deberá poder rodar con libertad y estar centrada, sin que nada interfiera en su giro.
- **Eje de dirección:** La rueda delantera podrá cambiar su dirección, en este caso un mínimo de  $15^\circ$  respecto al plano de simetría, limitando este movimiento al hacer tope con la horquilla sobre el chasis.
- **Eje del basculante:** Debido a la compresión de la suspensión trasera, la parte trasera de la motocicleta se hundirá en un movimiento circular



alrededor del eje del basculante, bajando la altura de este y aumentando el ángulo de lanzamiento. Es muy importante que el colín nunca llegue a tocar el neumático trasero.

- **Compresión de la horquilla:** La compresión de la suspensión delantera causará el hundimiento de la parte delantera de la motocicleta, disminuyendo el ángulo de lanzamiento. Es muy importante que la tija inferior nunca llegue a tocar el neumático delantero.

### 6.1.3. *EUPLA Racing Team*

El desarrollo del presente trabajo está sujeto a la tercera participación del equipo EUPLA Racing Team en la VI edición de la competición internacional MotoStudent y, como tal, parte de los recursos destinados a su desarrollo vienen destinados por el propio equipo.

En la IV edición del campeonato, EUPLA Racing Team hizo uso de un chasis de doble viga de aluminio, mientras que en la siguiente optó por implementar una estructura tubular de acero al cromo molibdeno. Por lo tanto, para el presente trabajo se cuenta con la experiencia adquirida en dos de las tipologías de chasis más extendidas.

El legado proporcionado por el equipo (En recursos económicos, académicos, materiales y comerciales) condicionará las decisiones de diseño para el presente trabajo, que buscará mejorar los resultados anteriores y optimizar los costes de producción. Desde EUPLA Racing Team se establece la reducción de peso y la facilidad de montaje como objetivos principales en esta edición en la que, debido a la situación sanitaria ocasionada por el Covid-10, se han visto limitados el presupuesto y las posibilidades de externalizar procesos. Por lo tanto, en la medida de lo posible, la fabricación y el desarrollo del prototipo deberá poder realizarse en su mayor parte en las propias instalaciones de la Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia y, en su defecto, mediante la ayuda de una empresa colaboradora.

## 6.2. JUSTIFICACIONES DE DISEÑO

Resultan de gran importancia aspectos como la facilidad de montaje, la resistencia o el coste económico de la estructura, por lo que vamos a realizar un estudio de las diferentes posibles alternativas tanto de materiales como de tipologías de chasis.

Ante las necesidades requeridas para el correcto desarrollo del presente trabajo, se opta por realizar una comparativa ponderada que permita tomar decisiones claras y fundamentadas en cuanto al diseño del chasis.

### *6.2.1. Tipología de chasis*

La geometría de nuestro chasis debe ser capaz de sujetar todos los componentes necesarios para el funcionamiento de la motocicleta. Por lo tanto, primará el espacio disponible en su interior para poder alojar una batería de grandes dimensiones, así como el motor eléctrico de la marca Engiro proporcionado por la competición. Primará la facilidad de fabricación y montaje ya que, en la medida de lo posible, estos procesos se llevarán a cabo en las instalaciones del equipo.

En términos físicos, la estructura deberá ser lo más rígida posible, evitando en todo momento generar concentradores de tensiones para garantizar que nunca se supere el límite elástico del material. El reparto de las masas deberá ser óptimo y equilibrado para conseguir la máxima eficiencia de conducción.

Por su parte, el peso estará más influenciado por el material seleccionado y la geometría que por la tipología per se, por lo que no se tendrá en cuenta en este apartado. Lo que sí resulta importante en la selección de la estructura es el espacio que proporciona, ya que condicionará el acceso a los componentes interiores, como la batería.

Es importante tener en cuenta que, a diferencia de las motocicletas de combustión, en las motos eléctricas la mayor parte de la masa y del volumen se divide entre el motor y la batería, estando más concentrados en esta última. Por lo tanto, debemos descartar el desarrollo de un chasis autoportante ya que su objetivo es el de que la masa principal actúe como elemento estructural. Esto resulta inviable al estar dividida entre dos elementos, especialmente cuando el mayor de ellos, la batería, requeriría de un armazón propio para evitar dañar las celdas frente a cargas externas, echando por tierra la propia razón de ser de las estructuras autoportantes.

Por otra parte, también debemos descartar los chasis monoviga de simple cuna y los monocasco. En el caso de las estructuras monoviga de simple cuna, la rigidez que proporcionan es considerablemente menor que en otras tipologías por lo que, aunque son empleados en motos de bajas prestaciones, no tienen cabida en el mundo de la competición. En cuanto a los chasis monocasco, estos suelen estar reservados para vehículos experimentales, ya que la tecnología y el estudio previo requerido para su desarrollo los hacen muy caros y difíciles de fabricar, puesto que es una técnica relativamente nueva y poco extendida en el mundo del motociclismo. Por lo tanto, una

estructura monocasco requeriría de unos recursos, tanto económicos como académicos, que superan el alcance de este trabajo.

Considerando todo esto, las posibles estructuras a diseñar son: monoviga de doble cuna, multitubular y doble viga. Para tomar una decisión fundamentada, se realiza una comparativa ponderada en la que se tienen en cuenta los siguientes criterios:

- **Experiencia previa:** Gracias a las anteriores dos participaciones de EUPLA Racing Team en el campeonato, se cuenta con información y datos relativos a los chasis de doble viga y multitubular que se desarrollaron en su momento.
- **Coste:** La estructura más económica es la monoviga ya que, a grandes rasgos, tan solo consta de unos pocos tubos de sección constante doblados y soldados entre sí. Sin embargo, el equipo cuenta con el patrocinio de una empresa especialista en el corte por agua y otra de mecanizados, por lo que el coste de fabricación de un chasis de doble viga se ve reducido considerablemente.
- **Espacio interior:** A diferencia del chasis monoviga, podemos realizar estructuras perimetrales tanto multitubulares como de doble viga. La gran ventaja de estas frente al monoviga es que disponemos de tanto espacio vertical como necesitemos, pudiendo ensanchar el chasis para acomodar el alojamiento de la batería.
- **Facilidad de fabricación:** El principal perjudicado en este criterio es el chasis multitubular ya que requiere cortar una gran cantidad de tubos de forma muy precisa para realizar una soldadura apropiada, incurriendo en el gasto adicional de un banco de soldadura específico para prevenir las deformaciones por dilatación y contracción.
- **Facilidad de montaje:** En este caso el claro ganador es el chasis monoviga puesto que, aunque sería necesario fabricar una bancada auxiliar para asegurar que se mantienen las cotas geométricas durante la soldadura, la cantidad de cordones será mucho menor que en el multitubular. Por otra parte, el chasis de doble viga requerirá de un gran número de elementos de unión (como pernos) o, en caso de optar por soldadura, el uso de aluminio difícilmente podrá superar la soldabilidad del acero.
- **Rigidez:** El uso de una estructura perimetral, ya sea multitubular o de doble viga, permite que la batería aporte cierta rigidez al conjunto frente

a esfuerzos flectores. Además, es posible añadir travesaños a modo de rigidizantes.

En la *Tabla 7* se asigna una ponderación numérica que refleja el porcentaje de importancia de cada uno de los criterios contemplados. Cuando una de las tipologías presente una clara ventaja sobre las otras en un criterio concreto, se le asignará un valor binario positivo y se sumará al resultado el porcentaje correspondiente a su ponderación. De esta manera, cuanto más cercano se encuentre un resultado de 100 más se adaptará ese tipo de chasis a nuestras necesidades.

Las puntuaciones se han asignado según las consideraciones individuales descritas en el listado anterior con respecto a cada uno de los criterios.

*Tabla 7: Comparativa de tipologías de chasis*

<b>Criterio</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Monoviga</b>	<b>Multitubular</b>	<b>Doble viga</b>
Experiencia previa	30%	0	1	1
Coste	20%	1	0	1
Espacio interior	20%	0	1	1
Facilidad de fabricación	10%	1	0	1
Facilidad de montaje	10%	1	0	0
Rigidez	10%	0	1	1
<b>Resultado</b>	<b>100%</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>90</b>

En base a los criterios establecidos y las puntuaciones obtenidas para cada tipo de chasis, la tipología que mejor se adecúa a las necesidades y recursos del equipo es la de doble viga, seguida del multitubular. Gracias a las anteriores ediciones del campeonato, en EUPLA Racing Team se cuenta con numerosa documentación relativa a los diseños previos realizados en estas dos tipologías, por lo que se toma este legado como punto de referencia en el nuevo diseño.

### **6.2.2. Estudio y selección de material**

La validez de cualquier elemento estructural viene determinada no solo por su diseño y geometría, sino también por el material en el que está fabricado. Las propiedades particulares del material condicionan los esfuerzos a los que podrá ser sometido el chasis y limitarán el diseño de las diferentes piezas, afectando enormemente a los procesos de fabricación. La soldabilidad o capacidad de mecanizado resultan fundamentales si la fabricación de la estructura requiere de estos procesos.

Sin embargo, para el caso que nos ocupa, podemos considerar que las características más importantes y que determinan la implementación de un material en lugar de otro vienen dadas por la naturaleza competitiva del proyecto. Una motocicleta veloz requiere que su peso sea reducido, por lo que primará una baja densidad en los materiales, así como un elevado límite elástico para que el chasis sea capaz de soportar cualquier esfuerzo al que pueda ser sometido durante el campeonato.

La elección de un material siempre debe estar fundamentada, además de por sus propiedades físicas y mecánicas, por su proceso de fabricación o mecanizado y posterior implementación en el ensamblaje. Por ejemplo, aunque el titanio tenga unas propiedades mecánicas extraordinarias, su mecanizado es difícil y costoso; similar es el caso de la fibra de carbono, en el que su resistencia a menudo no compensa el quebradero de cabeza que suponen las uniones atornilladas. Por lo tanto, es fundamental alcanzar un compromiso entre las propiedades físicas del material y sus capacidades de fabricación.

### 6.2.2.1. *Materiales descartados*

A pesar de que la normativa que rige la competición en la que se enmarca el desarrollo de este proyecto permite la utilización de cualquier material para el chasis, debemos adaptar el diseño de la estructura a los recursos actuales del equipo EUPLA Racing Team. Por lo tanto, las opciones quedan mucho más acotadas al descartar aquellos materiales cuyo acceso y utilización quedan fuera de nuestro alcance en estos momentos:

- **Magnesio:** A pesar de ser el metal con la menor densidad, el uso de este material viene condicionado por el componente con el que esté aleado, ya que tanto su corta vida a fatiga como su resistencia a la corrosión lo hacen inadecuado para la aplicación considerada en este trabajo. Además, su manipulación conlleva riesgos de ignición y deflagración, por lo que debe realizarse por personal cualificado.
- **Titanio:** Se trata de un material idóneo en aplicaciones de alta exigencia, pudiendo resistir grandes cargas y permanecer estable frente a agentes corrosivos. Sin embargo, sus buenas prestaciones mecánicas no compensan el esfuerzo que supone para el equipo a nivel económico debido a su difícil mecanizado, siendo el aluminio y el acero unas alternativas mucho más viables.
- **Fibra de carbono:** Es posiblemente el material con mejor relación resistencia-densidad, sin embargo, las propiedades mecánicas de la

estructura dependen directamente tanto de la matriz empleada y del proceso de conformado como de la orientación de las fibras. Por lo tanto, resulta extremadamente difícil analizar correctamente sus propiedades mediante los softwares de simulación de los que disponemos, por lo que su uso supera los recursos del equipo a nivel técnico y económico.

Una vez acotado el abanico de opciones de las que disponemos para diseñar el chasis, los materiales a considerar se reducen tan solo a las aleaciones de acero y de aluminio. Esta decisión resulta beneficiosa para el desarrollo del presente trabajo ya que se trata de los dos metales más empleados en el motociclismo, y desde el equipo EUPLA Racing Team se cuenta con experiencia e información técnica sobre ambos de ellos.

Las necesidades actuales del equipo requieren tomar como primordial tanto el proceso de fabricación del chasis como su coste económico, buscando un diseño simple y barato, procurando externalizar el menor número de procesos posibles.

### 6.2.2.2. Acero

El acero es, por méritos propios, el material más extendido en la fabricación de chasis para el motociclismo. Su buena soldabilidad lo hacen ideal en estructuras multitubulares, en las que la calidad y resistencia de los cordones es fundamental para la integridad del sistema.

En términos generales, cuenta con unas propiedades mecánicas que lo hacen un material idóneo para trabajar, no solo por permitir una buena mecanización, sino también por ser muy dúctil, tenaz y maleable.

Es habitual encontrar aleaciones con elementos de adición como el níquel, el cromo, el aluminio, el molibdeno o el cobre que modifican la composición y propiedades del acero. A continuación, se realiza un estudio detallado de las diferentes aleaciones consideradas, con los datos e información proporcionada por los proveedores del equipo *R.Andrade*, *German Special* e *Ipargama*.

#### 6.2.2.2.1. 1.1730 (F-114 - C45)

El acero 1.1730 es uno de los más empleados en la construcción mecánica en general, con uso habitual en la fabricación de automóviles y motores. Se trata de un material muy versátil con buena maquinabilidad, por lo que es posible verlo en aplicaciones de todo tipo al ser una alternativa económica y fácilmente conformable.

Tabla 8: Propiedades del acero 1.1730

Acero	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Límite elástico (MPa)	Precio (€/kg)
<b>1.1730</b>	7.85	>305	1.15 - 1.51

Existe la posibilidad de aplicar un tratamiento térmico, como temple o revenido, sin embargo, la soldabilidad de este acero no es del todo buena ya que pueden producirse tensiones y fracturas tras el enfriamiento que arruinarían el material.

#### 6.2.2.2.2. 1.7227 (F-125 - 42CrMo4)

Se trata de un acero constructivo aleado al cromo molibdeno, caracterizado por una alta resistencia y tenacidad. Sus aplicaciones más habituales se destinan a la fabricación de elementos como bielas, ejes y cigüeñales en el sector de la automoción, que están sometidos a una alta demanda y desgaste.

En caso de que no se encuentre lubricado, es habitual aplicar un tratamiento térmico a este acero para protegerlo de la corrosión, ya que no es considerado inoxidable.

Tabla 9: Propiedades del acero 1.7227

Acero	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Límite elástico (MPa)	Precio (€/kg)
<b>1.7227</b>	7.9	>650	1.42 - 1.77

A pesar de la elevada resistencia mecánica que ofrece, es un acero que presenta una soldadura difícil en comparación a otras aleaciones, por lo que debe ser descartado en el caso de optar por una estructura multitubular. Sin embargo, resulta idóneo en piezas internas con espesores bajos, como ejes o travesaños.

#### 6.2.2.2.3. 1.7218 (F-222 - 25CrMo4)

Presenta una buena tenacidad y resistencia a la tracción, siendo un material muy versátil empleado en elementos como ejes, turbinas o nudillos de dirección en el sector aeronáutico y de la automoción

La composición del acero 1.7218 se asemeja mucho a la del 1.7227, hasta el punto de encontrar la única diferencia entre ellos en el porcentaje de carbono de la aleación (42% de C en el 1.7227, frente a 25% en el 1.7218). Por lo tanto, sus características mecánicas son muy similares.

Tabla 10: Propiedades del acero 1.7218

Acero	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Límite elástico (MPa)	Precio (€/kg)
<b>1.7218</b>	7.75	>600	1.46 - 1.91

La característica diferenciadora del 1.7218 es su soldabilidad, muy superior a la del 1.7227. Por lo tanto, es posible fabricar estructuras con tubos y perfiles soldados con este material, presentando una elevada resistencia similar a la de otras aleaciones.

Este acero resulta ideal en la fabricación de estructuras multitubulares ya que cuenta con muy buenas propiedades mecánicas sin sacrificar soldabilidad, aunque debe tenerse en cuenta que es necesario aplicar un tratamiento superficial posterior que proteja al material de la corrosión ya que podría llegar a oxidarse debido a factores ambientales.

#### 6.2.2.2.4. 1.4006 (F-311 – X12Cr13)

Acero martensítico que presenta buena resistencia frente a medios corrosivos, empleado principalmente en industrias de alta exigencia como la petroquímica o hidráulica en las que es sometido a agentes oxidantes externos.

Es aleado con cromo silicio y manganeso para formar un acero inoxidable extra suave, al que se le aplica un tratamiento térmico de templado.

*Tabla 11: Propiedades del acero 1.4006*

Acero	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Límite elástico (MPa)	Precio (€/kg)
<b>1.4006</b>	7.70	>450	4.14 - 5.02

Se trata de un acero inoxidable que permite su soldadura, aunque con mayor dificultad que el 1.7218 ya que deja de ser inoxidable a partir de los 750°C, por lo que generalmente requiere de un precalentamiento y templado posterior para asegurar el conformado de los cordones de soldadura, debiendo evitar la humedad en todo momento. (Dew-Stahl, 2007)

#### 6.2.2.3. Aluminio

La mayoría de motocicletas de altas prestaciones incorporan la mayor parte de sus componentes estructurales fabricados en aluminio, debido a su baja densidad en comparación al acero y a las diferentes propiedades que puede adquirir tras ser aleado con materiales como el Silicio o el Magnesio.

En general, se trata de un material con baja soldabilidad, por lo que es común encontrarlo en tipologías de chasis de doble viga en las que se reduzcan al máximo las soldaduras necesarias. Por otro lado, goza de una buena capacidad de mecanizado que lo hace ideal para ser trabajado en las instalaciones del equipo.



Gracias a la incorporación de otros componentes aleantes, las características del material final podrán verse afectadas en gran medida. Por lo tanto, el aluminio es un material muy versátil cuyas cualidades pueden adaptarse a cualquier tipo de trabajo, por lo que empleado en todo tipo de aplicaciones.

A continuación, se realiza un estudio detallado de las diferentes aleaciones consideradas, con los datos e información proporcionada por los proveedores del equipo *R.Andrade y Alcupla y alacermas*.

### 6.2.2.3.1. 5083

El principal componente aleante del aluminio 5083 es el magnesio y, como tal, presenta la menor densidad de todos los materiales estudiados en este trabajo. Es empleado en aplicaciones que requieren la mayor ligereza posible.

Además, se trata de un material que presenta facilidad para el mecanizado y la soldadura, así como una excelente resistencia a la corrosión tanto atmosférica como marina, razón por la cual es habitual encontrarlo en el sector naval.

*Tabla 12: Propiedades del aluminio 5083*

<b>Aluminio</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Límite elástico (MPa)</b>	<b>Precio (€/kg)</b>
<b>5083 H111</b>	2.66	>110	5.78 - 6.25

Esta aleación se presenta en diferentes calidades, siendo la más habitual la H111, aunque también la que menor límite elástico tiene. Una calidad intermedia, como la HX6, puede alcanzar hasta los 305MPa.

Aunque su uso está extendido en cierta maquinaria ligera y moldes de conformado, se trata de un material poco habitual por lo que es difícil conseguir acceso a calidades superiores a la H111.

### 6.2.2.3.2. 6082

Se trata de una aleación en la que los principales elementos aleantes son el magnesio y el silicio. Muy similar en cuanto a prestaciones con las tan conocidas 6061 y 6063, el aluminio 6082 es un metal muy versátil que puede ser encontrado en todo tipo de aplicaciones, en sectores como el de la automoción, el naval o industria en general.

Como contraparte, las zonas soldadas de este material pueden debilitar la estructura ya que se pierde alrededor de un 30% de su capacidad de carga. Sin embargo, esto puede solventarse mediante determinados tratamientos de maduración artificial, como el temple T6.

Al igual que sucede con el aluminio 5083, las propiedades mecánicas de este metal varían enormemente dependiendo del tratamiento térmico al que es sometido, ya que el material per se apenas cuenta con un límite elástico de 60MPa. Los más extendidos en la industria son tanto el T651 como el T6.

*Tabla 13: Propiedades del aluminio 6082*

<b>Aluminio</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Límite elástico (MPa)</b>	<b>Precio (€/kg)</b>
<b>6082 T651</b>	2.7	>240	6.03 - 6.24
<b>6082 T6</b>	2.71	>255	6.22 - 6.46

Además de contar con una buena soldabilidad con material de aportación y de un fácil mecanizado, el aluminio 6082 es utilizado en aplicaciones sometidas a altas tensiones, por lo que podría ser una alternativa ligera para aquellos elementos que deban soportar mayores cargas.

#### **6.2.2.3.3. 7075**

La principal diferencia del 7075 con el resto de aluminios es su elevado límite elástico, siendo el zinc su principal elemento aleante. Por lo tanto, es especialmente válido para aquellos componentes sometidos a fatiga o a grandes cargas, como piezas de avión, moldes o matrices.

Al igual que sucede con el aluminio 6082, las propiedades mecánicas de este metal varían enormemente dependiendo del tratamiento térmico al que es sometido, ya que el material per se apenas cuenta con un límite elástico de 60MPa. Los más extendidos en la industria son tanto el T651 como el T6.

*Tabla 14: Propiedades del aluminio 7075*

<b>Aluminio</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Límite elástico (MPa)</b>	<b>Precio (€/kg)</b>
<b>7075 T651</b>	2.81	>260-470	6.86 - 7.12
<b>7075 T6</b>	2.80	>450	7.03 - 7.45

A pesar de las extraordinarias capacidades mecánicas que presenta esta aleación, tanto su soldabilidad como resistencia a la corrosión son muy inferiores a los otros materiales. Además, al ser un acero tan duro y resistente, es más difícil de mecanizar que el 5083 o el 6082.

#### **6.2.2.4. Comparativa y decisión**

Los materiales empleados en nuestro chasis deben ser capaces de soportar todas las cargas tanto estáticas como dinámicas a las que sea sometida la motocicleta en sus condiciones más desfavorables de funcionamiento. Primará la facilidad de

fabricación y conformado ya que, en la medida de lo posible, su mecanizado se llevará a cabo en las instalaciones del equipo.

En términos físicos, la estructura deberá ser lo más rígida posible, evitando los concentradores de tensiones para garantizar que nunca se supere el límite elástico del material. El peso del chasis debe ser el menor posible, para así reducir la potencia requerida en el movimiento de la motocicleta y mejorar su maniobrabilidad. Una motocicleta ligera se comporta mucho mejor que una pesada en todos los ámbitos de la conducción: acelera y frena antes, se pilota mejor y alcanza mayores velocidades.

Por su parte, el peso será directamente dependiente del material seleccionado ya que, como hemos visto, el acero puede llegar a ser casi tres veces más pesado que el aluminio.

Considerando todo esto, los posibles materiales a implementar se reducen a los estudiados en los apartados 6.2.2.2. *Acero* y 6.2.2.3. *Aluminio*. Para tomar una decisión fundamentada, se realiza una comparativa ponderada en la que se tienen en cuenta criterios como la facilidad de fabricación, la experiencia previa del equipo o el coste:

- **Experiencia previa:** Gracias a las anteriores dos participaciones de EUPLA Racing Team en el campeonato, se cuenta con información y datos relativos al aluminio 6082 y al acero 1.7218 que se emplearon en las ediciones anteriores.
- **Coste:** El material más económico es el acero, pudiendo tener un precio hasta tres veces más reducido que determinadas aleaciones de aluminio. Sin embargo, el precio de los materiales viene dado en relación a su peso, por lo tanto, debe tenerse en cuenta que, para una misma geometría, el peso en aluminio es mucho menor, por lo que su coste de material no diferiría en demasía con respecto a la misma geometría fabricada en acero.
- **Límite elástico:** La resistencia mecánica del material es el parámetro más importante para determinar la validez de sus prestaciones. En términos generales, cuanto mayor sea su límite elástico, mayores cargas será capaz de soportar antes del fallo, por lo que en este apartado resultan beneficiados los aceros.
- **Facilidad de fabricación:** Las capacidades de mecanizado, soldadura y la resistencia a la corrosión resultan fundamentales a la hora de trabajar en las instalaciones del equipo. Tomamos como prioritaria la maquinabilidad del material, con la previsión de realizar una estructura de doble viga minimizando las soldaduras.

- **Peso:** En este caso las aleaciones de aluminio resultan las claras ganadoras, puesto que apenas tienen la mitad de densidad que los aceros considerados. El peso de la estructura debe reducirse tanto como sea posible para así minimizar la potencia requerida en el movimiento de la motocicleta.

En la *Tabla 15* se asigna una ponderación numérica que refleja el porcentaje de importancia de cada uno de los criterios contemplados. Cuando uno de los materiales presente una clara ventaja sobre las otras en un criterio concreto, se le asignará un valor entre el 0 y el 2 y se sumará al resultado el porcentaje correspondiente a su ponderación. Por ejemplo, un material que tenga un 2 en "Experiencia previa" sumará 30 puntos, mientras que otro que tenga un 1 sumará tan solo la mitad, resultando nulo si hay un 0. De esta manera, cuanto más cercano se encuentre un resultado de 100 más se adaptará ese material a nuestras necesidades.

Las puntuaciones se han asignado según las consideraciones individuales descritas en el listado anterior con respecto a cada uno de los criterios.

*Tabla 15: Comparativa de materiales*

Criterio	Ponderación	Aceros				Aluminios		
		1.1730	1.7227	1.7218	1.4006	5083	6082	7075
<b>Experiencia previa</b>	30%	1	0	2	0	0	2	0
<b>Facilidad trabajo</b>	20%	2	0	1	0	2	2	0
<b>Límite elástico</b>	20%	1	2	2	1	0	1	1
<b>Peso</b>	15%	0	0	0	0	2	2	2
<b>Coste</b>	15%	2	2	0	0	2	2	0
<b>Resultado</b>	<b>100%</b>	<b>60</b>	<b>35</b>	<b>60</b>	<b>10</b>	<b>50</b>	<b>90</b>	<b>25</b>

En base a los criterios establecidos y a las puntuaciones obtenidas para cada uno de los diferentes materiales, el que mejor se adecúa a las necesidades y recursos del equipo es el aluminio 6082. Gracias a las anteriores ediciones del campeonato, en EUPLA Racing Team se cuenta con numerosa experiencia con esta aleación, pudiendo acceder a él con relativa sencillez gracias a los proveedores y patrocinadores que lo trabajan.

En especial, resulta de suma importancia la colaboración de la empresa Cortenfrío, especializada en el corte por agua, gracias a la cual el coste de un chasis de doble viga de aluminio 6082 puede resultarnos la alternativa más económica.

Esta aleación se comercializa con tanto con un tratamiento térmico T6 como T651, sin embargo, ambos tienen propiedades mecánicas muy similares, siendo el T6 algo más resistente y caro. Con el objetivo de determinar cuál de las dos alternativas conviene más para el presente trabajo, se contacta con el proveedor para que nos describa al detalle las diferencias entre las características de ambos materiales y así obtener una recomendación directa según la aplicación para la que se van a destinar.

Finalmente se decide hacer uso de la aleación 6082 T651 como material principal para la estructura del chasis debido a que presenta una mayor resistencia a la corrosión y tenacidad, siendo además una alternativa más barata que la calidad T6. A pesar de que la resistencia de esta sea superior, la diferencia en su límite elástico es tan poca que finalmente se prioriza el aspecto económico y la familiaridad con el aluminio 6082 T651, ya que es con este con el que nuestros colaboradores están acostumbrados a trabajar.

*Tabla 16: Propiedades del aluminio 6082 T651 según proveedor*

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo elástico (MPa)	Módulo de Poisson	Límite elástico (MPa)	Límite de rotura (MPa)	Alargamiento (%)	Dureza HB
2.70	69000	0.33	240	295	7	105

En cuanto a los aceros, la aleación 1.1730 resulta ser la que mejor se adapta a las necesidades del proyecto. Por lo tanto, pese a utilizar aluminio 6082 como material principal para el chasis, haremos uso del 1.1730 para aquellos componentes con una sollicitud mayor en cuanto a exigencias mecánicas, tales como los ejes.

*Tabla 17: Propiedades del acero 1.1730 según proveedor*

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo elástico (MPa)	Módulo de Poisson	Límite elástico (MPa)	Límite de rotura (MPa)	Alargamiento (%)	Dureza HB
7.85	20000	0.3	305	580	16	207

Esto es necesario ya que el acero es un material con una rigidez mucho mayor, por lo que en aluminio sería necesario un espesor superior al requerido en acero para conseguir resultados similares en aquellos componentes críticos que deban soportar unas cargas más altas o estén sometidos a esfuerzos cíclicos.

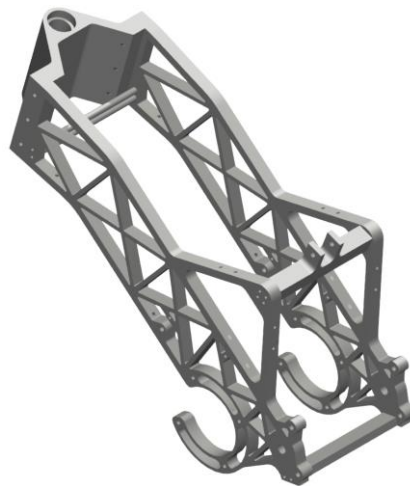
### 6.3. DISEÑO AL DETALLE

Tomando como base las consideraciones y parámetros de diseño expuestas en el apartado 6.1. *Datos de partida*, el diseño del chasis se enfoca a realizar una mejora

sobre las prestaciones conseguidas en los prototipos anteriores del equipo EUPLA Racing Team.

### 6.3.1. Chasis de partida

Tras haber determinado que la alternativa que mejor se adapta a las necesidades y recursos actuales del equipo es una estructura de doble viga fabricada en aluminio, comenzamos el diseño basándonos en el chasis empleado por el equipo en la IV edición.



*Ilustración 5: Chasis de EUPLA Racing Team en la edición IV*

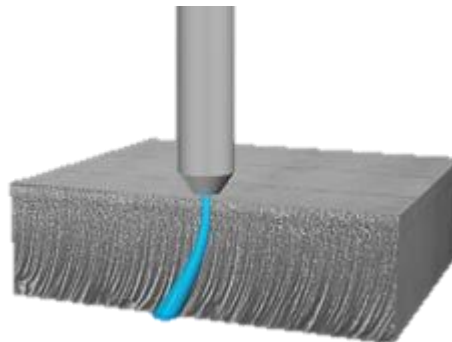
Se trata de una estructura de doble viga de aluminio a la que se le ha realizado un vaciado en forma de celosía, consiguiendo una geometría triangulada. La principal ventaja de este concepto frente al empleo de dos simples vigas es la posibilidad de conseguir una mayor anchura para abrazar los componentes interiores, como la batería. Gracias a esto, es posible realizar numerosos anclajes en la propia viga sin tener que recurrir a elementos auxiliares como una cuna para sujetar el motor.

Con el objetivo de simplificar al máximo tanto la fabricación como el montaje, todos los componentes del chasis se diseñan de tal forma que puedan ser cortados por agua. Esto es fácilmente apreciable tanto en la pipa de dirección como en las vigas laterales, cuya geometría apenas consta de un boceto bidimensional al que se le ha dado un espesor determinado en el software de diseño. En el proceso de fabricación, las máquinas de corte por agua tan solo tienen que cortar un bloque o plancha de aluminio con el espesor deseado siguiendo el dibujo bidimensional, proyectando el chorro únicamente de forma vertical en el eje Z mientras la boquilla se desplaza a través del plano XY.

Esta metodología de diseño únicamente permite obtener piezas con una geometría sencilla, al ser solo mecanizadas en un solo eje. Sin embargo, si el diseño

se realiza de forma premeditada para ser fabricado mediante corte por agua, es posible obtener piezas prácticamente finalizadas de forma económica y más rápida que por arranque de viruta. Además, se trata de un proceso de fabricación que no carga el material de trabajo con tensiones o deformaciones, por lo que se minimiza la posibilidad de aparición de fisuras o grietas, previniendo también el endurecimiento al tratarse de un corte en frío, sin calor que afecte a las zonas de corte. (Jaria Gazol, 2020)

Cuando se va a fabricar cualquier tipo de mecanizado por control numérico, deben tenerse en cuenta la precisión y capacidades de trabajo de las máquinas con las que se va a trabajar. En EUPLA Racing Team se cuenta con la colaboración de una empresa especializada en corte por agua a la que anteriormente se le han encargado trabajos en aluminio de hasta 17.5cm. Según nos indican, pueden trabajar hasta 20cm de espesor, con una precisión de posicionamiento de  $\pm 0.15\text{mm}$ , sin embargo, debemos tener en cuenta que existe la posibilidad de que el chorro se disipe al cortar piezas de gran espesor, causando un ahusamiento en la parte final del corte. (Cortenfrío, s.f.)



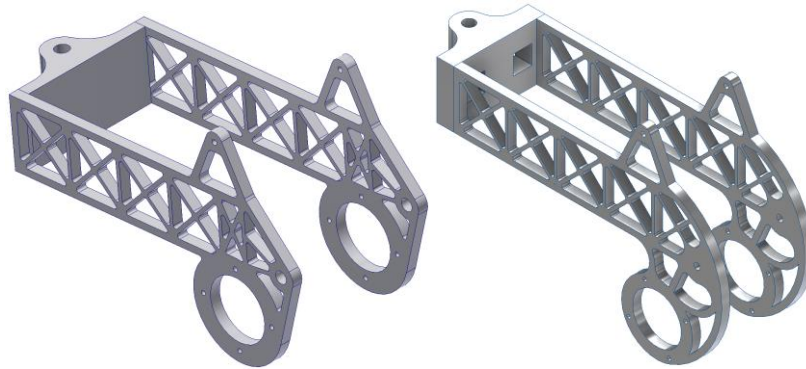
*Ilustración 63: Ahusamiento en el corte por agua*

Por lo tanto, no podemos asegurar que las cotas se vayan a mantener de forma uniforme a lo largo de toda la pieza. Aquellas operaciones que requieran una mayor precisión o unas tolerancias concretas, tales como agujeros, se realizarán mediante corte por agua con un diámetro inferior al necesario para luego ser repasados en las instalaciones del equipo, otorgándoles las dimensiones deseadas en un espacio controlado y con las herramientas más apropiadas. (Jaria Gazol, 2020)

### **6.3.2. Estudio de uniones**

El primer elemento a diseñar en un chasis de doble viga es, precisamente, las vigas laterales que servirán como soporte para todos lo demás componentes. Se toma como referencia el chasis de la IV edición del equipo EUPLA Racing Team, por lo que

los primeros diseños pasan por el modelado de vigas sobre el boceto de referencia descrito en el apartado 6.1.2. *Geometría y parámetros de diseño*, a las que se les ha practicado un vaciado a modo de celosía.



*Ilustración 64: Diseños iniciales*

Se posicionan en el ensamblaje virtual tanto el motor como una versión preliminar de la pipa de dirección, con lo que nos podemos hacer una idea aproximada de las dimensiones y la forma que deberá tomar la estructura.

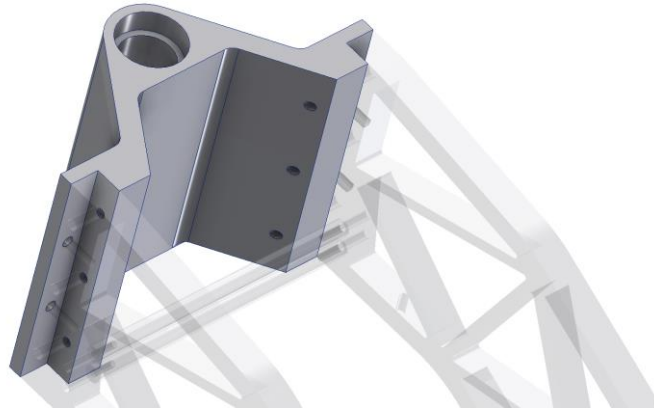
Sin embargo, para poder dar una forma definitiva a las vigas del chasis, antes es necesario concretar todos los elementos de unión con los demás componentes.

### ***6.3.2.1. Pipa de dirección***

Se conoce como pipa de dirección al tubo posicionado en la parte frontal de la motocicleta que contiene el eje de dirección. Como tal, es el único elemento que relaciona el tren delantero con las vigas del chasis, por lo que recibirá de forma directa todas las cargas de la rueda delantera. Es habitual encontrar estructuras reforzadas o directamente independientes del resto del chasis para asegurar la rigidez de la pipa de dirección; un claro ejemplo de esto es la Mission R que se ha estudiado en el apartado 4.2.3.3. *Mission R*, la cual incorpora una pieza mecanizada en aluminio para albergar el eje de dirección de forma separada a las paredes tubulares en acero del chasis.

En cuanto a los diseños anteriores del equipo EUPLA Racing Team, en la IV edición se hizo uso de una pipa de dirección mecanizada a partir de un bloque macizo de aluminio, estando unida mecánicamente mediante pernos a las vigas laterales del chasis.





*Ilustración 65: Pipa de dirección de EUPLA Racing Team en la edición IV*

Se trata de una pieza maciza y pesada pero que, sin embargo, garantiza su validez frente a los grandes esfuerzos de torsión, flexión y compresión a los que se ve sometida la pipa debido a la acción del eje de dirección.

En el caso del chasis del equipo para la V edición, nos encontramos con un diseño totalmente opuesto en el que se prescinde de las uniones atornilladas para dar paso a una estructura tubular totalmente soldada.



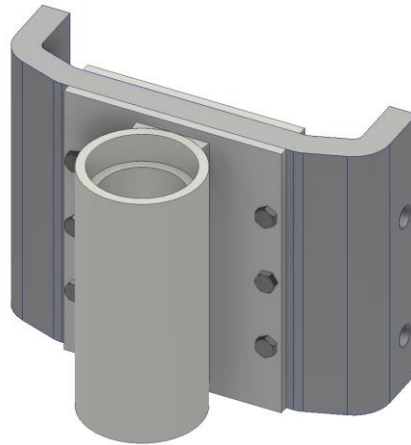
*Ilustración 66: Pipa de dirección de EUPLA Racing Team en la edición V*

Esta pipa de dirección da continuidad a la filosofía con la que se diseñó chasis, puesto que está fabricada a partir de un tubo de acero 1.7218, al igual que el resto de piezas, y soldada a las vigas perimetrales.

En este caso, nos encontramos con el problema opuesto al que presentaba la pipa de la IV edición. Al estar formada únicamente por un tubo, las uniones por soldadura sufren todos los esfuerzos derivados de la conducción y otorgan una menor rigidez al conjunto. Adicionalmente, la necesidad de que esta pieza esté completamente centrada con respecto al plano de simetría de la motocicleta requiere de la fabricación de un banco de soldadura para asegurar que se mantienen las

dimensiones geométricas tanto en el momento de la unión como en su posterior enfriamiento, donde podrían generarse contracciones y deformaciones del material.

Para el presente trabajo, inicialmente se estudia la opción de realizar una pieza modular "tipo sandwich" que permita corregir las posibles desalineaciones para ajustar la posición de la pipa de forma manual y posterior a su fabricación. Esta pieza consiste en un diseño híbrido que combina una pieza de aluminio macizo junto a un tubo de acero soldado a unas planchas auxiliares.



*Ilustración 67: Pipa de dirección inicial*

De esta manera, la propia pipa se suelda a una pletina del mismo acero, que posteriormente se anclará a una plancha de aluminio junto a otra pletina de acero mediante pernos. Esto genera una estructura en la que el cuerpo central es ligero y robusto, mientras que las capas exteriores actúan a modo de refuerzo para distribuir las cargas uniformemente. Además, de esta manera podemos combinar dos materiales como el aluminio y el acero, aprovechando las propiedades mecánicas y la soldabilidad del acero junto a la ligereza del aluminio.

Sin embargo, tras realizar algunos test y pruebas, nos topamos con los siguientes problemas:

- El peso del acero es muy superior al del aluminio por lo que, si fabricamos el tubo macizo de la pipa en 1.7218 pero el resto del chasis en aluminio, se produce una descompensación en la que la mayor parte de la masa se concentra en la parte frontal de la motocicleta.
- La unión planteada requiere una soldadura longitudinal, posicionando el eje del tubo paralelo a la plancha. Esta soldadura, aunque es posible de llevar a cabo, requiere de una gran cantidad de material de aportación e incurre en una gran dificultad. Además, las altas temperaturas que se

alcanzarían podrían deformar el material y arruinar los alojamientos para los rodamientos del eje de dirección.

- Con el objetivo de reducir al máximo la cantidad de material y de simplificar la fabricación, la pieza intermedia de aluminio se planteó como una única plancha de espesor constante a la que se le aplicarían una serie de plegados para conseguir la forma deseada. Sin embargo, pese a que nuestros proveedores estaban convencidos de que esto podría llevarse a cabo, todas las probetas a las que se les aplicó un ángulo cercano a los 30° terminaron quebrándose durante nuestros ensayos del material.



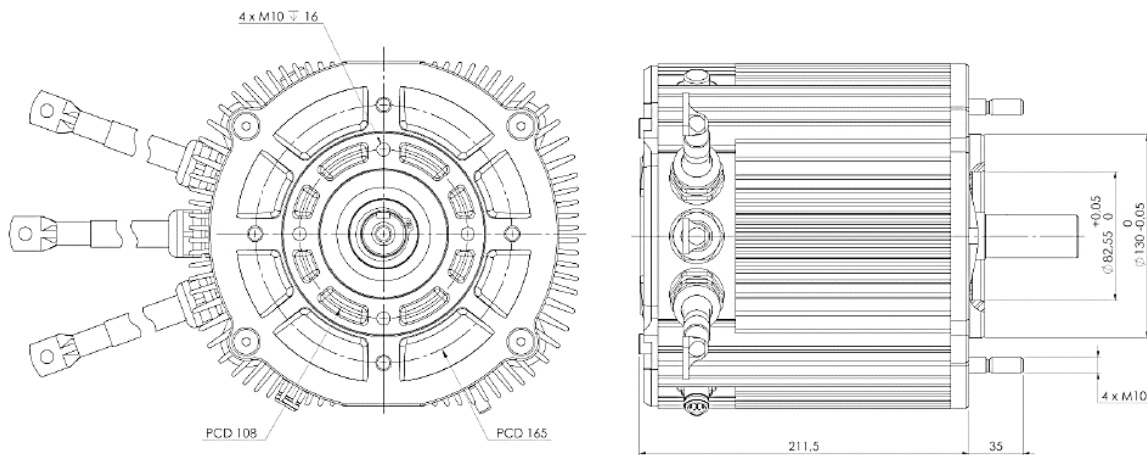
*Ilustración 68: Resultado de ensayos de plegado de aluminio 6082 T651*

Una vez descartado el diseño híbrido, las opciones a considerar se reducen a implementar soluciones similares a las de las ediciones anteriores.

Aunque el aluminio 6082 T651 puede ser soldado con unos buenos resultados, finalmente optamos por utilizar una pipa de dirección maciza para evitar las complicaciones en las que incurriría su ensamblaje mediante soldadura, por lo que la unión de dicha pieza a las vigas se realizará de forma mecánica.

### **6.3.2.2. Anclaje del motor**

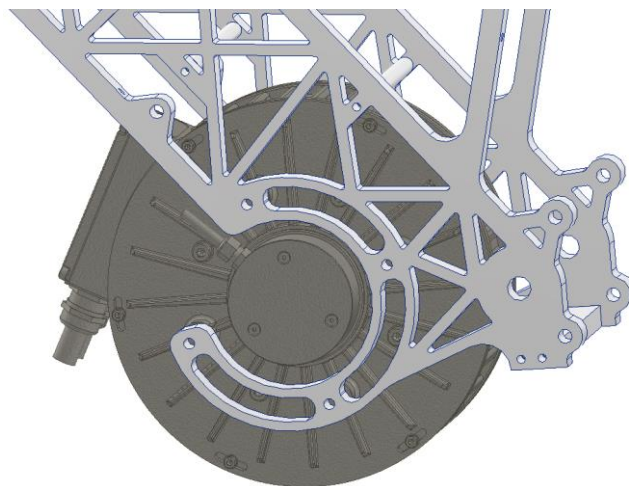
El motor oficial de la competición, el Engiro-MS1920, debe ser empleado por todos los equipos participantes en la categoría Electric. Destaca especialmente su geometría cuasi cúbica, a diferencia de la forma alargada de los motores de combustión monocilíndricos de KTM que incorporan los equipos inscritos en la categoría Petrol.



*Ilustración 69: Dimensiones del motor Engiro MS1920*

Además de su forma, el otro aspecto que destaca a primera vista son sus puntos de anclaje. Habitualmente, en un motor de combustión la sujeción se realiza a ambos laterales del chasis, de forma que quede sujeto por dos paredes o vigas directamente. Sin embargo, el motor de Engiro tan solo incorpora anclajes en el lateral correspondiente al eje de salida.

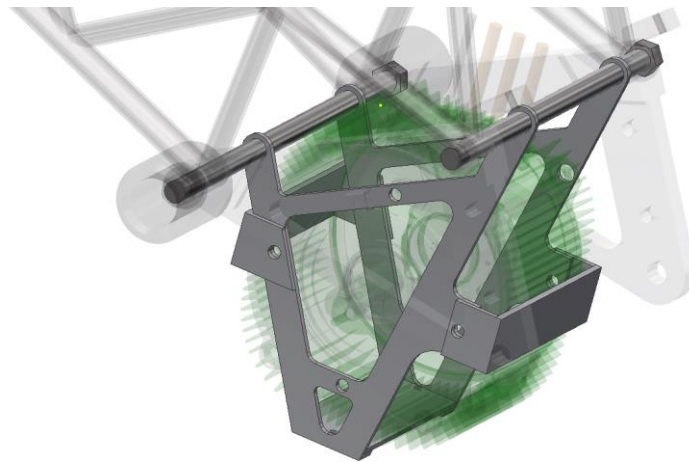
El motor empleado en la IV edición de MotoStudent sí tenía agujeros roscados a ambos lados para facilitar su montaje en un vehículo eléctrico, por lo que el equipo EUPLA Racing Team aprovechó esta característica para diseñar un chasis simétrico que anclase de forma directa el motor mediante pernos, con casquillos para mantenerlo alineado.



*Ilustración 70: Anclajes del motor de EUPLA Racing Team en la edición IV*

Sin embargo, en la V edición el equipo tuvo que enfrentarse al mismo problema que nos encontramos ahora, con un motor geoméricamente muy similar, pero de tamaño más comedido. La solución adoptada fue la fabricación de una cuna que

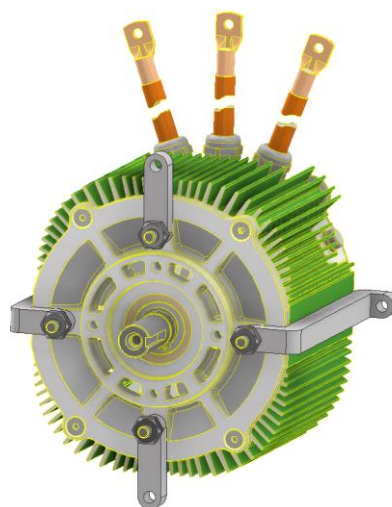
abrazase el motor en su totalidad, anclándose esta a dos barras transversales del chasis.



*Ilustración 71: Anclajes del motor de EUPLA Racing Team en la edición IV*

Sin embargo, el Engiro-MS1920 incorpora cuatro espárragos roscados que no existían en su homólogo de la V edición. Por lo tanto, con el objetivo de evitar cortarlos y dañar el motor, desde el primer momento se plantea su utilización para realizar en anclaje.

El diseño desde el que partimos buscaba la sujeción a ambas paredes del chasis de forma simétrica, es decir, los espárragos horizontales se anclarían a la pared derecha mientras que los verticales harían lo propio en la izquierda. Las sujeciones son diseñadas para fabricarse en acero debido a sus capacidades de plegado, que permiten conseguir geometrías en ángulo recto difícilmente realizables en aluminio, tal y como se ha podido comprobar en el apartado 6.3.2.1. *Pipa de dirección*.



*Ilustración 72: Anclajes del motor iniciales*

Sim embargo, este anclaje presenta una serie de problemas que lo llevan a ser descartado. En primer lugar, el tamaño y volumen del motor Engiro-MS1920 hacen

que sea necesario posicionarlo en un lugar elevado para poder anclar las cuatro sujeciones al chasis sin rebasar la distancia de seguridad al suelo por lo que, debido a su elevado peso, el centro de gravedad de la moto subiría y tendería a desestabilizar y entorpecer su conducción. Además, los anclajes diseñados trabajarían a flexión debido a la distancia que hay hasta las vigas, y podrían llegar a deformarse.

Por lo tanto, este sistema de sujeción se descarta debido a la dificultad de su fabricación y al elevado peso que añadiría su fabricación en acero, a favor de implementar una solución más ligera que aproveche al máximo las características del chasis de doble viga planteado. A pesar de ello, se trata de un diseño muy bien acogido por el resto de integrantes del equipo, por lo que podría resultar interesante evolucionarlo en el futuro.

### 6.3.3. *Diseño final*

El chasis diseñado emplea como material de construcción principal la aleación de aluminio 6082 con un tratamiento térmico T651, siguiendo una tipología de doble viga modular en la que cada uno de los componentes sea independiente y estén unidos entre sí mediante pernos.

El diseño de toda la estructura está planteado de tal manera que pueda ser fabricada en piezas individuales mediante corte por agua, que posteriormente serán ensambladas por unión atornillada con el fin de simplificar el montaje y de externalizar el menor número de procesos de fabricación que sea posible.



*Ilustración 73: Diseño final*



Los dos elementos más importantes para determinar la geometría del chasis son tanto la batería como el motor. Aunque este último se entregó por el organismo promotor de la competición al realizar la inscripción en la misma, el acumulador se desarrolló en paralelo junto al chasis, por lo que su diseño y dimensiones finales no se definieron hasta alcanzar un estado avanzado del desarrollo.

Ante esta incertidumbre, desde el primer momento se planteó el diseño de una estructura que tuviese la posibilidad de aumentar el espacio interior de alojamiento para la batería mediante el desplazamiento de las vigas laterales. De esta manera, aunque las dimensiones indicadas por el departamento electrónico del equipo se vieran modificadas a última hora, siempre existirá la posibilidad de crear más espacio ensanchando el chasis unos milímetros.

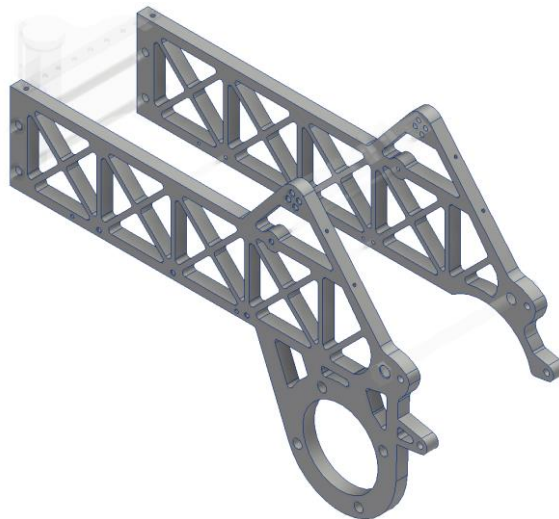
Esta filosofía de diseño toma inspiración directa del modelo Mission R que se ha estudiado en el apartado 4.2.3.3. *Mission R*, dividiendo el chasis en diferentes partes para poder adaptar la estructura a las necesidades que surgen en mitad del desarrollo.

### 6.3.3.1. Vigas laterales

La función que desempeñan las vigas laterales en un chasis perimetral es la sujeción de todos los componentes contenidos entre ellas, permitiendo la transmisión de cargas recibidas tanto del eje de dirección como del basculante. Por lo tanto, es fundamental que estas sean unas piezas robustas y resistentes, con tantas sujeciones como sean necesarias para alojar los diferentes elementos de los que se compone la motocicleta. A grandes rasgos, son la parte estructural más importante, puesto que dan forma al chasis y mantienen unidos sus dos ejes pivotantes que se comunican con el tren delantero como con el trasero.

Habitualmente, los chasis de doble viga incorporan dos estructuras laterales simétricas que abrazan el motor. Sin embargo, el diseño modular planteado da pie a la realización de dos vigas con diferentes geometrías. Esta decisión viene propiciada por la posición de los anclajes del motor, cuyos espárragos roscados se encuentran únicamente en el lateral correspondiente al eje del piñón.

Las vigas se desarrollan a partir de planchas macizas de aluminio 6082 T651 a las que se les practica un vaciado por corte por agua siguiendo un patrón triangulado, de forma que las cargas soportadas se repartan equitativamente a través de toda la estructura.



*Ilustración 74: Vigas laterales*

Tras estudiar los resultados obtenidos en el chasis con el que participó el equipo EUPLA Racing Team en la IV edición de MotoStudent, se observa que las cargas a las que fue sometido están muy lejos de alcanzar el límite elástico del material. Por lo tanto, se opta por disminuir los 22mm de espesor que incorporaban. De esta manera, tras consultar con los proveedores del equipo sobre las medidas comerciales de las que disponen, las planchas en la aleación de aluminio 6082 T651 se adquieren con un grosor de 20mm y, por lo tanto, las vigas se desarrollan en dicho espesor.

Es importante tener en cuenta que las medidas reales pueden no ser del todo exactas, siendo habitual que las tolerancias geométricas del material en bruto dejen mucho que desear. Por lo tanto, para evitar el sobrecoste de una plancha rectificada o calibrada, se ha planteado el diseño de tal manera que las desviaciones dimensionales del espesor no afecten al montaje, ya que tan solo será funcional el área interior de las vigas, limitando la exterior al apriete de los pernos.

Estas vigas recorren todo el chasis longitudinalmente, por lo que son el componente principal de la estructura que mantiene unidos entre sí todos los demás elementos, teniendo contacto directo tanto con el piloto (a través de las estriberas y del subchasis) como con los trenes delantero y trasero.

### ***6.3.3.2. Pipa de dirección***

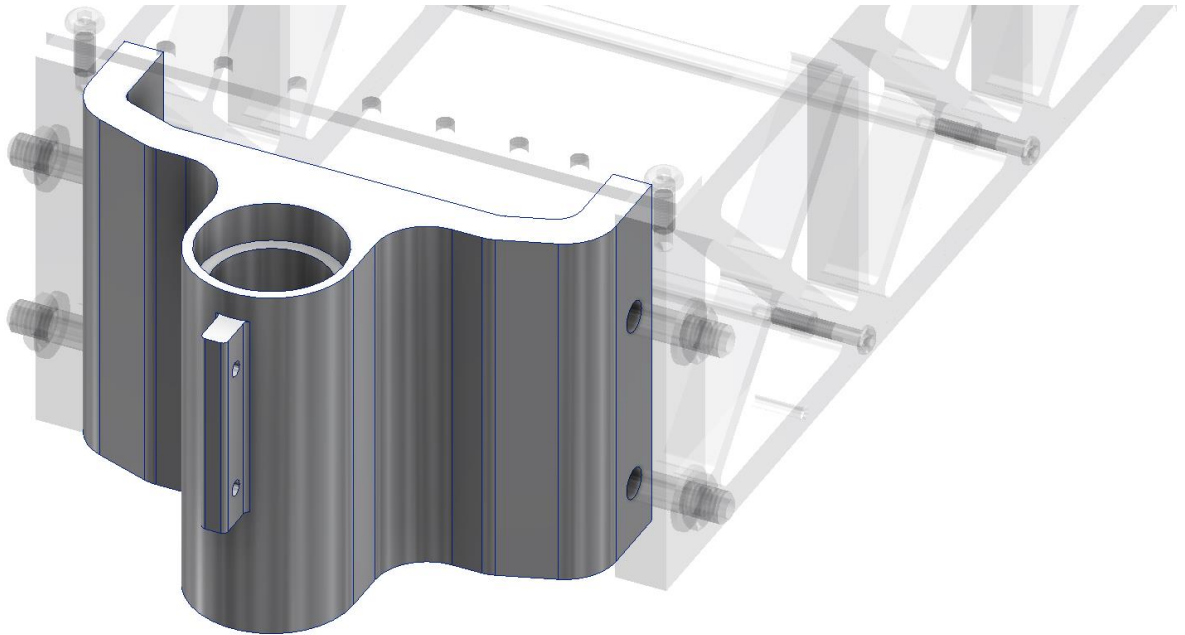
La pipa de dirección actúa como elemento de unión entre el tren delantero y las vigas laterales del chasis, debiendo estar fuertemente sujeta a estas a la vez que permite girar libremente al eje de dirección gracias a los rodamientos cónicos que contiene.

Al tratarse del único punto de unión de las vigas con el tren delantero, se encarga de transmitir los esfuerzos generados en este al resto del chasis, por lo que



debemos asegurarnos de que se mantiene su integridad tanto física como estructural en todo momento, especialmente minimizando las deformaciones ocasionadas en las tomas de curvas.

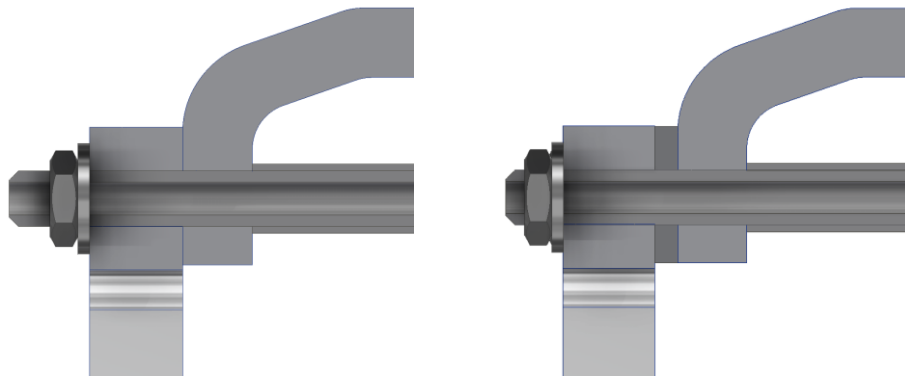
El diseño llevado a cabo es reminiscente del plegado descrito en el apartado 6.3.2.1. *Pipa de dirección*, pero ha sido adaptado a las propiedades del material para poder obtener la pieza mediante la ayuda de una empresa patrocinadora del equipo EUPLA Racing Team que está especializada en corte por agua.



*Ilustración 75: Pipa de dirección*

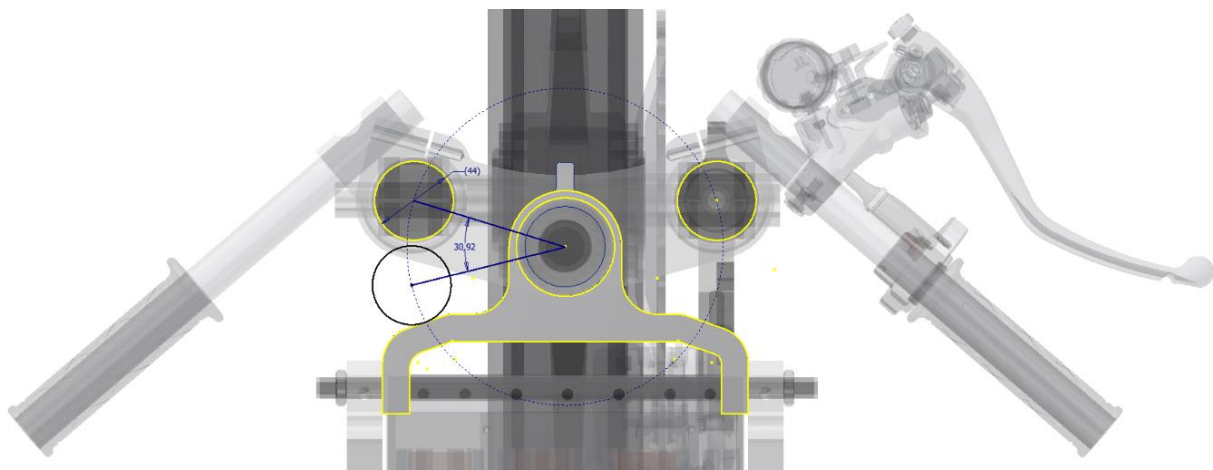
La pipa de dirección debe ser capaz de albergar dos rodamientos cónicos para facilitar el movimiento del eje de dirección en la toma de curvas, por lo que es necesario practicar sendos alojamientos a posteriori en el cilindro que los contiene. De forma similar, el carenado y el display de la moto se anclan al chasis a través de una pieza conocida como araña, sujeta a la parte frontal de la pipa de dirección.

Con el objetivo de permitir el ensanchamiento del chasis siguiendo la filosofía modular de la Mission R, los anclajes a las vigas laterales del chasis se plantean mediante dos tubos roscados pasantes fabricados en acero 1.1730, junto a unos casquillos interiores que mantengan la rigidez de la pipa, absorbiendo las cargas que tiendan a plegarla. Esta sujeción garantiza una solución robusta y versátil, puesto que se puede ampliar la anchura del chasis en cualquier momento mediante la inclusión de pletinas entre ambas piezas.



*Ilustración 76: Ensanchamiento del espacio interior*

La forma que se le ha dado a la pipa de dirección tiene como objetivo permitir un amplio giro del tren delantero puesto que, tal y como se indica por normativa en el apartado 6.1.1. *Restricciones*, la dirección debe ser capaz de girar al menos  $15^\circ$  a cada lado. En nuestro caso, esta medida se supera con creces al obtener un movimiento de hasta  $30.92^\circ$

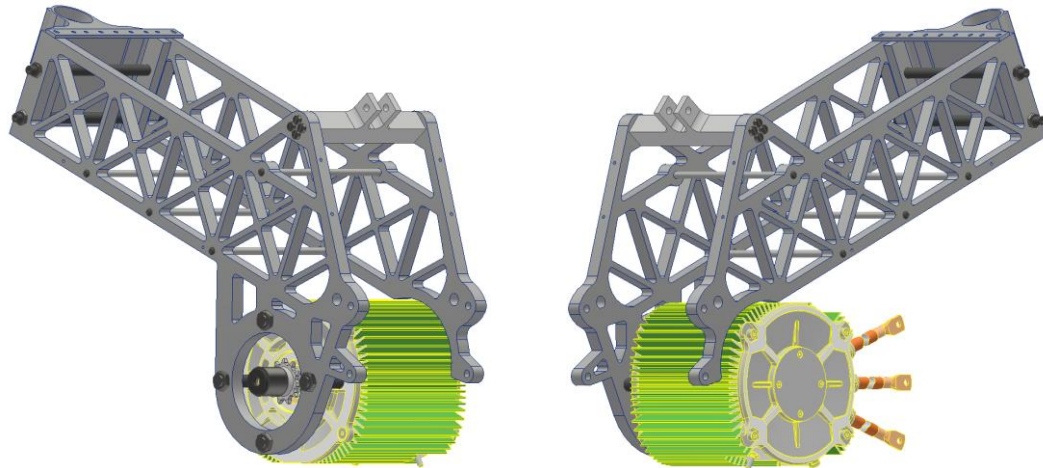


*Ilustración 77: Ángulo de giro de la dirección*

La pipa de dirección es uno de los elementos más importantes del chasis, que debe tener una gran resistencia y rigidez ya que estará sometida a grandes cargas durante la conducción, especialmente durante la toma de curvas debido a la transmisión de los esfuerzos generados en el eje de dirección por el tren delantero. Por ello, el diseño alcanzado supone una solución fuerte y robusta que sigue la filosofía modular del chasis.

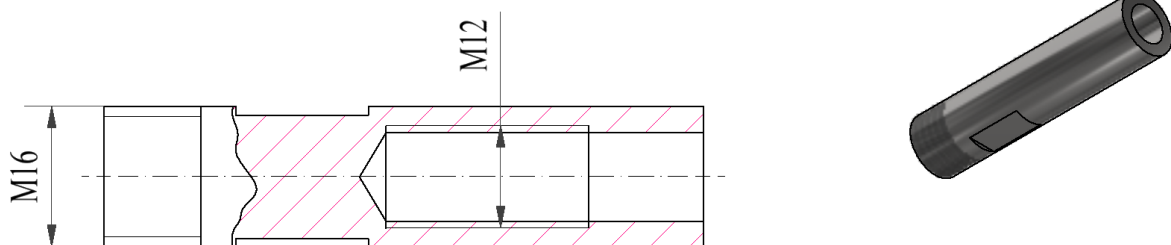
### **6.3.3.3. Anclajes del motor**

Tal y como se ha visto en el apartado 6.3.2.2. *Anclaje del motor*, el motor Engiro-MS1920 tiene todos sus anclajes en el mismo lado que el eje de salida y, por lo tanto, las vigas laterales se han diseñado de forma asimétrica para realizar la sujeción en solo una de ellas.



*Ilustración 78: Ensamblaje chasis y motor*

Los soportes del motor se han diseñado en acero 1.1730 para otorgar un extra de rigidez y resistencia, ya que su función es la de soportar el peso del motor no solo en parado, sino también en situaciones de frenada, aceleración y en el paso por curva. En estos casos, a la fuerza que ejerce el motor por efecto de la gravedad habría que sumarle las componentes generadas por las aceleraciones derivadas de la conducción, por lo que la resistencia de estos componentes es fundamental para asegurar su validez.



*Ilustración 79: Anclajes del motor*

Del mismo modo, la pared izquierda del chasis, que es la que sujetará el motor, debe ser lo suficientemente robusta como para soportar el momento flector que se originará en la toma de curvas. Tal y como se ha diseñado, podemos considerar el motor como una viga en voladizo, por lo que la inclinación del vehículo que experimentará en las curvas generará una fuerza y momento flector que podría llegar a dañar la estructura. Por lo tanto, esta situación se estudiará en mayor detalle en el apartado 6.5.4. *Anclaje del motor.*

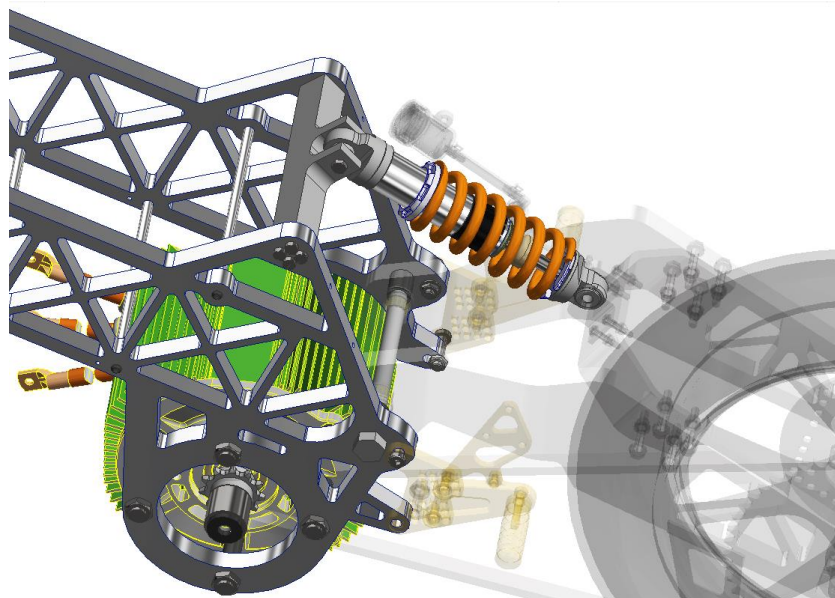
#### 6.3.3.4. Travesaños

La decisión de emplear un chasis de doble viga hace que sea necesario la incorporación de ciertos tubos o barras transversales que aporten rigidez, al mismo

tiempo que sirven de sujeción para elementos como la batería o el amortiguador trasero.

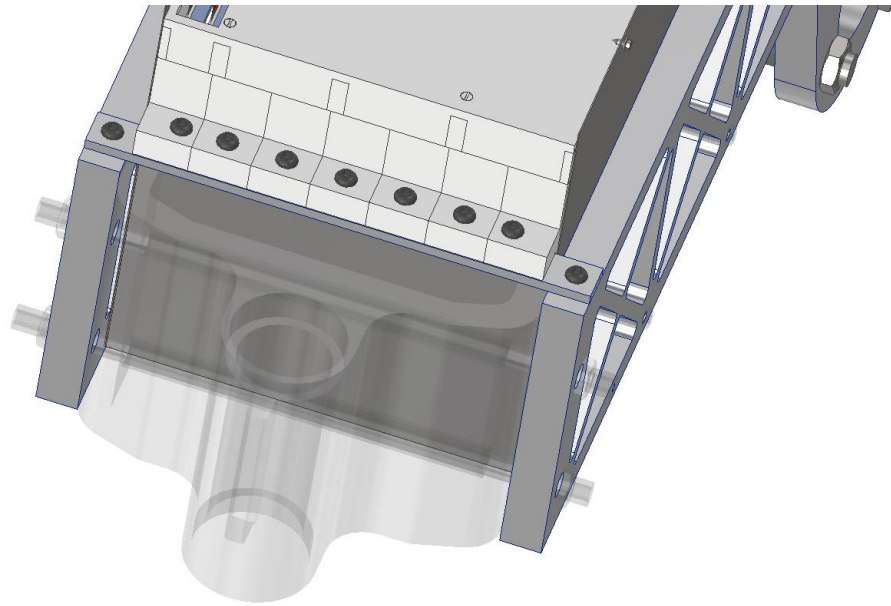
Podemos diferenciar tres tipos de travesaños en nuestro diseño, cada uno de los cuales está destinado a cumplir una función diferente:

- **Anclaje del amortiguador:** El amortiguador trasero es un elemento fundamental para cualquier motocicleta, ya que permite no solo suavizar y mejorar la experiencia de conducción, sino también asegurar que en todo momento se mantiene el contacto entre la rueda trasera y el suelo. En nuestro caso, este se situará en la parte central del plano de simetría del vehículo, por lo que es fundamental incorporar un anclaje transversal en el chasis.



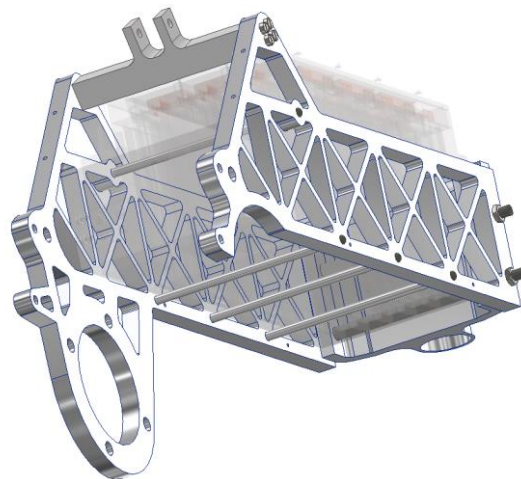
*Ilustración 80: Detalle del anclaje del amortiguador*

- **Anclaje de la batería:** La batería diseñada por el departamento electrónico del equipo EUPLA Racing Team sigue una filosofía modular, de forma que se puedan extraer cada uno de los paralelos individualmente en caso de ser necesario. Por lo tanto, la sujeción planteada permite sujetar los módulos de forma individualizada para poder soltarlos y fijarlos de forma rápida e independiente, sin afectar a los demás.



*Ilustración 81: Detalle del anclaje de la batería*

- **Rigidizantes:** Se hace uso de cuatro barras de aluminio que van de lado a lado en la parte baja del chasis con el objetivo tanto de aportar rigidez al conjunto como de soportar el peso de la batería. Los agujeros de sujeción en las vigas se posicionan estratégicamente en los puntos de intersección de las triangulaciones para asegurar una cantidad suficiente de material que sea capaz de sujetar correctamente los pernos utilizados.



*Ilustración 82: Detalle de los rigidizantes*

## 6.4. ESTUDIO DE CARGAS

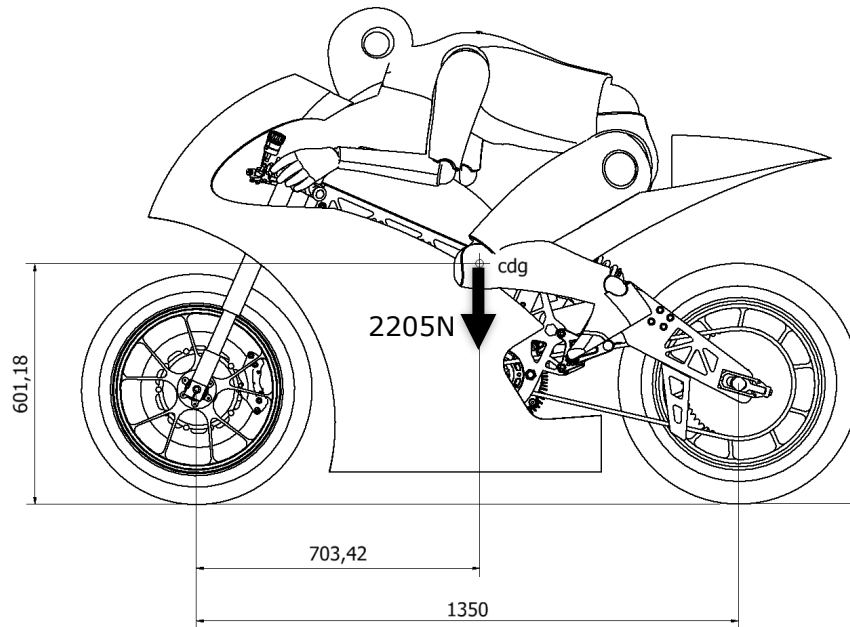
El propósito de este capítulo es realizar un dimensionamiento y optimización del chasis, de forma que la motocicleta cumpla con los objetivos de diseño con un nivel mínimo de seguridad e integridad. (Moto Engineering Foundation, 2019)

Para ello, se opta por realizar un análisis estructural estático por el método de elementos finitos, tomando la hipótesis de cargas definida en el apartado 5.4.2.

*Hipótesis de carga* para un peso de la moto estimado de 150kg y 75kg del piloto, lo que supone un peso total de:

$$W = (m_{moto} + m_{piloto}) \cdot g$$

$$W = (150 + 75) \cdot 9.8 = 2205N$$



*Ilustración 83: Peso de la moto y del piloto*

Conocida la geometría del vehículo y su peso, vamos a determinar los esfuerzos a los que será sometido durante la conducción, realizando un análisis estructural mediante el método de elementos finitos para validar su diseño y poder proceder a la fabricación.

### 6.4.1. Reposo

Las reacciones en los apoyos, que en este caso son las ruedas, se determinan mediante las siguientes expresiones, conocida la geometría del vehículo y su peso:

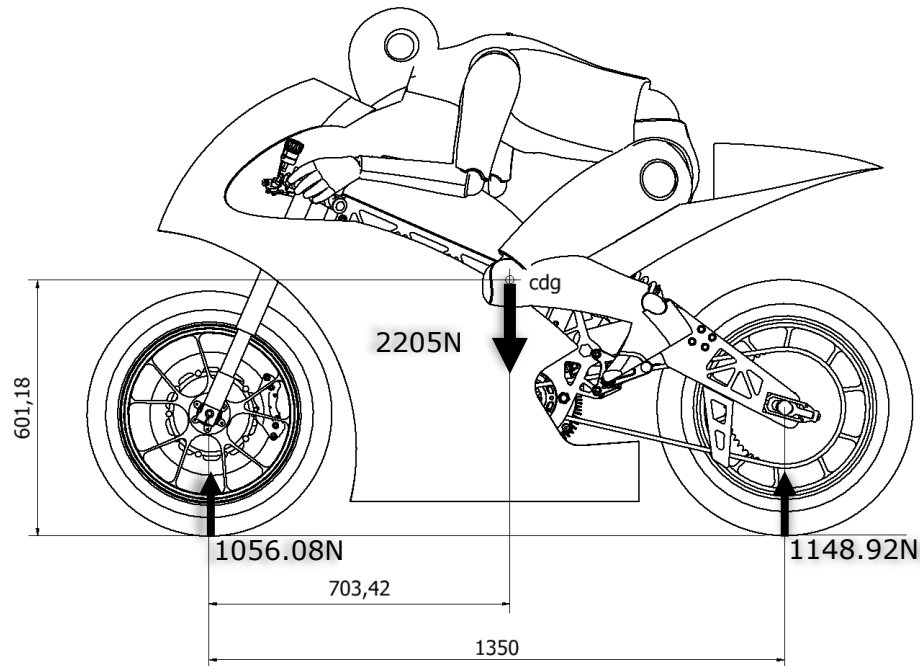
$$W_r = \frac{W \cdot \text{Posición } cdg}{\text{Distancia entre ejes}}$$

$$W_f = W - W_r$$

$$W_r = \frac{2205 \cdot 703.42}{1350} = 1148.92N$$

$$W_f = 2205 - 1148.92 = 1056.08N$$





*Ilustración 84: Cargas en situación estática*

Por lo tanto, podemos afirmar que la rueda delantera experimenta un 47.89% de la carga, frente a un 52.11% de la trasera.

### 6.4.2. Aceleración máxima

Como base para determinar un valor de aceleración apropiado y cercano a la realidad tomaremos como referencia los datos extraídos en las pruebas realizadas con los anteriores prototipos del equipo EUPLA Racing Team, aplicando un coeficiente de seguridad que mayor los resultados obtenidos para asegurar la integridad del vehículo.

En las últimas competiciones de MotoStudent, en las pruebas de aceleración en las que la moto partía de parado, el primer prototipo del equipo alcanzó 150 metros en 11.242 segundos, mientras que el segundo recorrió esos mismos 150 metros en 7.674 segundos. Por lo tanto, podemos resolver la ecuación del movimiento para determinar las aceleraciones experimentadas por cada una de ellas:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

$$1^{\text{a}} \text{ Moto: } 150 = 0 + 0 \cdot 11.242 + \frac{1}{2} a \cdot 11.242^2 \rightarrow a = 2.374 \text{ m/s}^2$$

$$2^{\text{a}} \text{ Moto: } 150 = 0 + 0 \cdot 7.674 + \frac{1}{2} a \cdot 7.674^2 \rightarrow a = 5.094 \text{ m/s}^2$$

Debido a la gran diferencia que existe entre estos dos valores, vamos a tomar como referencia la aceleración experimentada por el segundo prototipo del equipo, puesto que, además de ser el más reciente, también es el mayor por lo que aporta unas condiciones más restrictivas en nuestros cálculos, garantizando una mayor seguridad. Le aplicamos un coeficiente de seguridad de 1.3:  $a = 5.094 \cdot 1.3 = 6.622 \text{m/s}^2$

La fuerza en el sentido de la marcha que se ejercerá sobre la motocicleta como consecuencia de la aceleración experimentada viene dada por la segunda ley de Newton según la expresión:  $F = m \cdot a = (150 + 75) \cdot 6.622 = 1489.95 \text{N}$

Con esta aceleración estimada, y conociendo tanto el peso como la geometría del vehículo, podemos determinar la transferencia de carga que se experimentará en los apoyos de la motocicleta:

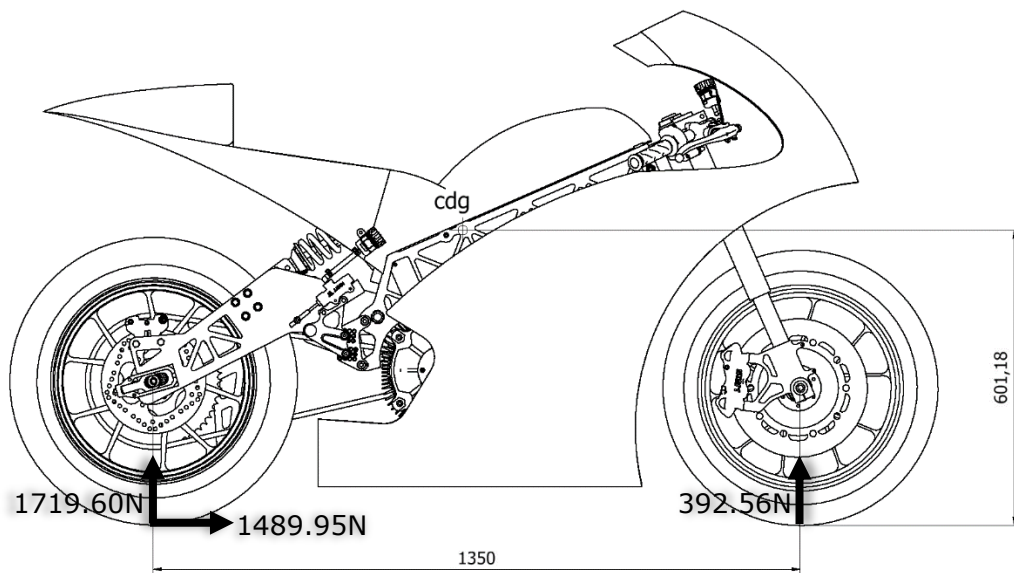
$$\Delta W_r = \frac{m \cdot a \cdot h}{L}$$

$$\Delta W_r = \frac{(150 + 75) \cdot 6.622 \cdot 601.18}{1350} = 663.52 \text{N}$$

La transferencia de carga hace que se modifiquen las reacciones obtenidas en los apoyos para una situación de reposo, por lo que podemos calcular cómo afecta la aceleración a los esfuerzos sobre las ruedas:

$$N_f = W_f - \Delta W_r = 1056.08 - 663.52 = 392.56 \text{N}$$

$$N_r = W_r + \Delta W_r = 1056.08 + 663.52 = 1719.60 \text{N}$$



*Ilustración 85: Cargas durante la aceleración máxima*



El hecho de que la fuerza de reacción en la rueda delantera no sea nula ni negativa implica que no se producirá un levantamiento de esta en condiciones de máxima aceleración, manteniendo el contacto con el pavimento en todo momento.

### 6.4.3. Frenada máxima

Debido a la dificultad que entraña realizar un cálculo preciso de la máxima deceleración que una motocicleta puede experimentar, ya que depende de factores como el piloto o el estado de los frenos, vamos a tomar como referencia los datos obtenidos por los anteriores prototipos del equipo EUPLA Racing Team.

En las pruebas de frenada de las últimas ediciones de MotoStudent se dieron los casos más restrictivos posibles para los prototipos, pasando de 70.590 Km/h a 0 Km/h en 30.7 metros en la primera moto; y recorriendo 24.8 metros desde una velocidad de 67.529 Km/h con el siguiente prototipo, a pesar de que este último no llegó a la velocidad requerida para dar por válida la prueba clasificatoria.

Por lo tanto, podemos resolver los siguientes sistemas de ecuaciones aplicando las ecuaciones del movimiento para determinar las deceleraciones experimentadas por cada una de ellas:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad v = v_0 + a t$$

$$\mathbf{1^o\ Moto: 70.590\ km/h = 19.608\ m/s} \rightarrow \begin{cases} 30.7 = 0 + 19.608 \cdot t + \frac{1}{2} a t^2 \\ 0 = 19.608 + a t \end{cases}$$

*Despejando:*

$$t = 3.1313\text{s} \quad a = -6.2619\text{m/s}^2$$

$$\mathbf{2^o\ Moto: 67.529\ km/h = 18.758\ m/s} \rightarrow \begin{cases} 24.8 = 0 + 18.758 \cdot t + \frac{1}{2} a t^2 \\ 0 = 18.758 + a t \end{cases}$$

*Despejando:*

$$t = 3.1313\text{s} \quad a = -7.0940\text{m/s}^2$$

Vamos a tomar como referencia la deceleración experimentada por el segundo prototipo del equipo, puesto que, además de ser el más reciente, también es el mayor por lo que aporta unas condiciones más restrictivas en nuestros cálculos, garantizando una mayor seguridad. Le aplicamos un coeficiente de seguridad de 1.3:  $a = 7.0940 \cdot 1.3 = 9.222\text{m/s}^2$

La fuerza en el sentido contrario de la marcha que se ejercerá sobre la motocicleta como consecuencia de la deceleración experimentada viene dada por la segunda ley de Newton según la expresión:  $F = m \cdot a = (150 + 75) \cdot 9.222 = 2074.995N$

Esta fuerza será del mismo valor que la fuerza de inercia de la motocicleta en el momento de la frenada, por lo que se generará un momento flector en la parte delantera del vehículo según la altura de las horquillas:

$$M_i = F_i \cdot h_h = 2074.995 \cdot 0.7429 = 1541.514Nm$$

Con la deceleración estimada, y conociendo tanto el peso como la geometría del vehículo, podemos determinar la transferencia de carga que se experimentará en los apoyos de la motocicleta:

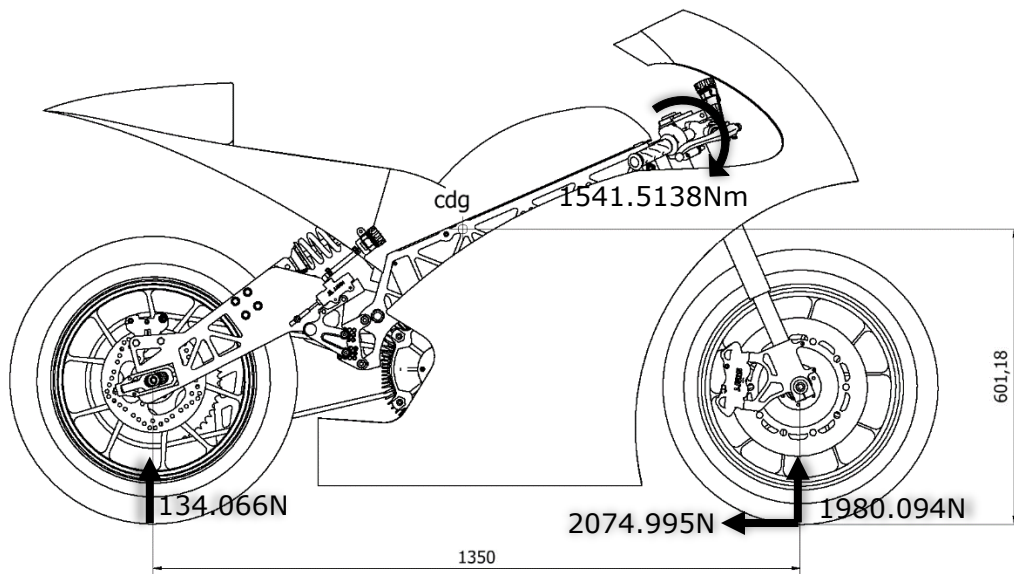
$$\Delta W_r = \frac{m \cdot a \cdot h}{L}$$

$$\Delta W_r = \frac{(150 + 75) \cdot 9.222 \cdot 601.18}{1350} = 924.014N$$

La transferencia de carga hace que se modifiquen las reacciones obtenidas en los apoyos para una situación de reposo, por lo que podemos calcular cómo afecta la deceleración a los esfuerzos sobre las ruedas:

$$N_f = W_f - \Delta W_r = 1056.08 + 924.014 = 1980.094N$$

$$N_r = W_r + \Delta W_r = 1056.08 - 924.014 = 132.066N$$



*Ilustración 86: Cargas durante la frenada máxima*

El hecho de que la fuerza de reacción en la rueda delantera no sea nula ni negativa implica que no se producirá un levantamiento de esta en condiciones de máxima deceleración, manteniendo el contacto con el pavimento en todo momento.

Sin embargo, dada lo cercano que está su valor a cero, podemos despreciar el efecto de frenado de la rueda trasera en condiciones de máxima deceleración, por lo que toda la carga sería recibida por el tren delantero.

#### 6.4.4. Paso por curva

Para el presente estudio se considera una curva de radio constante de 150 metros que es atravesada a una velocidad lineal constante (aceleración tangencial nula) de 150km/h. Por lo tanto, la fuerza centrípeta experimentada por el vehículo es de:

$$v = 150\text{km/h} = 41.67\text{m/s}$$

$$F_c = ma_c = m \frac{v^2}{r}$$

$$F_c = (150 + 75) \frac{41.67^2}{150} = 2604.16\text{N}$$

Conocida la fuerza centrípeta y la reacción en los apoyos de la motocicleta, podemos determinar el ángulo de balanceo que experimentaría durante la curva:

$$\alpha = \text{atan} \frac{F_c}{N}$$

$$\alpha = \text{atan} \frac{2604.16}{2205} = 49.745^\circ$$

La descomposición de fuerzas que experimenta la motocicleta según los ejes Z e Y del vehículo (plano transversal) viene dada por las siguientes expresiones:

$$F_z = N \sin \alpha - F_c \cos \alpha$$

$$F_y = N \cos \alpha + F_c \sin \alpha$$

$$F_z = 2205 \sin 49.745 - 2604.16 \cos 49.745 \approx 0\text{N}$$

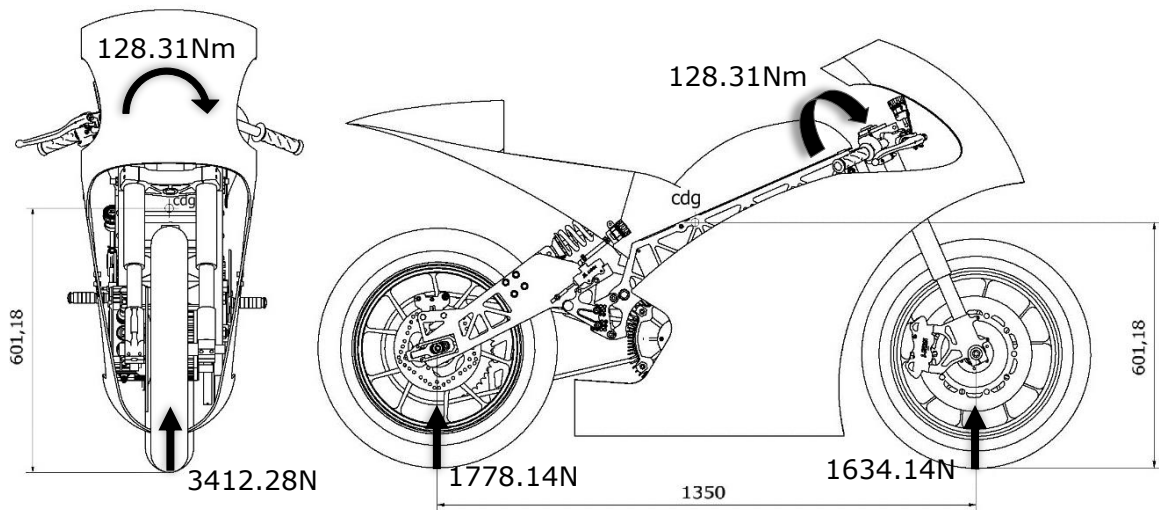
$$F_y = 2205 \cos 49.745 + 2604.16 \sin 49.745 = 3412.28\text{N}$$

Esta fuerza vertical aplicada sobre el eje Y se distribuye sobre la rueda delantera y trasera de la misma forma que en la situación de reposo, es decir, un 47.89% en el tren delantero y un 52.11% en el trasero, por lo que las reacciones en los apoyos serán:

$$F_{yf} = 0.4789 \cdot 3412.28 = 1634.14\text{N}$$

$$F_{yr} = 0.5211 \cdot 3412.28 = 1778.14\text{N}$$

Por lo tanto, la distribución de cargas en la motocicleta durante el paso por curvas quedará según la *Ilustración 87*.



*Ilustración 87: Cargas en el paso por curva*

El origen del momento torsor de 128.31Nm que aparece en la pipa de dirección se explica con mayor detalle en el apartado 5.4.2.2.3. *Paso por curva*.

### 6.4.5. Anclaje del motor

El motor empleado en la presente edición del campeonato MotoStudent se va a anclar únicamente a una de las paredes del chasis, de modo que esta debe ser lo suficientemente robusta como para soportar el momento flector que se originará en la toma de curvas.

Tal y como se ha diseñado, podemos considerar el motor como una viga en voladizo, por lo que la inclinación del vehículo que experimentará en las curvas generará una fuerza y momento flector que podría llegar a dañar la estructura.

Según se indica por el fabricante, el Engiro MS1920 pesa casi 25kg, por lo que la fuerza de inercia que experimentará en una curva será de:

$$F_c = m_{motor} \cdot a_c = m_{motor} \frac{v^2}{r} = 25 \frac{41.67^2}{150} = 289.40N$$

Sin embargo, también será importante conocer el valor de su peso que actuará verticalmente:

$$W_{motor} = m_{motor} \cdot g = 25 \cdot 9.8 = 245n$$

Como se ha visto en el apartado 6.4.4. *Paso por curva*, el centro de gravedad quedará descentrado con respecto al plano de simetría un ángulo de 49.745°, por lo que debemos calcular las componentes sobre los ejes Z e Y para poder aplicar correctamente las cargas en el software Ansys:

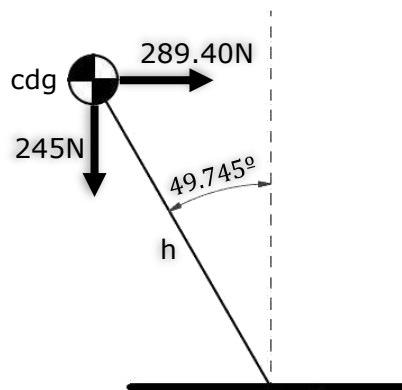


Ilustración 88: Centro de gravedad del motor en el paso por curva (vista frontal)

$$F_z = N \sin \alpha - F_c \cos \alpha$$

$$F_y = N \cos \alpha + F_c \sin \alpha$$

$$F_z = 245 \sin 49.745 - 289.40 \cos 49.745 \approx 0N$$

$$F_y = 245 \cos 49.745 + 289.40 \sin 49.745 = 379.18N$$

A pesar de la geometría del chasis, independientemente de si se toma la curva a derechas o a izquierdas, la fuerza resultante se ejercerá únicamente en dirección vertical según el sistema de referencia de la estructura.

## 6.5. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

En el desarrollo de este trabajo va a utilizarse el módulo de análisis estructural estático de Ansys. Mediante el uso de este software podremos realizar un análisis por método de elementos finitos sobre un modelo 3D conocidas las cargas que debe soportar.

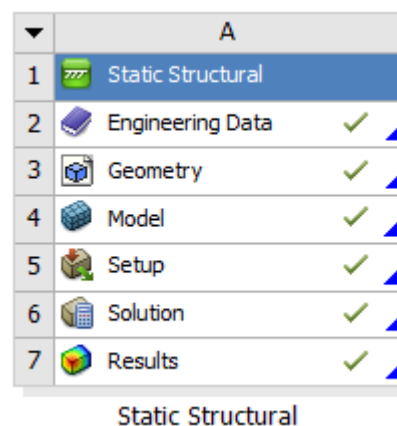


Ilustración 89: Módulo de análisis estructural estático de Ansys

Para hacer uso del módulo de análisis estructural estático es necesario proporcionar los siguientes datos al software:

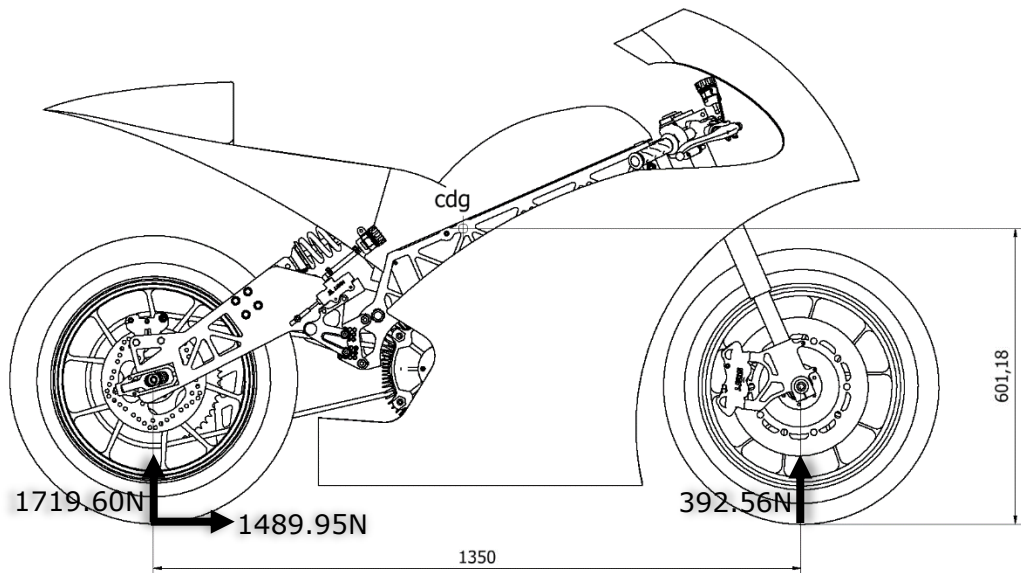
- **Engineering Data:** Toda la información conocida sobre los materiales empleados en el componente a analizar debe especificarse en este apartado con la mayor exactitud posible, por lo que se introducen las propiedades del Aluminio 6082 T651 y del acero 1.1730
- **Geometry:** Modelo 3D de la estructura a analizar, importado en formato .stp para asegurar la compatibilidad del diseño creado en Inventor. Se realiza un modelo simplificado sin tornillería para aligerar el trabajo de procesamiento del ordenador, estableciendo las restricciones de ligamiento o fricción según corresponda. Se asignan los materiales a cada una de las piezas
- **Model:** Una vez seleccionado el modelo 3D a analizar, es necesario aplicar un mallado apropiado a su geometría y a las cargas que deba soportar. Se establece un tamaño mínimo de mallado de 2mm y se aplican refinamientos en los puntos críticos.
- **Setup:** En este apartado se establecerán las condiciones de contorno: restricciones geométricas del sistema a analizar, el sistema de coordenadas y las propias cargas a aplicar.
- **Solution:** De un análisis estructural se pueden obtener muchos parámetros diferentes, por lo tanto, es necesario indicar cuales de ellos queremos calcular en el análisis y con qué condiciones. En nuestro caso queremos conocer la tensión equivalente de Von Mises y el desplazamiento máximo.
- **Results:** Una vez resuelto el sistema, muestra los resultados del análisis. Como se está calculando un modelo que representa a la estructura completa, deberemos filtrar y discernir cuales son los valores que nos interesan.

El método por elementos finitos que se va a aplicar consiste en la realización de análisis estructurales estáticos para determinar el comportamiento del chasis frente a las cargas descritas en el apartado 6.4. *Estudio de cargas*.

A pesar de la geometría del chasis, el uso de elementos paralelepípedos reporta errores de convergencia en el software, por lo que resultan imposibles de aplicar en la estructura estudiada. En su lugar, hacemos uso de tetraedros con un tamaño menor a 2mm por lo que, aunque el mallado será de peor calidad en determinados puntos, mediante la aplicación de operaciones de refinamiento podemos conseguir unos resultados satisfactorios.

### 6.5.1. Aceleración máxima

En condiciones de máxima aceleración, la motocicleta experimenta los esfuerzos representados en la *Ilustración 85* y la *Tabla 18*.



*Ilustración 85: Cargas durante la aceleración máxima*

*Tabla 18: Cargas durante la aceleración máxima*

Esfuerzo	Dirección	Valor
Avance	Eje X	1489.95N
Reacción rueda delantera	Eje Y	392.56N
Reacción rueda trasera	Eje Y	1719.60N

Los esfuerzos más desfavorables son originados en el tren trasero, por lo tanto, debido a su bajo valor, vamos a obviar la reacción de la rueda delantera en el análisis por elementos finitos para obtener un cálculo con condiciones más restrictivas al emplear la pipa de dirección como empotramiento.

Las fuerzas provenientes del tren trasero se transmiten al chasis a través del basculante, siendo este un elemento que tiene la posibilidad de efectuar un giro relativo respecto al chasis. Por lo tanto, para facilitar su implementación se realiza la suma vectorial de dichas cargas.

$$\sqrt{1489.95^2 + 1719.60^2} = 2375.30N$$

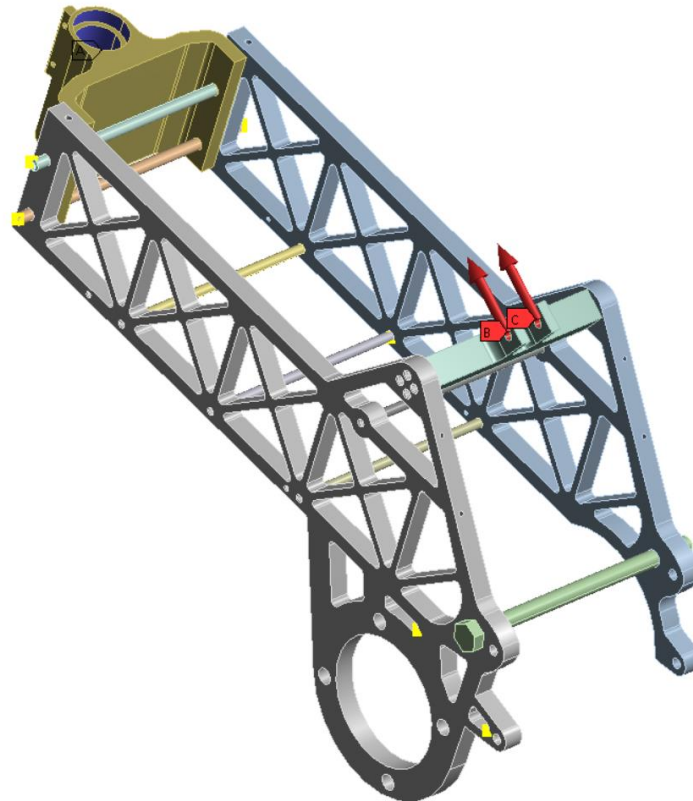
Las condiciones de contorno se aplican de la siguiente manera:



- Ya que los esfuerzos son generados en el tren trasero, el empotramiento de la estructura se realiza en la cara interior de la pipa de dirección.
- El módulo resultante de la suma vectorial se sitúa en la cara interior de los agujeros del anclaje de la suspensión trasera, en dirección al ángulo que describe el amortiguador.

A: Aceleracion  
Static Structural  
Time: 1, s  
16/06/2021 17:55

A Fixed Support  
B Force: 1137,6 N  
C Force 2: 1137,6 N

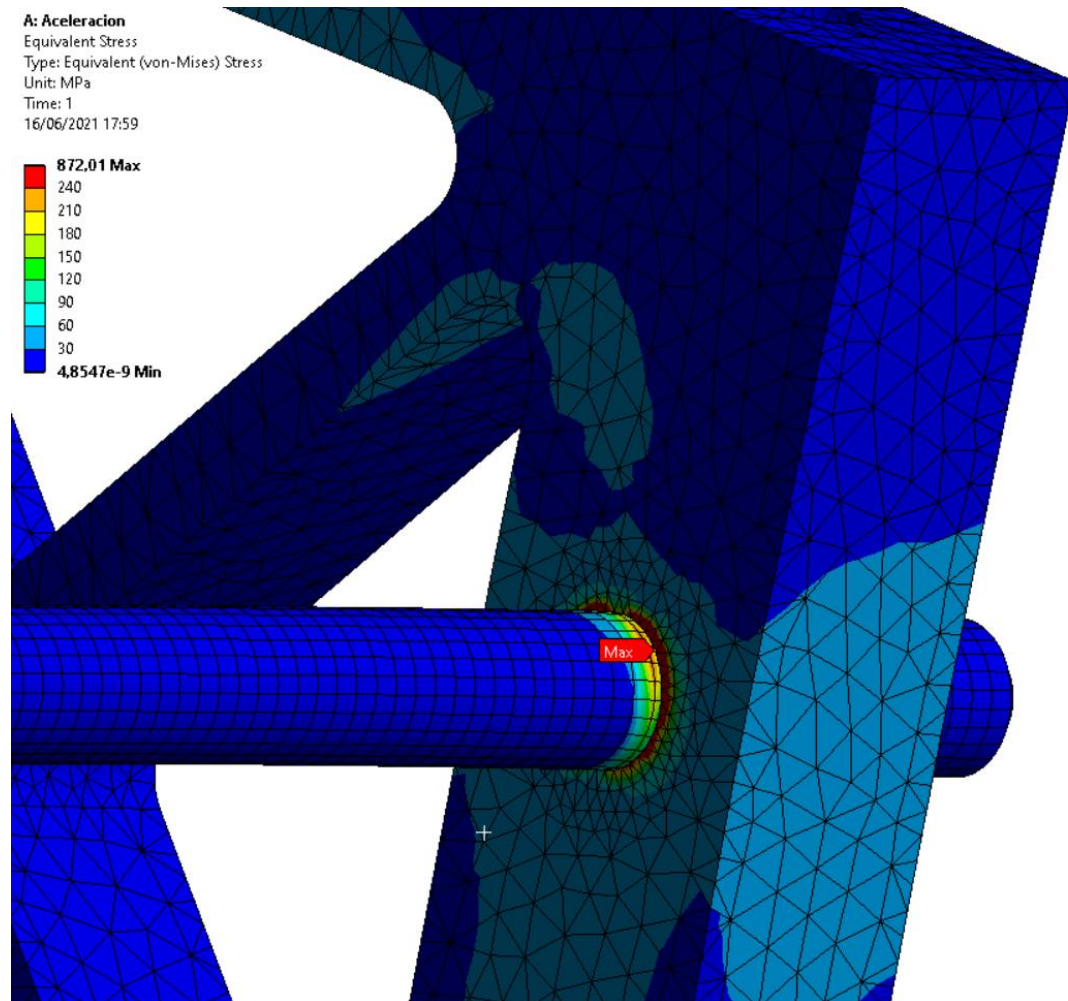


*Ilustración 90: Condiciones de contorno de la aceleración máxima*

### 6.5.1.1. Resultados

Lo primero que destaca al realizar el análisis por elementos finitos de la situación de aceleración es el elevado valor de la tensión equivalente de Von Mises obtenido, de 872.01MPa, muy superior al límite elástico de 240MPa del aluminio 6082 T651 empleado. Sin embargo, a simple vista toda la estructura aparece en un tono azulado indicativo de estar soportando bajas tensiones.

Esto es debido a un problema de convergencia en el anclaje de la pipa de dirección con el chasis, que está generando un concentrador de tensiones por convergencia de la malla en una de las aristas, elevando muchísimo la tensión de forma puntual.

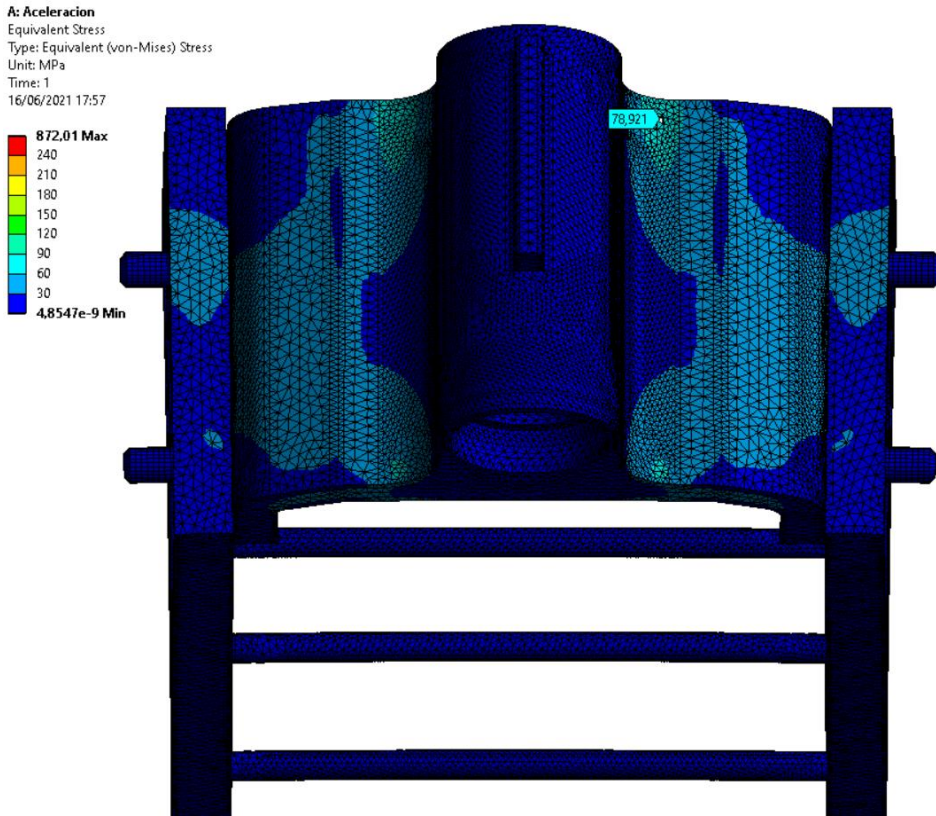


*Ilustración 91: Problema de convergencia en el anclaje de la pipa*

Al tratarse de una zona de contacto en la que se unen tres componentes diferentes y en la que el mallado encuentra un concentrador de tensiones debido a dicha convergencia, podemos afirmar que la tensión alcanzada en ese punto mediante el cálculo por elementos finitos no se corresponde con la realidad.

Por lo tanto, si reducimos la representación de los resultados en torno al límite elástico del material obtenemos lo siguiente:

Desarrollo



*Ilustración 92: Tensión equivalente de Von Mises en aceleración máxima*



*Ilustración 93: Desplazamiento total en aceleración máxima*

Podemos concluir que el chasis soportará correctamente las tensiones experimentadas en una situación de aceleración máxima al no verse superado en

ningún momento el límite elástico del material, produciéndose un desplazamiento de apenas 4.5mm que será absorbida por el sistema de suspensiones.

Tabla 19: Resultados aceleración máxima

Tensión	Desplazamiento
80MPa	4.51mm

El rango de trabajo de la pieza está dentro de los límites asumibles por el material, por lo que la estructura podrá soportar sin problemas una situación de aceleración máxima.

### 6.5.2. Frenada máxima

En condiciones de máxima deceleración, la motocicleta experimenta los esfuerzos representados en la Ilustración 86 y la Tabla 20.

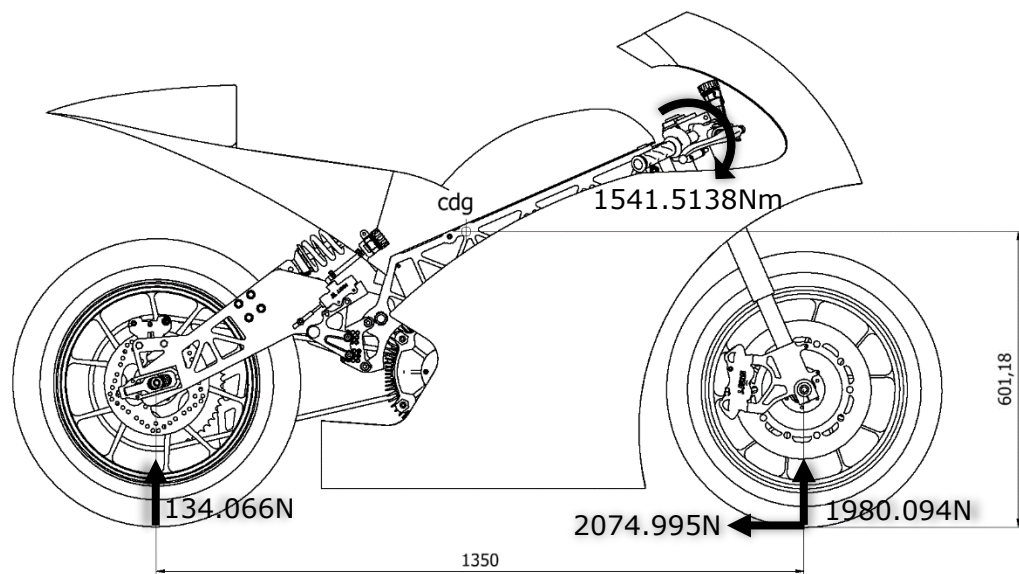


Ilustración 86: Cargas durante la frenada máxima

Tabla 20: Cargas durante la frenada máxima

Esfuerzo	Dirección	Valor
Frenada	Eje X	-2074.995N
Reacción rueda delantera	Eje Y	1980.094N
Reacción rueda trasera	Eje Y	134.066N
Momento en pipa	Eje Z	-1541.8138Nm

Los esfuerzos más desfavorables son originados en el tren delantero, por lo que, debido a su bajo valor, vamos a obviar la reacción de la rueda trasera en el análisis



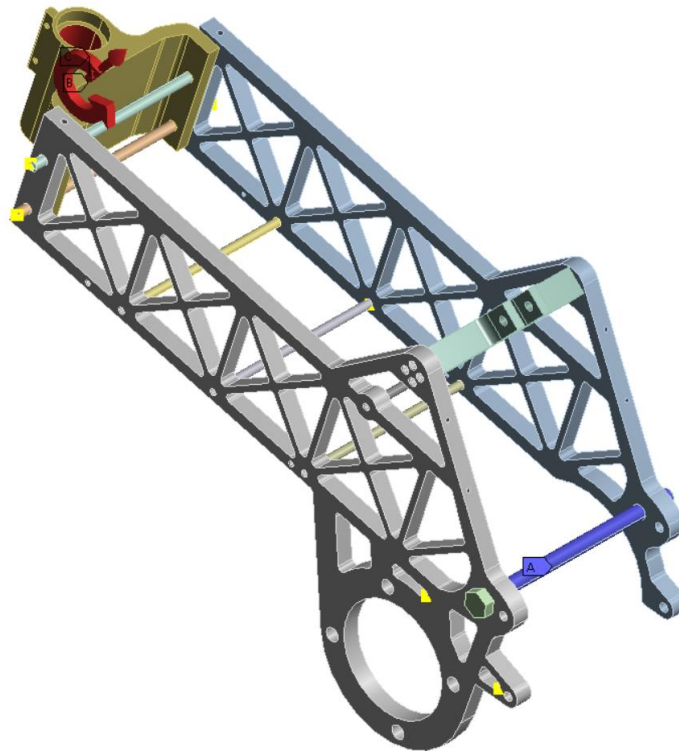
por elementos finitos para obtener un cálculo con condiciones más restrictivas al emplear el eje del basculante y el anclaje del amortiguador como empotramientos.

Por tanto, las condiciones de contorno se aplican de la siguiente manera:

- Ya que los esfuerzos son generados en el tren delantero, el empotramiento de la estructura se realiza en el eje del basculante
- Se aplican las componentes vectoriales provenientes del tren delantero sobre la cara interior de la pipa de dirección
- El momento flector es situado en la cara interior de la pipa de dirección.

**B: Frenada**  
 Static Structural  
 Time: 1, s  
 16/06/2021 18:23

**A** Fixed Support  
**B** Moment: 1541,5 N-mm  
**C** Force: 2868,2 N



*Ilustración 94: Condiciones de contorno de la frenada máxima*

### 6.5.2.1. Resultados

Al igual que sucedía en la situación de aceleración máxima, lo más llamativo tras realizar el cálculo por elementos finitos es el elevado valor de la tensión equivalente de Von Mises obtenido, de 450.56MPa, muy superior al límite elástico de 240MPa del aluminio 6082 T651 empleado.

Esto es debido a un problema de convergencia en el anclaje del eje del basculante, que está generando un concentrador de tensiones por convergencia de la malla en una de las aristas, elevando muchísimo la tensión de forma puntual.

**B: Frenada**

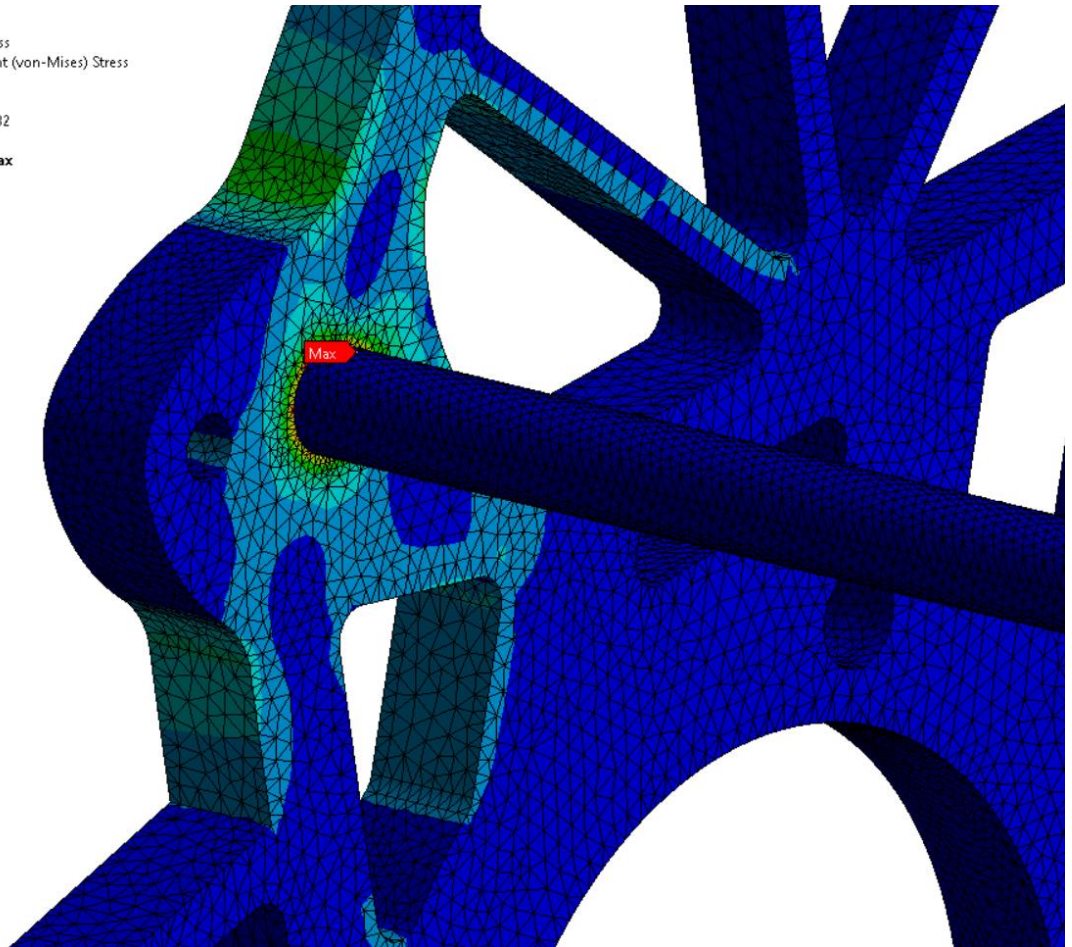
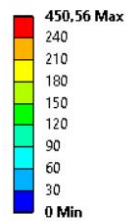
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

16/06/2021 18:32



*Ilustración 95: Problema de convergencia en el eje del basculante*

Al tratarse de una zona de contacto en la que se unen varios componentes diferentes y en la que el mallado encuentra un concentrador de tensiones debido a dicha convergencia, podemos afirmar que la tensión alcanzada en ese punto mediante el cálculo por elementos finitos no se corresponde con la realidad.

Por lo tanto, si reducimos la representación de los resultados en torno al límite elástico del material obtenemos lo siguiente:

Desarrollo

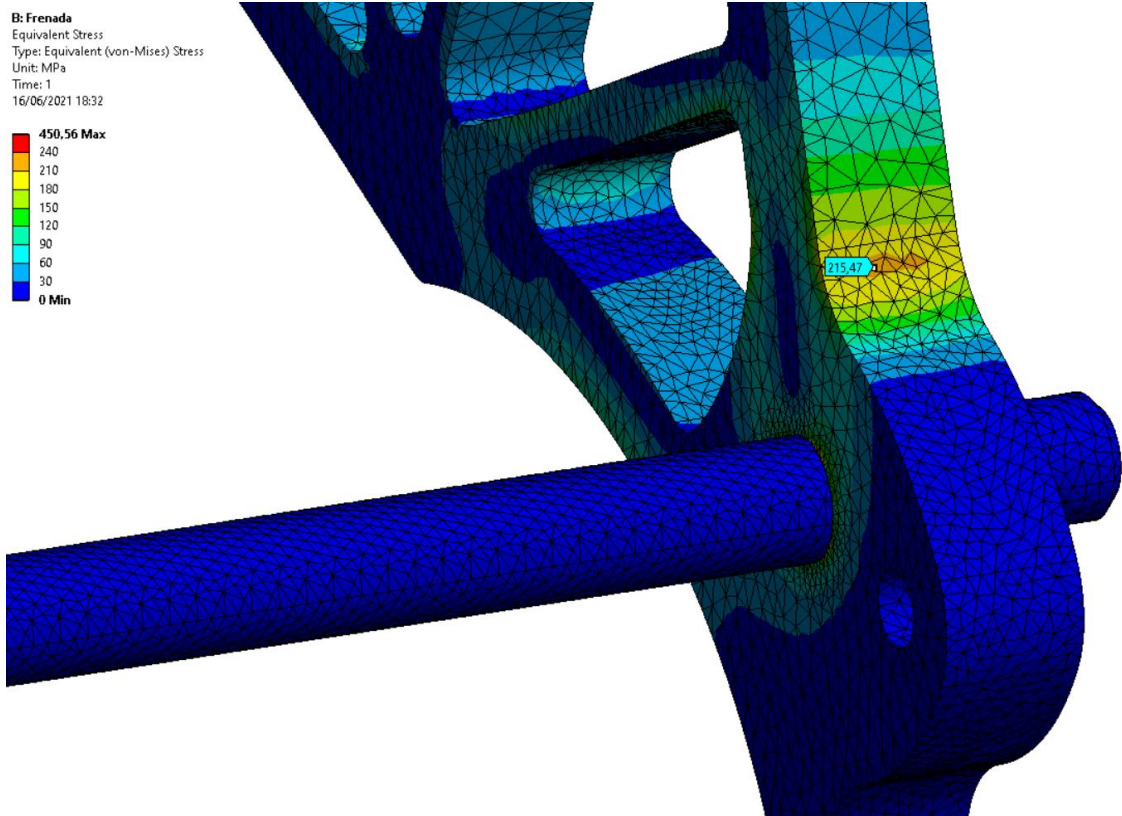


Ilustración 96: Tensión equivalente de Von Mises en la frenada máxima

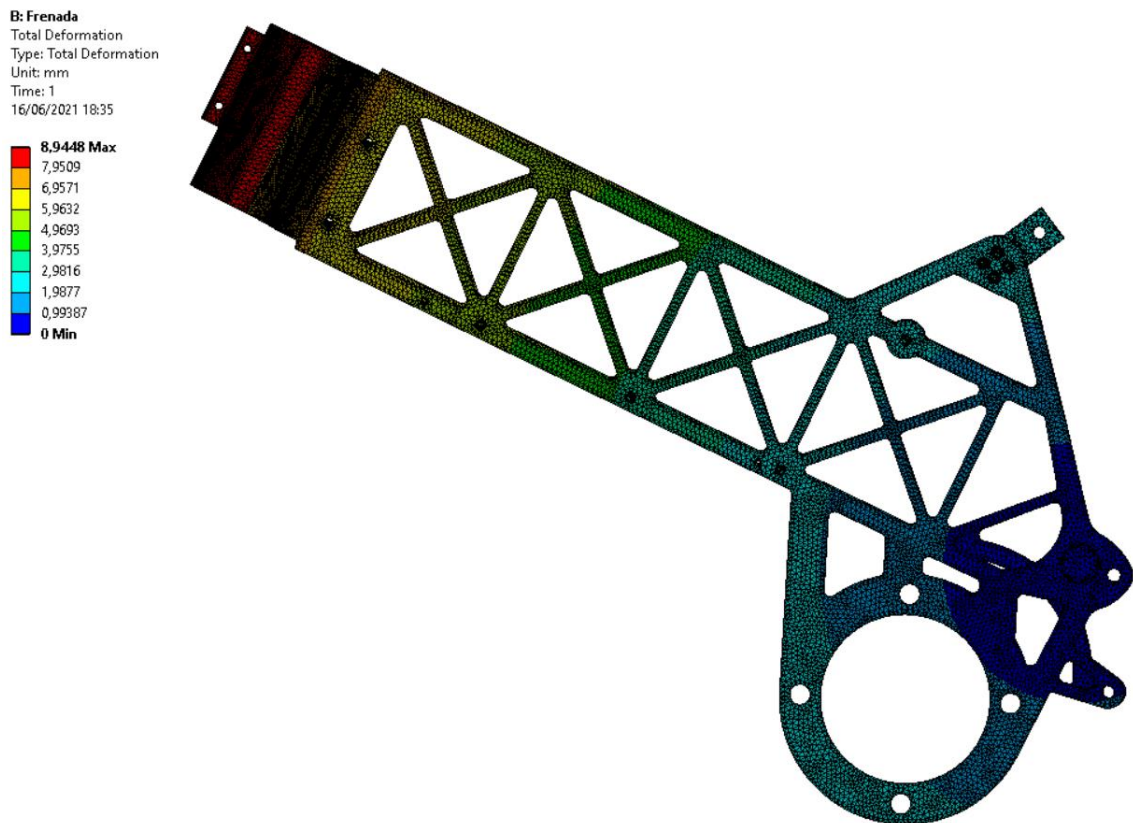


Ilustración 97: Desplazamiento total en la frenada máxima



Podemos concluir que el chasis soportará correctamente las tensiones experimentadas en una situación de frenada máxima al no verse superado en ningún momento el límite elástico del material, produciéndose un desplazamiento de apenas 8.95mm que será absorbida por el sistema de suspensiones.

Tensión	Desplazamiento
216MPa	8.95mm

Sin embargo, aunque la tensión equivalente de Von Mises obtenida está relativamente cercana a los 240MPa del límite elástico del material, debemos tener en cuenta que todos los cálculos están mayorados por lo que en la realidad difícilmente se alcanzará una tensión de 216MPa y, aunque lo hiciese, es un valor que la estructura puede soportar. El factor de seguridad es de, al menos  $\frac{240}{216} = 1.11$

El rango de trabajo de la pieza está dentro de los límites asumibles por el material, por lo que la estructura podrá soportar sin problemas una situación de frenada máxima.

### 6.5.3. Paso por curva

Al tomar la curva estudiada en el apartado 5.4.2.2.3. *Paso por curva*, la motocicleta experimenta los esfuerzos representados en la *Ilustración 87* y la *Tabla 21*.

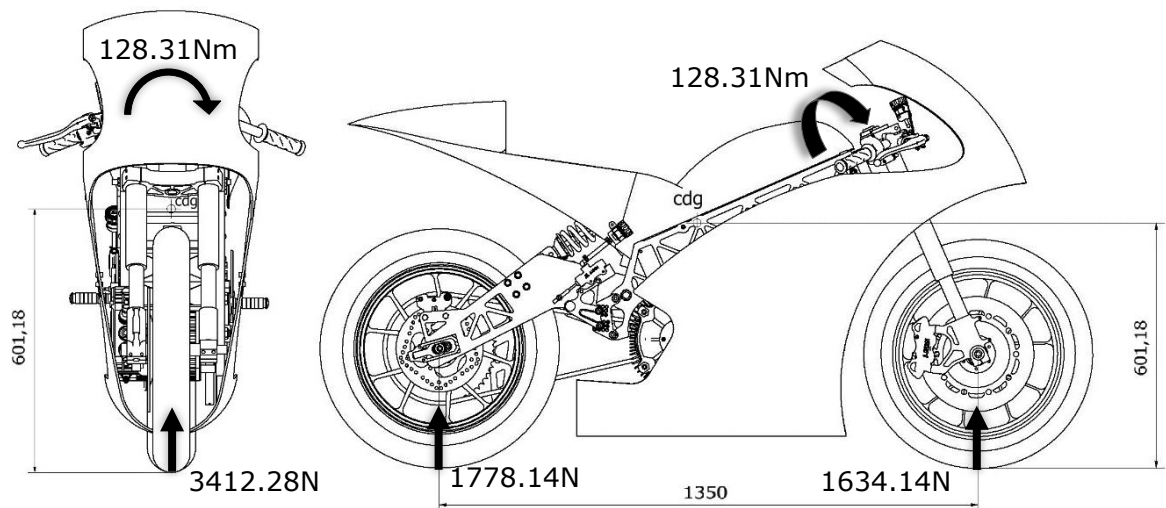


Ilustración 87: Cargas en el paso por curva

*Tabla 21: Cargas en el paso por curva*

<b>Esfuerzo</b>	<b>Dirección</b>	<b>Valor</b>
Reacción rueda delantera	Eje Y	1634.14N
Reacción rueda trasera	Eje Y	1778.14N
Momento en pipa	Eje X	-128.31Nm

La fuerza de reacción que experimentan las ruedas de la motocicleta estará, aproximadamente, distribuida mitad y mitad en cada una de ellas en una situación estacionaria. En el momento que se produzca una aceleración tangencial a la curva, ya sea de aceleración o de frenado, esta distribución variará.

Por lo tanto, debido a la dificultad para determinar una aplicación correcta de las condiciones de contorno, vamos a realizar un estudio de apoyos y empotramientos que nos permita determinar cómo aplicar las restricciones al chasis.

Para realizar la hipótesis de apoyos aplicamos los esfuerzos de la siguiente manera:

- La reacción generada en el tren delantero se aplica sobre la cara interior de la pipa de dirección en sentido vertical.
- La reacción generada en el tren trasero se aplica sobre las caras interiores del anclaje del amortiguador con el ángulo de este.
- El momento generado en la pipa de dirección se ejerce sobre la cara interior de esta.

De esta manera, vamos a realizar tres simulaciones rápidas modificando la posición de los empotramientos, que se realizarán en la pipa de dirección, en el eje del basculante y en ambos.

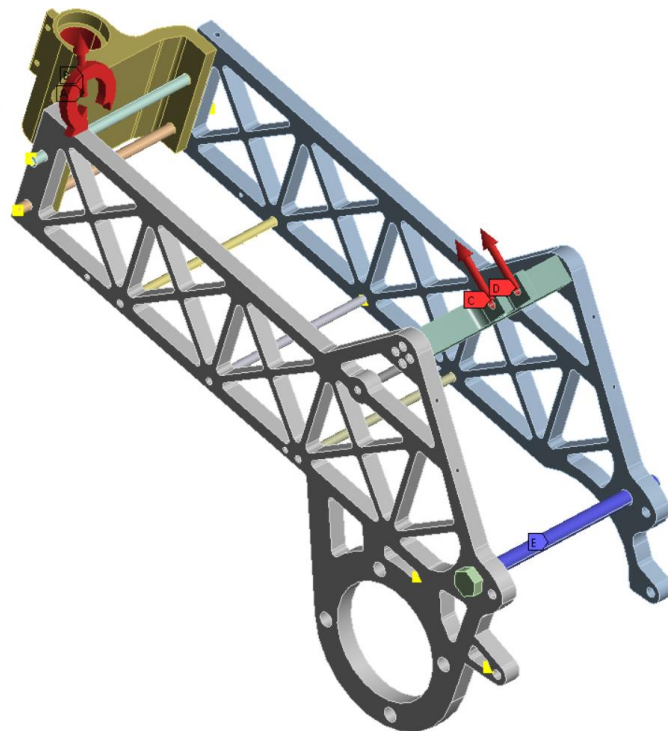
*Tabla 22: Resultados del estudio de los empotramientos*

<b>Apoyo</b>	<b>Tensión</b>	<b>Desplazamiento</b>
Pipa de dirección	62MPa	3.6mm
Eje del basculante	135.5MPa	7.08mm
Ambos	33.5MPa	0.2mm

Por lo tanto, en vista a los valores obtenidos en la *Tabla 22*, el análisis por elementos finitos a realizar en la situación de paso por curva se corresponderá con la situación más desfavorable, siendo esta mediante el empotramiento en el eje del basculante.

C: Curva eje basculante  
Static Structural  
Time: 1, s  
16/06/2021 19:34

A Force: 1634,1 N  
B Moment: 128,31 N-mm  
C Force 2: 889,07 N  
D Force 3: 889,07 N  
E Fixed Support



*Ilustración 98: Condiciones de contorno del paso por curva*

Si consideramos que tanto la fuerza de reacción del tren delantero como el momento torsor son aplicados en la pipa de dirección, resulta evidente que la situación más desfavorable se va a dar mediante el empotramiento de la estructura en un punto diferenciado y alejado de las zonas de aplicación de las fuerzas.

### **6.5.3.1. Resultados**

A diferencia de lo que ocurría en las situaciones de máxima frenada y de aceleración máxima, en este caso los valores obtenidos en los concentradores de tensiones son mucho más coherentes y, aunque se debiesen a un problema de convergencia del mallado, su valor se encuentra considerablemente por debajo del límite elástico del material.

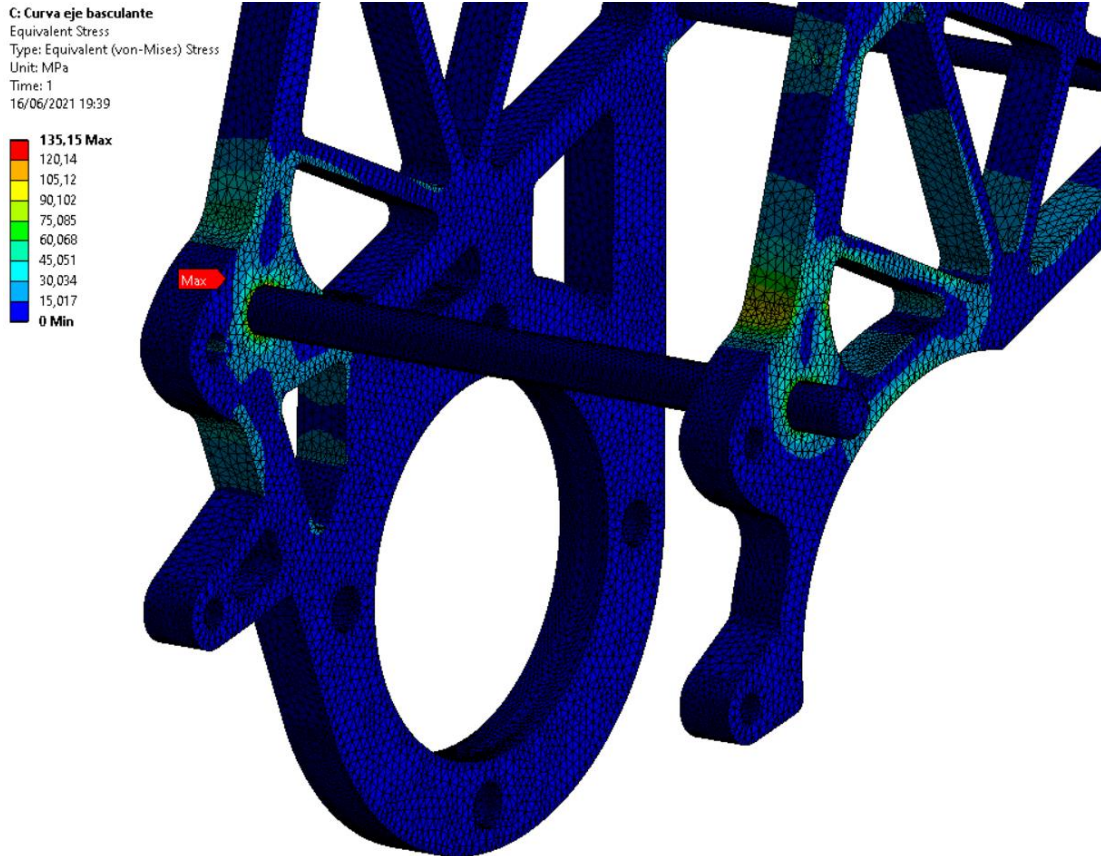


Ilustración 99: Tensión equivalente de Von Mises en el paso por curva

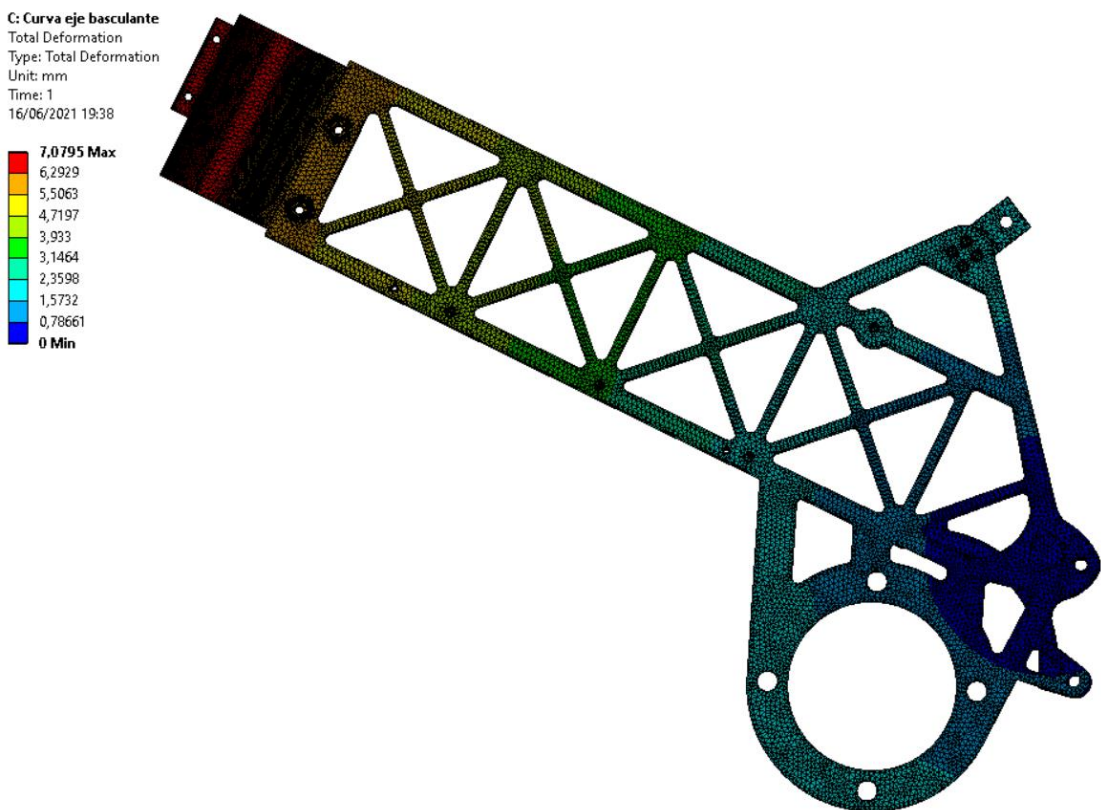


Ilustración 100: Desplazamiento total en el paso por curva

Podemos concluir que el chasis soportará correctamente las tensiones experimentadas en el paso por curva al no verse superado en ningún momento el límite elástico del material, produciéndose un desplazamiento de apenas 7.08mm que será absorbida, en parte, por el sistema de suspensiones.

*Tabla 23: Resultados del paso por curva*

<b>Tensión</b>	<b>Desplazamiento</b>
135.5MPa	7.08mm

El rango de trabajo de la pieza está dentro de los límites asumibles por el material, por lo que la estructura podrá soportar sin problemas una situación de frenada máxima.

#### 6.5.4. Anclaje del motor

La masa del motor ejercerá una fuerza sobre el chasis en las situaciones de paso por curva, resultante de la inercia generada por la fuerza centrípeta. Como se ha visto en el apartado 6.4.5. Anclaje del motor, la fuerza resultante, en conjunto con el peso del motor, únicamente será ejercida en el eje vertical de la motocicleta desde el centro de gravedad del motor.

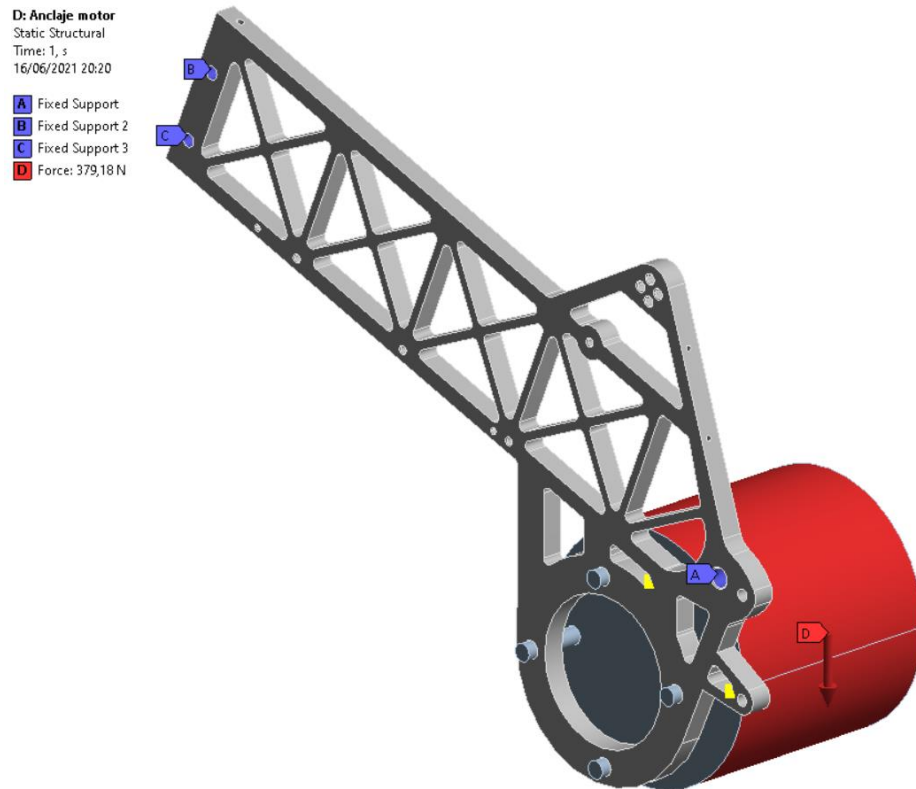
*Tabla 24: Cargas del anclaje del motor en el paso por curva*

<b>Esfuerzo</b>	<b>Dirección</b>	<b>Valor</b>
Resultante paso por curva	Eje Y	-379.18N

Únicamente nos interesa conocer si es válida la estructura que sirve de sujeción al motor, por lo que se realiza un análisis por elementos finitos con tan solo la pared izquierda del chasis y una versión simplificada del motor, con el objetivo de ahorrar recursos computacionales y de agilizar los cálculos.

Por tanto, las condiciones de contorno se aplican de la siguiente manera:

- La fuerza se aplica directamente sobre el motor en el eje Y.
- El empotramiento se realiza en la viga del chasis en las zonas de anclaje con la pipa de dirección y con el eje del basculante.



*Ilustración 101: Condiciones de contorno de los anclajes del motor*

#### 6.5.4.1. Resultados

A diferencia de lo que ocurría en las situaciones de máxima frenada y de aceleración máxima, en este caso los valores obtenidos en los concentradores de tensiones son mucho más coherentes y, aunque se debiesen a un problema de convergencia del mallado, su valor se encuentra considerablemente por debajo del límite elástico del material.



D: Anclaje motor  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
16/06/2021 20:25

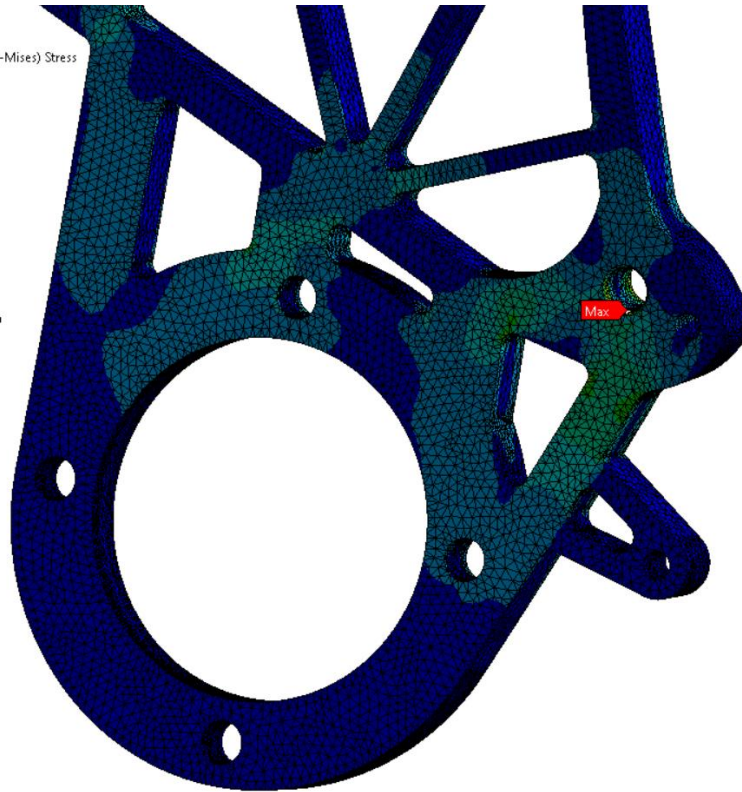
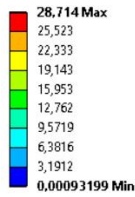


Ilustración 102: Tensión equivalente de Von Mises de los anclajes del motor (motor no visible)

D: Anclaje motor  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
16/06/2021 20:25

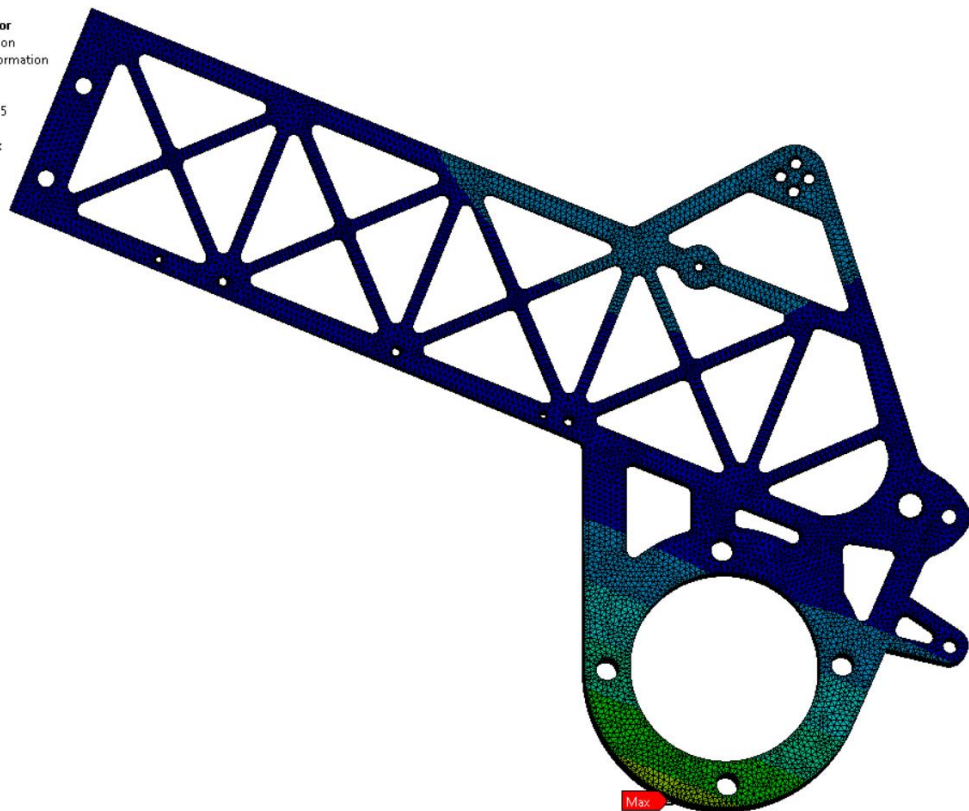
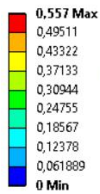


Ilustración 103: Desplazamiento total de los anclajes del motor (motor no visible)



Podemos concluir que el chasis soportará correctamente las tensiones generadas por el motor en el paso por curva al no verse superado en ningún momento el límite elástico del material, produciéndose un desplazamiento de apenas 0.56mm.

*Tabla 25: Resultados de los anclajes del motor*

<b>Tensión</b>	<b>Desplazamiento</b>
28.75MPa	0.56mm

El rango de trabajo de la pieza está dentro de los límites asumibles por el material, por lo que la estructura podrá soportar al motor sin problemas.

### 6.5.5. Evaluación de los resultados

Es fácilmente apreciable que la situación en la que la motocicleta se verá sometida a mayores esfuerzos es la frenada, en la que aparece una tensión de 216MPa, tan solo 24MPa por debajo del límite elástico del material. Sin embargo, todos los cálculos han sido mayorados, ya sea mediante coeficientes de seguridad o con la asunción de situaciones más desfavorables de lo que serían en realidad.

*Tabla 26: Resultados del análisis*

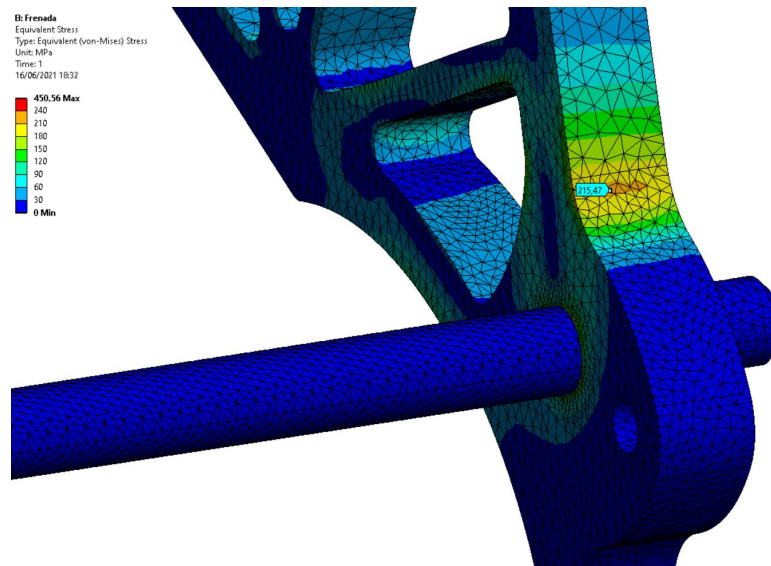
<b>Situación</b>	<b>Tensión</b>	<b>Desplazamiento</b>
<b>Aceleración</b>	80MPa	4.51mm
<b>Frenada</b>	216MPa	8.95mm
<b>Curva</b>	135.5MPa	7.08mm

Por ello, podemos concluir que el chasis diseñado resistirá las condiciones habituales de conducción dentro de las situaciones contempladas en este estudio. Cabe destacar que este análisis está fundamentado en el hecho de que la motocicleta únicamente va a participar en una carrera, por lo que no se han contemplado aspectos como la vida a fatiga o las vibraciones. Podrían realizarse análisis dinámicos, modales, de pandeo e incluso aerodinámicos para asegurar totalmente la validez del chasis, así como un dimensionamiento más en profundidad de los pernos.

Sin embargo, debido al uso temporal y tan controlado que se le va a dar al vehículo en manos de un experto, realizar esas verificaciones sería contraproducente debido a la propia naturaleza del proyecto, puesto que demandaría un tiempo y una serie de recursos que no compensan los posibles problemas que se solventarían.

En base a los resultados obtenidos en el presente análisis estructural estático, podemos sacar una serie de conclusiones sobre la estructura y su diseño.

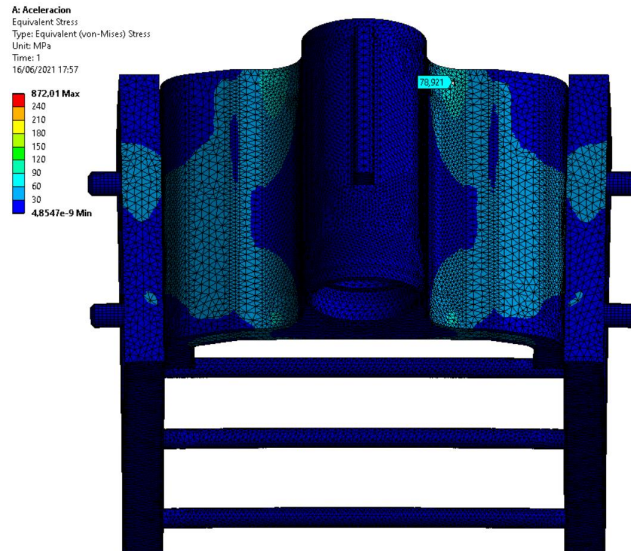
En primer lugar, resulta evidente que la zona en la que se concentran las mayores tensiones es el anclaje del basculante, en la parte trasera del chasis. Aunque este punto en la realidad no esté fijo debido a los movimientos del amortiguador y del basculante, es una zona problemática en la que se concentran las tensiones y que podría llegar a causar daños en la estructura.



*Ilustración 96: Tensión equivalente de Von Mises en la frenada máxima*

Según los resultados obtenidos, el material no debería alcanzar la fluencia en condiciones normales, pero deberemos estar atentos durante los entrenamientos para detectar y prevenir posibles daños. Sería recomendable plantear un rediseño de la zona para limitar el concentrador de tensiones que se genera sobre el eje del basculante, previsiblemente aumentando el radio de curvatura que hace de transición entre el anclaje del basculante y la viga lateral per se.

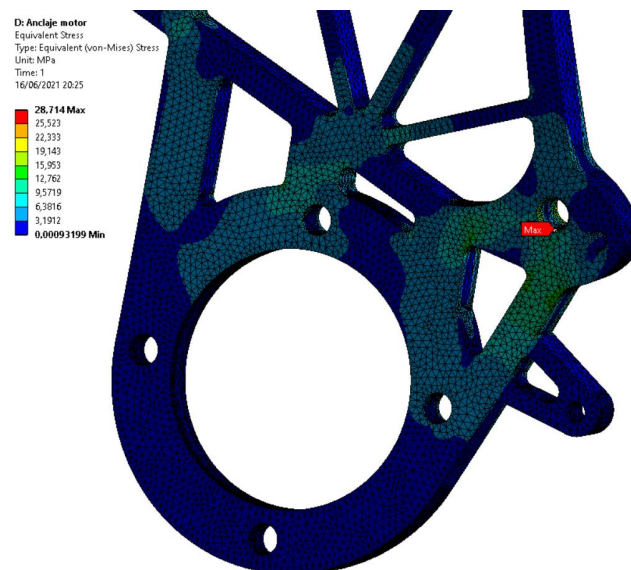
En el otro extremo del chasis tenemos la pipa de dirección que, pese a los grandes esfuerzos que debe soportar, apenas alcanza los 80MPa. Gracias a los tubos de acero que hacen de unión entre las paredes laterales del chasis y la pipa, se alcanza una rigidez excepcional en esta, que se encuentra muy lejos de alcanzar su límite de fluencia.



*Ilustración 92: Tensión equivalente de Von Mises en aceleración máxima*

Podemos afirmar, sin embargo, que se trata de una pieza sobredimensionada en la que las tensiones se distribuyen de forma muy uniforme y controlada, por lo que sería recomendable plantear un rediseño que consiga aligerar el peso e, idealmente, generar una apertura que permita el flujo de aire hacia la batería a modo de refrigeración.

Otra de las zonas que podría optimizarse son los anclajes del motor, puesto que las tensiones alcanzadas se encuentran por debajo de los 30MPa, concentrándose la mayoría de ellas en los tirantes verticales que sirven de unión entre la zona de sujeción y la propia viga lateral.



*Ilustración 102: Tensión equivalente de Von Mises de los anclajes del motor (motor no visible)*

Una tensión equivalente de Von Mises de tan solo 28.75MPa implica que el coeficiente de seguridad en los anclajes del motor es de  $\frac{240}{28.75} = 8.35$ . Por lo tanto, no sería descabellado pensar en practicar una serie de vaciados, ya sea totales o parciales, en el círculo que actúa a modo de anclaje. Su espesor difícilmente podría reducirse puesto que se perdería superficie de contacto en las uniones roscadas que sujetan el motor, por lo que la única solución viable para disminuir el peso serían los vaciados.

En cuanto a la estructura del chasis en sí misma, no se aprecia que las vigas laterales puedan sufrir daños durante la conducción. Mediante el diseño triangulado a modo de celosía que presentan ambas paredes, en conjunto con los travesaños que soportan la batería, se ha conseguido una estructura extremadamente rígida y resistente en la que, si no fuese por el elevado peso de la batería, se podría prescindir de alguno de los travesaños.

## 7. CONCLUSIONES

El objetivo primordial que perseguía este trabajo era el desarrollo del chasis que incorporará el equipo EUPLA Racing Team en la VI edición del campeonato internacional MotoStudent. Para ello, ha sido fundamental la realización de un estudio previo que contemplase toda la información recopilada en las dos anteriores participaciones del equipo, en las que se implementaron tanto un chasis multitubular de acero como una estructura de doble viga de aluminio, que han servido como punto de partida para este proyecto.

Además de hacer uso de las fuentes propias del equipo y de su repositorio interno, se ha realizado la aportación de un estudio sobre otros modelos de motocicletas deportivas, tanto prototipos como modelos comerciales, con el objetivo de conocer las tendencias y líneas de diseño seguidas en el sector, pudiendo así tomar inspiración de una gran variedad de soluciones.

Sin embargo, una motocicleta es un vehículo complejo cuyo comportamiento viene determinado por numerosos factores. Por lo tanto, para comprender mejor cómo se relacionan sus prestaciones con las decisiones de diseño, se ha realizado un estudio en profundidad sobre los fundamentos teóricos que rigen el comportamiento de una motocicleta.

Una vez adquirida una buena base fundamentada y contrastada sobre la que desarrollar el proyecto, se ha alcanzado un diseño de doble viga de aluminio para el chasis que empleará el equipo EUPLA Racing Team en la VI edición del campeonato internacional MotoStudent. A día de hoy, este ha sido fabricado e implementado en el prototipo según las indicaciones y particularidades descritas en este proyecto, con la intención de ser usado en toda la fase final MS2 de la competición.

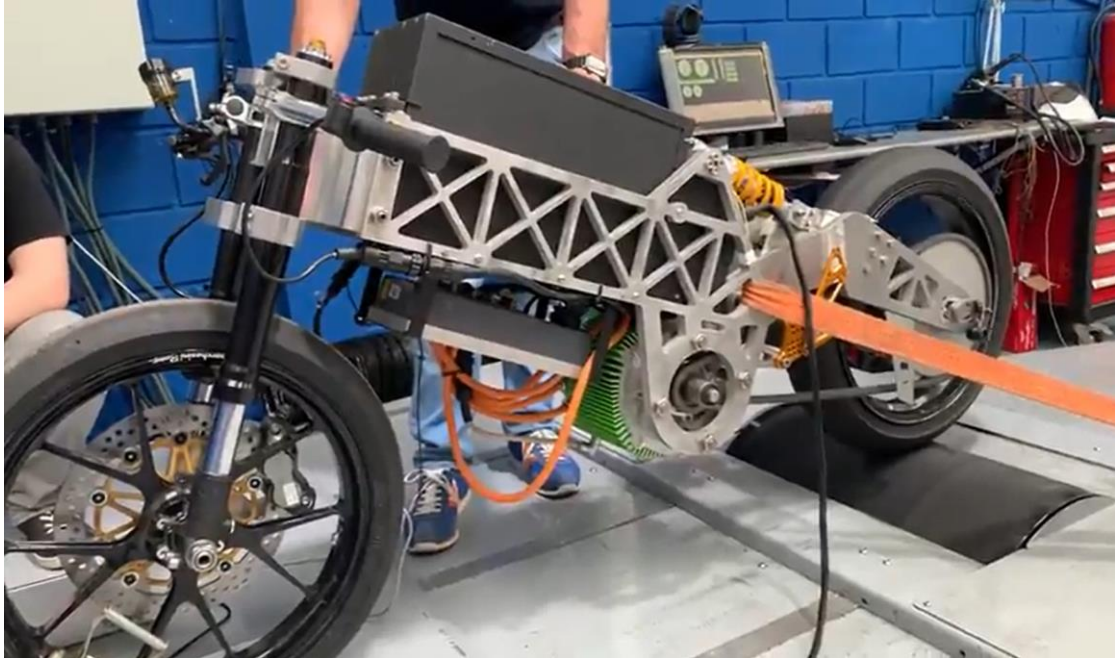
El diseño alcanzado ha supuesto una reducción de peso del 13.84% con respecto a la estructura empleada por el equipo en la IV edición, también de aluminio 6082 y que empleaba una metodología de montaje similar.

*Tabla 27: Peso de los chasis de EUPLA Racing Team*

<b>IV Edición</b>	<b>V Edición</b>	<b>VI Edición</b>
12.259kg	36.760kg	10.562kg

Por su parte, el principal proceso de fabricación utilizado ha sido el corte por agua, por lo que el coste total se ha visto extremadamente reducido gracias a la colaboración de una empresa patrocinadora y a la reducción del espesor de las planchas de material con respecto a los prototipos anteriores. Debido a esto, el

enfoque modular que se le ha dado desde un primer momento ha permitido obtener una estructura fácil de montar y de fabricar en las propias instalaciones del equipo, siendo necesario externalizar únicamente el corte de las vigas laterales.



*Ilustración 104: Moto de EUPLA Racing Team de la VI edición en un banco de potencia*

Debido a los requisitos que debe cumplir el prototipo, tanto por normativa como por seguridad y nivel de prestaciones, es imprescindible garantizar la integridad estructural del chasis. Para ello, se ha optado por realizar un análisis estructural estático por el método de elementos finitos en el que se han extrapolado las situaciones dinámicas más desfavorables que podría experimentar la motocicleta mediante la hipótesis de transferencia de cargas, ampliamente utilizada en el sector.

Los resultados obtenidos en el análisis demuestran que el chasis podrá soportar los esfuerzos a los que será sometido en condiciones normales de conducción, alcanzando unos valores de tensión y desplazamiento dentro del rango del trabajo del material, que no debería entrar en fluencia en ningún momento. Sin embargo, a pesar de ser un chasis perfectamente válido tanto geométrica como estructuralmente, se ha comprobado que existe margen de mejora y optimización tanto en la pipa de dirección como en los anclajes traseros.

La zona del eje del basculante ha demostrado ser la más débil del conjunto, puesto que en ella se concentran las tensiones de forma muy clara sobre una curvatura a modo de radio de transición. Por otra parte, los resultados obtenidos tanto en el anclaje del motor como en la pipa de dirección reflejan un sobredimensionamiento que podría mejorarse mediante la optimización topológica de





dichos componentes, ya sea mediante vaciados totales como parciales. Sin embargo, los vaciados triangulados a modo de celosía de las vigas laterales han demostrado un comportamiento idóneo, puesto que se ha conseguido una estructural ligera con una distribución excepcional de las cargas, sin que apenas realicen esfuerzos, mientras se proporciona una gran área para sujetar componentes.

En definitiva, se concluye que el chasis diseñado cumple correctamente con los requisitos y objetivos establecidos tanto por el equipo EUPLA Racing Team como por el órgano promotor de la competición, dando por válida su implementación y reafirmando su uso en la carrera de la fase final MS2 de MotoStudent.

## 7.1. TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo se enmarca en la participación por tercer año consecutivo del equipo EUPLA Racing Team en el campeonato internacional MotoStudent y, como tal, en estos momentos se cuenta con experiencia en el desarrollo de dos chasis de doble viga de aluminio y de uno multitubular de acero. Por lo tanto, en futuras ediciones se podría optar por cualquiera de estas alternativas con la seguridad que aporta un gran respaldo académico obtenido a lo largo de estos años.

A lo largo de este proyecto, han quedado en el tintero ciertas ideas y oportunidades de mejora que podrían retomarse en un futuro para pulir el diseño. En primer lugar, debería plantearse la realización de una optimización topológica tanto en la sujeción del motor como en la pipa de dirección. Por otra parte, el sistema de anclaje estudiado en el apartado 6.3.2.2. *Anclaje del motor* tiene muchísimo potencial y podría ser evolucionado para implementarse en un prototipo futuro.

A título personal, considero que la siguiente motocicleta del equipo debería seguir una tipología de doble viga mediante perfiles de aluminio soldado, similar al diseño estudiado en el apartado 4.2.2.1. *Universidad Politécnica de Valencia 2020 (Alcoy)*. Este chasis combinaría los conocimientos adquiridos hasta ahora por EUPLA Racing Team, prescindiendo de las uniones roscadas en favor de una estructura ensamblada mediante soldadura. De esta manera, se podría aprovechar todo el conocimiento adquirido en el trabajo con aluminio, especialmente tras haber realizado alguna soldadura en 6082 T651 para el basculante actual, junto con las técnicas que se emplearon en la V edición para realizar estructuras tubulares soldadas, como el corte por láser o la fabricación de un banco de soldadura.

En conclusión, se plantea una situación de convergencia de conocimientos para la VII edición de MotoStudent en la que se aproveche la experiencia del equipo en





ambas tipologías de chasis para idear un diseño híbrido que combine las virtudes de ambos.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso Vaamonde, P. (2018). *Diseño del Chasis Moto Student 2018*. Bilbao: Universidad del País Vasco.
- Álvarez de Eulate Zayas, C. (2012). *Fabricación de un Prototipo de Moto de Competición de Categoría Moto 3*. Pamplona: Universidad Pública de Navarra.
- Anexo I: Influencia de la Calidad de Malla en las Simulaciones. Uso de Condiciones de Contorno Periódicas*. (s.f.).
- Anzuela Recasens, X. (2016). *Design of a modular BMS for EV focused on MotoStudent*. La Almunia de Doña Godina: Escuela Universitaria Politécnica La Almunia.
- Arias-Paz Gutiérrez, M. (2003). *Motocicletas* (32ª Edición ed.). Madrid: CIE Inversiones Editoriales Dossat 2000 S.L.
- Bada Nerín, C. (2016). *Desarrollo de Transmisión Secundaria de una Motocicleta Eléctrica*. La Almunia de Doña Godina: Escuela Universitaria Politécnica La Almunia.
- Bayas Guevara, C., & Rosero Sánchez, D. (2015). *Diseño y Construcción de una Carrocería de un Vehículo de Competencia Fórmula "SAE" en Fibra de Vidrio, para la Escuela de Ingeniería Automotriz*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Beaskoetxea Ibarra, G. (2020). *Diseño y Fabricación de la Puntera de la Suspensión Delantera para MotoStudent*. Bilbao: Universidad del País Vasco.
- Beeler, J. (17 de diciembre de 2010). *Mission R Electric Superbike Breaks Cover*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Asphalt & Rubber: <https://www.asphaltandrubber.com/bikes/mission-r-electric-superbike/>
- Beeler, J. (9 de junio de 2013). *Brough Superior Debuts Familiar Moto2 Race Bike*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Asphalt & Rubber: <https://www.asphaltandrubber.com/racing/brough-superior-moto2-race-bike/>
- Beeler, J. (3 de marzo de 2019). *Under the Hood of the Energica Ego*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Asphalt & Rubber: <https://www.asphaltandrubber.com/bikes/energica-ego-superbike-no-fairings/>

- Brazeau, J. (19 de diciembre de 2015). *Dirt Force Motorcycles DHX Moto 2.0*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de GrabCAD: <https://grabcad.com/library/dirt-force-motorcycles-dhx-moto-2-0-1>
- Cabrera Munuera, J. (2019). *Análisis Dinámico de una Motocicleta*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Cabrera Reyes, M., & Márquez Flores, J. (2014). *Diseño y Construcción de un Chasis Tubular para un Vehículo de Competición Tipo Supercrosscar*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Calbo Rodríguez, A. (s.f.). *Diseño y Análisis de un Chasis para un Prototipo de Fórmula SAE*. Madrid: Universidad Pontificia de Comillas.
- Calvo Calzada, B. (2012). *Métodos Numéricos en Mecánica Aplicada*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- Cano Corbalán, J. (2013). *Diseño y Fabricación de un Chasis de una Motocicleta de 125cc 2T para la I Competición Internacional MotoStudent*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Casaus Mairal, J. (2010). *Estudio de Diseño y Fabricación de una Motocicleta de Competición de 125cc*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- Castillo, C. (s.f.). *Estudio Dinámico de un Modelo de Motocicleta*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Cathcart, A., & Wing, K. (1 de julio de 2012). *Flüsternder Donner: Eine Stoppuhr Lügt Nicht. Die Leistungsfähigkeit von Elektromotorrädern Steht den Benzinbikes um Nichts mehr Nach*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Motomobil: <https://motomobil.at/test-technik/ebikes-pedelects/428-mission-r-e-bike-test>
- Cortenfrio. (s.f.). *Corte por Agua*. Obtenido de Cortenfrio: <https://cortenfrio.com/corte-por-agua/>
- Cortés Velasco, M. (2014). *Modelo Orientado a Objetos de una Motocicleta Eléctrica*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- Cossalter, V. (2006). *Motorcycle Dynamics (Second Edition ed.)*.



Crowe, P. (13 de marzo de 2009). *Monocoque Motorcycle Chassis Possibilities*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de The Kneeslider: <https://thekneeslider.com/monocoque-motorcycle-chassis-possibilities/>

Daer Design. (2 de junio de 2020). *Prototipo Pre Moto 3*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de GrabCAD: <https://grabcad.com/library/prototipo-pre-moto-3-1>

Dew-Stahl. (1 de agosto de 2007). *1.4006 Stainless Martensitic, Chromium Steel*. Obtenido de Deutsche Edelstahlwerke GMBH: [https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4006\\_en.pdf](https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4006_en.pdf)

Dorado García, R. (2013). *Pre-Diseño, Cálculo y Evolución del Chasis de una Motocicleta de Competición*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. (16 de diciembre de 2018). *Selecció de nous membres MotoStudent 2018*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcel.

ETSEIB. (s.f.). *Motorcycle Frame Design and Optimization*. Barcelona: Universidad Politécnica de Barcelona.

EUPLA Racing Team. (2016). *IV Competició Internacional MotoStudent: Memoria del Proyecto MS1*. La Almunia de Doña Godia: Escuela Universitaria Politécnica de la Almunia.

EUPLA Racing Team. (2018). *MS1 Parte B: Diseño de Detalle*. La Almunia de Doña Godina: Escuela Universitaria Politécnica La Almunia.

Fall, J. (21 de enero de 2013). *Triumph T120 1968*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de GrabCAD: <https://grabcad.com/library/triumph-t120-1968>

Foale, T. (2002). *Motorcycle Handling and Chassis Design: the art and science*.

Font, L. (20 de abril de 2011). *Mission R, la Superbike Eléctrica al Desnudo*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de MotorPasión Moto: <https://www.motorpasionmoto.com/prototipos/mission-r-la-superbike-electrica-al-desnudo>

Fraboulet, D. (22 de mayo de 2017). *Ducati RS project*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de GrabCAD: <https://grabcad.com/library/ducati-rs-project-1>

- Fuentes Calles, L. (2011). *El Método de los Elementos Finitos Aplicado al Cálculo de Pequeñas Estructuras. Pre y Post Procesado*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- García García, I. (2013). *Diseño y Desarrollo de un Chasis de una Motocicleta de 250cc para la "II Competición Internacional MotoStudent"*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- González Fernández, Ó. (2012). *Diseño, Modelización y Fabricación de un Chasis para una Motocicleta de Competición*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Gutiérrez Nadal, I. (2016). *Diseño del Sistema de Energía de un Vehículo Eléctrico*. La Almunia de Doña Godina: Escuela Universitaria Politécnica La Almunia.
- Ingemecanica. (19 de junio de 2021). *Estudio y Clasificación de los Aceros*. Obtenido de Ingemecanica: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn101.html>
- IVAO. (14 de mayo de 2020). *Crosswind and Headwind Calculation*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de International Virtual Aviation Organisation: [https://mediawiki.ivao.aero/index.php?title=Crosswind\\_and\\_Headwind\\_calculation#Author](https://mediawiki.ivao.aero/index.php?title=Crosswind_and_Headwind_calculation#Author)
- Jareño Núñez, A. (2013). *Diseño del Basculante de una Motocicleta de Competición y Análisis de Fatiga*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- Jaria Gazol, J. (2020). *Procesos de Fabricación I*. La Almunia de Doña Godina: Escuela Universitaria Politécnica la Almunia.
- Jurado Pinto, A. (2014). *Suspensión Trasera Regulable de una Moto de Competición: Alternativa Full Floater*. Bilbao: ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA.
- karlossantiuste. (8 de septiembre de 2015). *ERM: 2.2 Criterios de fallo*. Obtenido de YouTube: [https://www.youtube.com/watch?v=IJ\\_ZSXMxaFY&ab\\_channel=karlossantiuste](https://www.youtube.com/watch?v=IJ_ZSXMxaFY&ab_channel=karlossantiuste)
- Leitman, S., & Brant, B. (2009). *Build your Own Electric Vehicle* (Second ed.). The McGraw-Hill Companies.
- Limousin Aranzabal, E. (2010). *Diseño y Cálculo Estructural del Chasis de una Motocicleta de Competición*. Pamplona: Universidad Pública de Navarra.



- Logan, V. (6 de febrero de 2021). *Ural Enduro*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de GrabCAD: <https://grabcad.com/library/ural-enduro-1>
- López de Munáin Díaz, I. (2014). *Diseño de una Moto Eléctrica de Competición*. Pamplona: Universidad Pública de Navarra.
- mamaktalk. (17 de diciembre de 2019). *Testing a MotoE Racer: The Energica Ego Corsa*. Obtenido de Auto Buzz: <https://automoview.blogspot.com/2019/12/testing-motoe-racer-energica-ego-corsa.html>
- Martos Iza, I. (2019). *Banco de Ensayos Multipropósito para Caracterizar Baterías de LiPo*. La Almunia de Doña Godina: Escuela Universitaria Politécnica La Almunia.
- MediaWiki. (2020). *Unofficial Service Manual*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Unofficial Zero Manual: [https://zeromanual.com/wiki/Unofficial\\_Service\\_Manual](https://zeromanual.com/wiki/Unofficial_Service_Manual)
- Moto Engineering Foundation. (2017). *V Competición Internacional MotoStudent: Reglamento de la Competición*. Alcañiz: TechnoPark MotorLand.
- Moto Engineering Foundation. (2019). *MotoStudent Body of Knowledge: MS1 Phase*. Alcañiz: TechnoPark MotorLand.
- Moto Engineering Foundation. (2019). *VI Competición Internacional MotoStudent: Reglamento de la Competición*. Alcañiz: TechnoPark MotorLand.
- MotorBike Magazine. (2019). *Energica Ego Corsa 2019*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de MotorBike Magazine: <https://www.motorbikemag.es/ficha-tecnica/energica-ego-corsa-2019/>
- Motorcycle Museums. (28 de junio de 2008). *Steam Cycle: Motorcycle Hall of Fame Museum*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Motorbike Stuff: <https://motorcyclegadgets.wordpress.com/2008/06/28/steam-cycle-motorcycle-hall-of-fame-museum/>
- NewZeroland. (13 de septiembre de 2019). *Zero Power Tank Install and Oboard Charger Death*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de YouTube: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_epJxo63Vgk&ab\\_channel=NewZeroland](https://www.youtube.com/watch?v=_epJxo63Vgk&ab_channel=NewZeroland)
- Núñez Gamoneda, Y. (2016). *Diseño de un Chasis Ligero Monoviga para una Motocicleta Offroad*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.

- Oxford Languages. (19 de junio de 2021). *Dictionary*. Obtenido de Oxford Languages: <https://languages.oup.com/google-dictionary-es/>
- OxyBlack. (19 de junio de 2021). *Composites - What is it*. Obtenido de OxyBlack: <https://www.oxyblack.com/index.php/en/composites>
- Polucci, G. (2005). *Dimensionamento di un telaio di motocicletta: Modello di simulazione e risultati di calcolo*. Roma: Università degli studi di Roma la Sapienza.
- Rasoparis, F. (2015). *Mission R*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Pinterest: <https://www.pinterest.es/pin/419890365229259244/>
- Redondo Martín, R. (2017). *Diseño y Simulación de un Chasis Tubular para un Vehículo Tipo Fórmula*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Rege, S., Khatri, C., Nandedkar, M., & Wagh, N. (2017). *Design and Analysis of Frame for Electric Motorcycle*. Pune: International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology.
- Reinares Gozalo, E. (2018). *Diseño del Chasis de una Motocicleta de Competición*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- Remacha, M. (2010). *Introducción a la Resistencia de Materiales*. La Almunia de Doña Godina: Escuela Universitaria Politécnica la Almunia.
- Rodríguez Calderón, W., Rojas Agüero, R., Yépez Aguirre, J., & Pallares Muñoz, M. (2017). *Análisis de Sensibilidad y de Estabilidad Numérica en el Cálculo de Factores de Intensidad de Tensiones en un Caso de Mecánica de Fractura*. Neiva: Universidad Cooperativa de Colombia.
- Rodríguez, D. (2013). *Aceleración Centrípeta*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Mi Cuaderno Virtual: <https://derodriguezv0726.wordpress.com/segundo-corte/tareas/aceleracion-centripeta/>
- Rosiña Lopez, C. (2016). *Proyecto de Diseño del Bastidor de una Motocicleta de Competición*. Tarrasa: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Salmerón Ruiz, À. (2015). *Diseño de una Motocicleta Deportiva Eléctrica*. Villanueva y Geltrú: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Sánchez Catalán, J., & Pons Ruiz, A. (2014). *Ingeniería de Materiales*. La Almunia de Doña Godina: Escuela Universitaria Politécnica la Almunia.



Sarmiento Bayona, J., & Delgado Rodríguez, J. (s.f.). *Diseño y Construcción de una Motocicleta Deportiva*.

Somoza, A. (17 de septiembre de 2015). *Missin Motorcycles en Bancarrota: Adios a la Espectacular Mission R*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Todo Circuito: <https://www.todocircuito.com/noticias/9380-mission-motorcycles-en-bancarrotas-adios-a-la-espectacular-mission-r.html>

Soria Guijarro, R. (2020). *Evaluación de Alternativas, Diseño y Cálculo de Chasis para MotoStudent Petrol*. Alcoy: Universidad Politécnica de Valencia.

Sotés Díaz, D. (2013). *Industrialización de una Motocicleta de Competición*. Pamplona: Universidad Pública de Navarra.

Stéphane, M. (24 de noviembre de 2020). *XS 650 Flat Track*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de GrabCAD: <https://grabcad.com/library/xs-650-flat-track-1>

Stonehocker, T. (16 de febrero de 2011). *1952 FL Assy-D*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de GrabCAD: <https://grabcad.com/library/1952-fl-assy-d>

Suñén Angós, D. (2016). *Banco de Ensayos para Regulador de Motor Brushless*. La Almunia de Doña Godina: Escuela Universitaria Politécnica La Almunia.

The Efficient Engineer. (27 de abril de 2021). *Understanding the Finite Element Method*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de YouTube: [https://www.youtube.com/watch?v=GHjopp47vvQ&t=886s&ab\\_channel=TheEfficientEngineer](https://www.youtube.com/watch?v=GHjopp47vvQ&t=886s&ab_channel=TheEfficientEngineer)

Vogel, C. (2009). *Build Your Own Electric Motorcycle*. The McGraw-Hill Companies.

Wikipedia. (s.f.). *Aluminio*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio>

Wikipedia. (s.f.). *Normal Force*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Normal\\_force](https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_force)

Zero Motorcycles. (2020). *Fotos de Alta Resolución*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Zero Motorcycles: <https://www.zeromotorcycles.com/es-es/high-res-photos>

## 8.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias-Paz Gutiérrez, M. (2003). *Motocicletas* (32ª Edición ed.). Madrid: CIE Inversiones Editoriales Dossat 2000 S.L.
- Beeler, J. (17 de diciembre de 2010). *Mission R Electric Superbike Breaks Cover*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Asphalt & Rubber: <https://www.asphaltandrubber.com/bikes/mission-r-electric-superbike/>
- Beeler, J. (9 de junio de 2013). *Brouch Superior Debuts Familiar Moto2 Race Bike*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Asphalt & Rubber: <https://www.asphaltandrubber.com/racing/brough-superior-moto2-race-bike/>
- Beeler, J. (3 de marzo de 2019). *Under the Hood of the Energica Ego*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Asphalt & Rubber: <https://www.asphaltandrubber.com/bikes/energica-ego-superbike-no-fairings/>
- Brazeau, J. (19 de diciembre de 2015). *Dirt Force Motorcycles DHX Moto 2.0*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de GrabCAD: <https://grabcad.com/library/dirt-force-motorcycles-dhx-moto-2-0-1>
- Cathcart, A., & Wing, K. (1 de julio de 2012). *Flüsternder Donner: Eine Stoppuhr Lügt Nicht. Die Leistungsfähigkeit von Elektromotorrädern Steht den Benzinbikes um Nichts mehr Nach*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Motomobil: <https://motomobil.at/test-technik/ebikes-pedelects/428-mission-r-e-bike-test>
- Cortenfrio. (s.f.). *Corte por Agua*. Obtenido de Cortenfrio: <https://cortenfrio.com/corte-por-agua/>
- Cossalter, V. (2006). *Motorcycle Dynamics* (Second Edition ed.).
- Crowe, P. (13 de marzo de 2009). *Monocoque Motorcycle Chassis Possibilities*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de The Kneeslider: <https://thekneeslider.com/monocoque-motorcycle-chassis-possibilities/>
- Daer Design. (2 de junio de 2020). *Prototipo Pre Moto 3*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de GrabCAD: <https://grabcad.com/library/prototipo-pre-moto-3-1>
- Dew-Stahl. (1 de agosto de 2007). *1.4006 Stainless Martensitic, Chromium Steel*. Obtenido de Deutsche Edelstahlwerke GMBH: <https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew->



stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4006\_en.pdf

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. (16 de diciembre de 2018). *Selecció de nous membres MotoStudent 2018*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcel.

EUPLA Racing Team. (2016). *IV Competició Internacional MotoStudent: Memoria del Proyecto MS1*. La Almunia de Doña Godia: Escuela Universitaria Politécnica de la Almunia.

EUPLA Racing Team. (2018). *MS1 Parte B: Diseño de Detalle*. La Almunia de Doña Godina: Escuela Universitaria Politécnica La Almunia.

Fall, J. (21 de enero de 2013). *Triumph T120 1968*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de GrabCAD: <https://grabcad.com/library/triumph-t120-1968>

Foale, T. (2002). *Motorcycle Handling and Chassis Design: the art and science*.

Font, L. (20 de abril de 2011). *Mission R, la Superbike Eléctrica al Desnudo*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de MotorPasión Moto: <https://www.motorpasionmoto.com/prototipos/mission-r-la-superbike-electrica-al-desnudo>

Fraboulet, D. (22 de mayo de 2017). *Ducati RS project*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de GrabCAD: <https://grabcad.com/library/ducati-rs-project-1>

Fuentes Calles, L. (2011). *El Método de los Elementos Finitos Aplicado al Cálculo de Pequeñas Estructuras. Pre y Post Procesado*. Salamanca: Universidad de Salamanca.

García García, I. (2013). *Diseño y Desarrollo de un Chasis de una Motocicleta de 250cc para la "II Competición Internacional MotoStudent"*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.

Ingemecanica. (19 de junio de 2021). *Estudio y Clasificación de los Aceros*. Obtenido de Ingemecanica: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn101.html>

IVAO. (14 de mayo de 2020). *Crosswind and Headwind Calculation*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de International Virtual Aviation Organisation: [https://mediawiki.ivao.aero/index.php?title=Crosswind\\_and\\_Headwind\\_calculation#Author](https://mediawiki.ivao.aero/index.php?title=Crosswind_and_Headwind_calculation#Author)

- Jaria Gazol, J. (2020). *Procesos de Fabricación I*. La Almunia de Doña Godina: Escuela Universitaria Politécnica la Almunia.
- karlossantiuste. (8 de septiembre de 2015). *ERM: 2.2 Criterios de fallo*. Obtenido de YouTube:  
[https://www.youtube.com/watch?v=IJ\\_ZSXMxaFY&ab\\_channel=karlossantiuste](https://www.youtube.com/watch?v=IJ_ZSXMxaFY&ab_channel=karlossantiuste)
- Logan, V. (6 de febrero de 2021). *Ural Enduro*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de GrabCAD: <https://grabcad.com/library/ural-enduro-1>
- mamaktalk. (17 de diciembre de 2019). *Testing a MotoE Racer: The Energica Ego Corsa*. Obtenido de Auto Buzz: <https://automoview.blogspot.com/2019/12/testing-motoe-racer-energica-ego-corsa.html>
- MediaWiki. (2020). *Unofficial Service Manual*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Unofficial Zero Manual: [https://zeromanual.com/wiki/Unofficial\\_Service\\_Manual](https://zeromanual.com/wiki/Unofficial_Service_Manual)
- Moto Engineering Foundation. (2017). *V Competición Internacional MotoStudent: Reglamento de la Competición*. Alcañiz: TechnoPark MotorLand.
- Moto Engineering Foundation. (2019). *MotoStudent Body of Knowledge: MS1 Phase*. Alcañiz: TechnoPark MotorLand.
- Moto Engineering Foundation. (2019). *VI Competición Internacional MotoStudent: Reglamento de la Competición*. Alcañiz: TechnoPark MotorLand.
- MotorBike Magazine. (2019). *Energica Ego Corsa 2019*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de MotorBike Magazine: <https://www.motorbikemag.es/ficha-tecnica/energica-ego-corsa-2019/>
- Motorcycle Museums. (28 de junio de 2008). *Steam Cycle: Motorcycle Hall of Fame Museum*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Motorbike Stuff: <https://motorcyclegadgets.wordpress.com/2008/06/28/steam-cycle-motorcycle-hall-of-fame-museum/>
- NewZeroland. (13 de septiembre de 2019). *Zero Power Tank Install and Oboard Charger Death*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de YouTube: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_epJxo63Vgk&ab\\_channel=NewZeroland](https://www.youtube.com/watch?v=_epJxo63Vgk&ab_channel=NewZeroland)
- Oxford Languages. (19 de junio de 2021). *Dictionarie*. Obtenido de Oxfor Languages: <https://languages.oup.com/google-dictionary-es/>



- OxyBlack. (19 de junio de 2021). *Composites - What is it*. Obtenido de OxyBlack:  
<https://www.oxyblack.com/index.php/en/composites>
- Polucci, G. (2005). *Dimensionamento di un telaio di motocicletta: Modello di simulazione e risultati di calcolo*. Roma: Università degli studi di Roma la Sapienza.
- Rasopariso, F. (2015). *Mission R*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Pinterest:  
<https://www.pinterest.es/pin/419890365229259244/>
- Reinares Gozalo, E. (2018). *Diseño del Chasis de una Motocicleta de Competición*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- Remacha, M. (2010). *Introducción a la Resistencia de Materiales*. La Almunia de Doña Godina: Escuela Universitaria Politécnica la Almunia.
- Rodríguez, D. (2013). *Aceleración Centrípetas*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Mi Cuaderno Virtual: <https://derodriguezv0726.wordpress.com/segundo-corte/tareas/aceleracion-centripeta/>
- Rosiña Lopez, C. (2016). *Proyecto de Diseño del Bastidor de una Motocicleta de Competición*. Tarrasa: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Salmerón Ruiz, À. (2015). *Diseño de una Motocicleta Deportiva Eléctrica*. Villanueva y Geltrú: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Sánchez Catalán, J., & Pons Ruiz, A. (2014). *Ingeniería de Materiales*. La Almunia de Doña Godina: Escuela Universitaria Politécnica la Almunia.
- Somoza, A. (17 de septiembre de 2015). *Mission Motorcycles en Bancarrota: Adios a la Espectacular Mission R*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Todo Circuito:  
<https://www.todocircuito.com/noticias/9380-mission-motorcycles-en-bancarrotas-adios-a-la-espectacular-mission-r.html>
- Soria Guijarro, R. (2020). *Evaluación de Alternativas, Diseño y Cálculo de Chasis para MotoStudent Petrol*. Alcoy: Universidad Politécnica de Valencia.
- Stéphane, M. (24 de noviembre de 2020). *XS 650 Flat Track*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de GrabCAD: <https://grabcad.com/library/xs-650-flat-track-1>
- Stonehocker, T. (16 de febrero de 2011). *1952 FL Assy-D*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de GrabCAD: <https://grabcad.com/library/1952-fl-assy-d>

The Efficient Engineer. (27 de abril de 2021). *Understanding the Finite Element Method*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de YouTube: [https://www.youtube.com/watch?v=Ghjopp47vvQ&t=886s&ab\\_channel=TheEfficientEngineer](https://www.youtube.com/watch?v=Ghjopp47vvQ&t=886s&ab_channel=TheEfficientEngineer)

Vogel, C. (2009). *Build Your Own Electric Motorcycle*. The McGraw-Hill Companies.

Wikipedia. (s.f.). *Aluminio*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio>

Wikipedia. (s.f.). *Normal Force*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Normal\\_force](https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_force)

Zero Motorcycles. (2020). *Fotos de Alta Resolución*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de Zero Motorcycles: <https://www.zeromotorcycles.com/es-es/high-res-photos>







## Relación de documentos

<input checked="" type="checkbox"/> Memoria	171	páginas
<input type="checkbox"/> Anexos	55	páginas

La Almunia, a 21 de 06 de 2021

Firmado: Daniel Espada Gargallo