



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO DE CHASIS DE MOTOCICLETA DE COMPETICIÓN

Alumno: Antonio Jesús Molina Higuera

Tutor: Prof. D. José Enrique Mata Bago
Dpto: Ingeniería mecánica y minera

Septiembre, 2016



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería mecánica y minera

Don José Enrique Mata Bago, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: “Diseño de chasis de motocicleta de competición”, que presenta Antonio Jesús Molina Higuera, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2016

El alumno:

El tutor:

Antonio Jesús Molina Higuera

Prof. D. José Enrique Mata Bago

Prefacio

La realización de este Trabajo de Fin de Grado es asignatura obligatoria del cuarto curso de Grado en Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Superior (en adelante EPS) de Jaén, centro perteneciente a la Universidad de Jaén, en cuyas instalaciones se desarrolla este estudio.

La razón por la que decidí elegir este proyecto fue el desarrollarlo paralelamente y como reflejo del trabajo realizado como integrante del equipo EPS-JAEN UJA TEAM que desde hace ya seis años viene trabajando en la realización de diversos prototipos de motocicletas con el fin de participar en la competición interuniversitaria MotoStudent. El presente trabajo se centra en el diseño y análisis de la estructura del prototipo actual, que en el año 2016 competirá animado por un motor eléctrico.

Debido a la naturaleza del proyecto, se necesitará hacer un estudio minucioso de los tipos de chasis existentes, materiales, requerimientos geométricos y su física para elaborar la mejor propuesta de diseño posible. Una vez hecho esto, se requiere un análisis estructural para comprobar su correcto desempeño y sus posibles mejoras y optimizaciones, presentando para todo lo anterior los resultados, interpretaciones y conclusiones.

Especial agradecimientos al Prof. Don José Enrique Mata Bago, sin cuyo consejo y supervisión no hubiera sido posible la correcta realización de este TFG ni la realización del prototipo final. Al equipo EPSJAEN UJA TEAM por su ayuda y facilidad de comunicación a la hora de trabajar codo con codo en el desarrollo de la motocicleta de esta edición; a la EPS de Jaén por su ayuda institucional, humana y material; a todos los patrocinadores que hacen posible esta aventura con su ayuda económica, y con el deseo de que entre todos este proyecto, del que este estudio sólo representa una pequeña parte, sea un éxito.



Contenido

Página

Prefacio.....	2
Lista de Figuras.....	6
Lista de Tablas.....	10
1. Introducción.....	11
2. Objetivo.....	11
3. Alcance	12
4. Motivación.....	12
5. Antecedentes	14
5.1. Objeto de la competición	14
5.2. Fases de la competición	14
5.2.1. Fase MS1: Proyecto industrial	14
5.2.2. Fase MS2: Pruebas dinámicas y carrera	147
5.3. Reglamentación y normativa	147
5.3.1. Requisitos generales de diseño	147
5.3.2. Reglamento técnico general, chasis	140
6. Historia Y Evolución De La Motocicleta	233
6.1. La motocicleta de combustión interna	233
6.2. La motocicleta eléctrica	34
6.3. Competición	37
7. El Chasis.....	39
7.1. Evolución del chasis	40
7.2. Tipos de chasis	46
7.2.1. Elementos comunes	46
7.2.2. Chasis tubular.....	39
7.2.3. Chasis multitubular	49
7.2.4. Chasis de viga	49
7.2.5. Chasis monocasco	50
7.2.6. Chasis con motor estructural	51
7.2.7. El subchasis	52
7.3. Materiales y propiedades	52
7.3.1. Acero	53
7.3.2. Acero al cromo-molibdeno	54
7.3.3. Aluminio.....	54



7.3.4. Titanio.....	54
7.3.5. Fibra de carbono.....	55
7.3.6. Magnesio.....	55
7.4. Consideraciones geométricas	56
7.4.1. Geometría básica de una motocicleta.....	56
7.4.2. Avance	57
7.4.3. Ángulo de ataque o lanzamiento.....	58
7.4.4. Distancia entre ejes	60
7.4.5. Centro de gravedad y transferencia de carga	62
7.4.6. Squat y hundimiento	64
7.4.7. Rigidez del bastidor	66
8. Cargas A Soportar Por El Chasis	68
8.1. Frenada máxima en la rueda delantera	68
8.2. Paso por curva	70
8.3. Prueba estática en banco	71
9. Modelado Del Chasis	72
9.1. Datos básicos.....	73
9.1.1. Parámetros.....	73
9.1.2. Material y perfilera	73
9.2. Elementos de chasis	72
9.2.1. Suspensión delantera y dirección	75
9.2.2. Suspensión trasera y Basculante.....	39
9.2.3. Motor	79
9.2.4. Baterías	81
9.2.5. Bastidor suspendido	82
9.2.6. Subchasis.....	85
10. Analisis Estructural Del Chasis.....	88
10.1. El método de los elementos finitos (MEF)	88
10.1.1. Historia	89
10.1.2. Ecuaciones	90
10.1.3. Etapas básicas en la utilización del método de los elementos finitos	93
10.2. Análisis general del chasis	98
Frenada máxima y paso por curva	104
Prueba estática en banco.....	106
10.2.1. Resultado y postprocesado.....	110



Frenada máxima y paso por curva	110
Prueba estática en banco.....	117
10.3. Análisis del balancín.....	125
10.4. Análisis del subchasis	127
10.5. Conclusiones de los análisis.....	130
11. Optimización estructural.....	132
11.1. Tipos de optimización estructural	132
11.1.1. Material sólido isotrópico con penalización (SIMP)	133
11.2. Optimización del chasis	134
11.2.1. Soporte de rótula del chasis	135
11.2.2. Portapinzas delantero.....	137
12. Conclusiones y comentarios.....	139
13. Acciones futuras.....	¡Error! Marcador no definido.
Bibliografía	142
Anexo I: Reglamento de la IV COMPETICIÓN INTERNACIONAL MOTOSTUDENT 2015 / 2016	143
Anexo II. Planos	147



Lista de Figuras

Página

Figura 1.-Equipo EPS-JAEN UJA TEAM con la motocicleta participante en II edición MotoStudent	13
Figura 2.- Equipo EPS-JAEN UJA TEAM con la motocicleta participante en III edición MotoStudent	13
Figura 3.- Cartel IV Competición Internacional MotoStudent	14
Figura 4.- Anchura máxima de la motocicleta	18
Figura 5.- Ángulo de inclinación lateral	18
Figura 6.- Mínima altura libre al suelo	19
Figura 7.- Anchura máxima del carenado	19
Figura 8: Correcta triangulación en celosía	21
Figura 9.- Tope anticaída	21
Figura 10.- Verificación estructural en banco de ensayo	22
Figura 11.- Velocípedo con motor de vapor de <i>Michaux-Perreaux</i> de 1868	24
Figura 12: Triciclo " <i>Butler Petrol Cycle</i> " de 1884	24
Figura 13.- <i>Reitwagen</i> de <i>Daimler-Maybach</i> de 1885	25
Figura 14.- <i>Hildebrand & Wolfmüller</i> de 1894	25
Figura 15.- <i>Royal Enfield 1901 model</i>	26
Figura 16.- <i>Indian Single 1901</i>	27
Figura 17.- <i>Triumph Type H</i> de 1915	27
Figura 18.- BMW R32 de 1923	28
Figura 19.- Record de velocidad de <i>Harley-Davidson</i> en 1937	28
Figura 20.- <i>Piaggio Vespa</i> de 1946	29
Figura 21.- NSU Max de 1953	30
Figura 22.- <i>Triumph Boneville</i> de 1959	30
Figura 23.- <i>Honda CB750</i> de 1969	31
Figura 24.- <i>Kawasaki Z900</i> de 1972	31
Figura 25.- BMW R50/5 de 1970	32
Figura 26.- BMW R100RS de 1977	32
Figura 27.- <i>Kawasaki H2R</i> de 2015	33
Figura 28.- Patente de motocicleta eléctrica de 1895	35
Figura 29.- <i>Socovel</i> de 1936	35
Figura 30.- <i>Corbin Electric City Bike</i> de 1975	36
Figura 31.- <i>Peugeot Scoot'Elec</i> de 1996	36
Figura 32.- Zero Rs de 2014	37
Figura 33.- <i>Yamaha YZR-M1</i>	38
Figura 34.- <i>Shinden Yon</i> de 2015	39
Figura 35.- Chasis <i>Werner</i> de 1901	40
Figura 36.- Chasis <i>Scott</i> de 1909	41
Figura 37.- Chasis <i>Mars</i> de 1920	41
Figura 38.- Chasis BMW R-32 de 1923	42
Figura 39.- Chasis <i>Zundapp</i> de 1934	42
Figura 40.- Chasis HRD de 1939	43
Figura 41.- Chasis de cuna Norton de 1950	43
Figura 42.- Chasis Honda de 1963	44



Figura 43.- Chasis monobloque Ossa de finales de los años 60	44
Figura 44.- Chasis multitubular <i>Norton</i> de 1975	45
Figura 45.- Chasis de doble viga de los años 80	45
Figura 46.- Chasis <i>Telelever</i> de BMW de 1993	46
Figura 47.- Partes de un bastidor (M. Arias-Paz (2003), Motocicletas, Editorial Dossat 2000)	47
Figura 48.- Chasis de cuna simple interrumpida	48
Figura 49.- Chasis de doble cuna	48
Figura 50.- Chasis multitubular	49
Figura 51.- Chasis de doble viga	50
Figura 52.- Chasis monocasco	50
Figura 53.- Chasis con motor estructural	51
Figura 54.- Chasis con caja de baterías como elemento estructural en motocicleta eléctrica	52
Figura 55.- Geometría básica de una motocicleta	56
Figura 56.- Fuerzas autocentrantes en rueda delantera	57
Figura 57.- Distintos ángulos de ataque	58
Figura 58.- Representación esquemática de motocicleta con inclinación y giro	59
Figura 59.- Diagrama de <i>Ackerman</i> para un giro	61
Figura 60.- Efecto del giro sobre la rueda trasera	61
Figura 61.- Transferencia de carga	63
Figura 62.- Fuerzas de tracción debido a cadena	65
Figura 63.- a) Desplazamiento lateral debido a flexión de horquilla y rueda. b) brazo de palanca que actúa sobre deflexión frontal	67
Figura 64.- Desplazamiento lateral de la rueda trasera debido a la flexión y torsión del chasis.	67
Figura 65.- Fuerzas en frenada máxima sobre la rueda delantera	69
Figura 66.- Fuerzas en paso por curva	71
Figura 67.- Solicitaciones de fuerza en prueba estática en banco	72
Figura 69.- Logo de Solidworks®	72
Figura 70.- Detalle de sistema de suspensión de modelo 2014	76
Figura 71.- Soporte rótula de dirección	77
Figura 72.- Balancín de suspensión delantera	77
Figura 73.- Amortiguación trasera	78
Figura 74.- Basculante	78
Figura 75.- Motor	79
Figura 76.- Planos motor	80
Figura 77.- Placas de motor	81
Figura 78.- Paquete de baterías	81
Figura 79.- Bastidor interno	82
Figura 80.- a) Asimetría del bastidor interno b) Bastidor interno con motor HEINZMANN PMS 150 - RLS.....	83
Figura 81.- Bastidor externo (sombreado en azul)	84
Figura 82.- Conjunto eje intermedio	85
Figura 83.- Detalle de eje intermedio	85
Figura 84.- Subchasis	86



Figura 85.- Chasis interno + externo y subchasis	87
Figura 86.- Conjunto final con elementos accesorios, suspensiones, motor y baterías	87
Figura 87.- Logotipo de Abaqus®	88
Figura 88.- Barra empotrada/extremo libre. a) Vista 3D. b) Vista 2D.	90
Figura 89.- Discretización del dominio con diferentes elementos finitos	94
Figura 90.- Sistema de referencia usados en el método de los elementos finitos. a) Sistema local de referencia y b) sistema global de referencia	95
Figura 91.- Exportado de Solidworks como .STEP	98
Figura 92.- Importar archivo en Abaqus®	98
Figura 93.- Estructura importada	99
Figura 94.- Editor materiales	99
Figura 95.- Aplicación de material a la estructura	100
Figura 96.- Creación instancia	101
Figura 97.- Step de aplicación de cargas	101
Figura 98.- Puntos de restricción y aplicación de cargas	103
Figura 99.-Cargas en frenada máxima + lateral	104
Figura 100.- Aplicación de cargas en frenada máxima + lateral	105
Figura 101.- Condiciones de contorno en frenada máxima	106
Figura 102.- Cargas en prueba estática en prensa	107
Figura 103.- Estructura suspensión trasera	108
Figura 104.- Condiciones de contorno en fuerzas para prueba estática en banco	108
Figura 105.- Modelo mallado	109
Figura 106.- Tensión equivalente de Von Mises en frenada máxima. Vista XYZ	110
Figura 107.- Tensión equivalente de Von Mises en frenada máxima. Vista XY	110
Figura 108.- Tensión equivalente de Von Mises en frenada máxima. Vista XZ	111
Figura 109.- Tensión equivalente de Von Mises en frenada máxima. Vista YZ	111
Figura 110.- Punto de concentración de tensiones en frenada máxima	112
Figura 111.- Tensión máxima sobre chasis externo en frenada máxima	113
Figura 112.- Tensión máxima sobre chasis interior en frenada máxima	114
Figura 113.- Desplazamiento en frenada máxima (en gris indeformada, en verde deformada)	115
Figura 114.- Desplazamiento en frenada máxima. Vista XYZ	116
Figura 115.- Desplazamiento en frenada en el eje X. Vista XY	116
Figura 116.- Desplazamiento en frenada en el eje Y. Vista YZ	117
Figura 117.- Desplazamiento en frenada en el eje Z. Vista YZ	117
Figura 118.- Tensión equivalente de Von Mises en prueba estática. Vista XYZ	118
Figura 119.- Tensión equivalente de Von Mises en prueba estática. Vista XY	118
Figura 120.- Tensión equivalente de Von Mises en prueba estática. Vista XZ	119
Figura 121.- Tensión equivalente de Von Mises en prueba estática. Vista YZ	119
Figura 122.- Punto de máxima tensión en prueba estática	120
Figura 123.- Tensiones máxima sobre chasis externo en prueba estática. a) Soporte de rótula de chasis. b) Unión cuna inferior	121
Figura 125.- Tensiones sobre subchasis en prueba estática	122
Figura 126.- Desplazamiento en prueba estática (en gris indeformada, en verde deformada)	122
Figura 127.- Desplazamiento en prueba estática. Vista XYZ	123



Figura 128.- Desplazamiento en prueba estática en el eje X. Vista XY	123
Figura 129.- Desplazamiento en prueba estática en el eje Y. Vista YZ	124
Figura 130.- Desplazamiento en prensa estática en el eje Z. Vista YZ	124
Figura 131.- Solicitación de balancín delantero	125
Figura 132.- a) Tensiones en balancín b) Detalle de máxima tensión	126
Figura 133.- Desplazamientos en balancín. Gris indeformada, en color deformada	127
Figura 134.- Solicitación en subchasis por influencia del piloto	128
Figura 135.- Tensiones de Von Mises en subchasis debido a piloto	128
Figura 136.- Desplazamientos en subchasis debido a piloto	129
Figura 137.- Tensiones de Von Mises en subchasis con refuerzo debido a piloto	129
Figura 138.- Desplazamientos en subchasis con refuerzo debido a piloto	130
Figura 139.- Optimización de tamaño	132
Figura 140.- Optimización de forma.....	132
Figura 141.- Optimización topológica	133
Figura 142.- Modelo inicial de soporte de rótula de chasis	135
Figura 143.- Modelo optimizado de soporte de rótula de chasis	136
Figura 144.- Soporte de rótula de chasis optimizada modelada	136
Figura 145.- Portapinzas inicial	137
Figura 146.- Solicitación portapinzas	138
Figura 147.- Portapinzas optimizado	138
Figura 148.- Portapinzas optimizado modelado	139



Lista de Tablas

Página

Tabla 1.- Niveles a superar en la competición	16
Tabla 2.- Densidades energéticas de los combustibles	34
Tabla 3.- Propiedades de materiales usados en la fabricación de chasis	55
Tabla 4.- Parámetros básicos de la geometría	73
Tabla 5.- Tabla de propiedades de materiales. Aluminios	75
Tabla 6.- Aptitud a la soldabilidad de Aluminios 6063 y 6082	75
Tabla 7.- Características técnicas del motor	80
Tabla 8.- Tabla-resumen de análisis	131

1. Introducción

La motocicleta objeto de estudio tiene como fin participar en la competición denominada MotoStudent en la que participan universidades de todo el mundo.

Dicha prueba está organizada por la Moto Engineering Foundation (MEF) y que en la presente temporada cumple su IV edición, si bien es la tercera vez que la Universidad de Jaén, con la EPS de Jaén a la cabeza está presente con un prototipo. No obstante a diferencia de años anteriores en esta ocasión se desarrolla una motocicleta impulsada mediante un motor eléctrico, cuando en anteriores se impulsaba mediante un motor de combustión interna.

Así pues al reto en sí que supone un proyecto de estas características, se le añade un plus de dificultad al emplear una motorización que, si bien es conocida desde hace tiempo, es ahora cuando está empezando a tomar valor como una manera alternativa de locomoción mucho más eficiente y respetuosa con el medio ambiente que el motor de combustión interna alimentado por combustibles fósiles.

En ese marco se desarrolla este estudio en el que se diseñará mediante programas CAD y se analizará mediante software informático basado en elementos finitos (MEF por sus siglas en inglés) el desempeño de la parte estructural (chasis) de dicha motocicleta para tratar de conseguir un diseño óptimo para su posterior fabricación y uso.

2. Objetivo

El diseño y desarrollo del prototipo de motocicleta de competición eléctrica recae sobre los integrantes del equipo de la EPS de Jaén (EPS-JAEN UJA TEAM) que utilizando todos los recursos a su alcance, y ateniéndose a unas normas establecidas por la organización, deberá presentarse a fin de poder superar con éxito todos los tests y pruebas a lo largo de la IV Competición Internacional MotoStudent en su versión eléctrica.

El objetivo de este trabajo será el de diseñar y simular mediante software basado en elementos finitos el comportamiento de los elementos estructurales de



chasis de la motocicleta (previamente modelado en programas CAD) aplicando sobre este diversas cargas de trabajo atendiendo a su desempeño real.

Del mismo modo se realizará el análisis de tensiones y deformaciones con el fin de determinar la geometría y el diseño óptimo de dicha estructura conforme al reglamento descrito por la organización y con la menores masas e inercias posibles.

Las conclusiones y la propuesta de diseño optimizado serán presentadas con el fin de llevar a cabo su aplicación y fabricación sobre el prototipo final.

Los programas informáticos utilizados para esta labor han sido:

- Solidworks 2015[®]
- Abaqus 6.14[®]

3. Alcance

El alcance de este trabajo comprende el diseño y la simulación y análisis de la estructura de una motocicleta de competición que será realizada como prototipo participante en la IV Competición Internacional MotoStudent en su categoría “MotoStudent Electric” organizada por la Moto Engineering Foundation (MEF) que tendrá lugar en las instalaciones de MotorLand Aragón (España) durante los días 5-9 de Octubre de 2016.

4. Motivación

Desde la edición de MotoStudent 2011/2012 (II Competición Internacional MotoStudent) la EPS de Jaén representada por el equipo EPS-JAEN UJA TEAM ha venido participando con diversos prototipos consiguiendo no sólo buenos resultados finales en las diferentes pruebas, sino también un gran reconocimiento a la labor de sus integrantes que han demostrado la capacidad de trabajo y organización necesaria para desarrollar un proyecto a la altura de otras universidades de renombre. Destacando siempre en el terreno de la innovación y el diseño, este año el reto es doble al tener que proyectar un prototipo impulsado por un motor eléctrico.



Figura 1.-Equipo EPS-JAEN UJA TEAM con la motocicleta participante en II edición MotoStudent ¹



Figura 2.- Equipo EPS-JAEN UJA TEAM con la motocicleta participante en III edición MotoStudent ²

Siendo este proyecto ya todo un referente en nuestra universidad, para los que cursamos alguna rama de ingeniería es una magnífica ocasión para participar de este ambiente competitivo tan cercano a una experiencia profesional y lograr en equipo conseguir construir un prototipo que logre un resultado igual o mejor a los anteriores.

¹ <http://eps.ujaen.es/noticias> - Octubre 2012

² <http://eps.ujaen.es/noticias> - Octubre 2014



Es por ello que para mí es un honor y un desafío hacerme cargo de la labor de análisis y optimización del chasis, y de esta manera aportar mi grano de arena con todo lo aprendido a lo largo de estos años en EPS de Jaén.

5. Antecedentes

El fin último de la competición es la construcción de una motocicleta, lo que incluye desde la fase inicial de proyección y diseño de arquitectura de chasis, sistemas mecánicos (transmisión, relaciones de velocidades, sistemas de frenado...), y sistemas eléctricos y electrónicos hasta la fabricación, ensamblaje, y en una última etapa, puesta en marcha de dicha motocicleta para su participación en la Categoría “MotoStudent Electric” de la IV edición de este certamen.



Figura 3.- Cartel IV Competición Internacional MotoStudent ³

Al estar el proyecto englobado en una categoría dentro de una competición regulada, se expondrá en lo sucesivo los aspectos a evaluar, reglamentación, normativa y restricciones impuestas por la organización y de obligado cumplimiento para todo equipo participante.

³ <http://www.motostudent.com/> - 2015/2016



Igualmente se hace una breve introducción histórica haciendo un repaso a los distintos tipos de motocicletas eléctricas (centrando la atención en su estructura y geometría) que se pueden encontrar en el mercado y que son también empleadas en competición.

5.1. Objeto de la competición

La Competición Internacional MotoStudent, promovida por la Fundación Moto Engineering Foundation y TechnoPark Motorland, es un desafío entre equipos de diferentes universidades de todo el mundo que consiste en diseñar y desarrollar un prototipo de moto de competición que será evaluado en un evento final que tendrá lugar en las instalaciones de MotorLand Aragón.

La competición en sí misma representa un desafío para los estudiantes, donde tendrán que poner a prueba su creatividad y sus habilidades para innovar, aplicando directamente sus capacidades como futuros ingenieros o técnicos especializados contra otros equipos de todo el mundo durante un periodo de tres semestres.

MotoStudent permite a los equipos la máxima flexibilidad para diseñar, con muy pocas restricciones en la “toma de decisión” del diseño general de la moto, por lo que los vehículos o proyectos que participan en la competición deberán cumplir con un mínimo de requerimientos de seguridad y dimensiones en las áreas designadas.

El desafío para los equipos es desarrollar una moto que sea capaz de pasar con éxito todos los tests y pruebas a lo largo de la Competición MotoStudent.

5.2. Fases de la competición

Tanto las motos como los proyectos industriales serán juzgados y evaluados en una serie de pruebas, divididas en dos fases, denominadas MS1 y MS2.

Los distintos niveles a los que serán sometidos los proyectos vienen reflejados en la siguiente tabla:



FASE	EXCLUYENTE	PUNTUABLE
Hitos previos al evento	Sí	-
Verificaciones técnicas previas	Sí	-
MS1	Sí	No
MS2	Sí	Sí

Tabla 1.- Niveles a superar en la competición ⁴

Todos los equipos participantes, para poder ser evaluados en cada una de las fases, deberán haber superado el nivel mínimo exigido en cada una de las fases anteriores a la que se está juzgando en cada momento

Los hitos y entregas de documentación previos al evento no son puntuables pero tendrán influencia directa sobre la puntuación general de la Fase MS1, pudiendo conllevar penalizaciones por el no cumplimiento o entrega de los mismos.

Para que las motos y proyectos puedan participar en la Competición deberán cumplir los requisitos mínimos de resistencia, seguridad y funcionamiento indicados en el Reglamento.

Los equipos que superen las Verificaciones Técnicas en el Evento podrán pasar a competir en las siguientes fases.

5.2.1.Fase MS1: Proyecto industrial

La fase MS1 es una fase demostrativa en la que los equipos participantes deberán mostrar y explicar el diseño del prototipo realizado y el proyecto de industrialización para su producción en serie. Esta fase pretende ser una oportunidad para que los alumnos participantes puedan aplicar los conocimientos adquiridos durante su formación en un proyecto “real”, demostrando los aspectos y dificultades que puede conllevar un proceso de fabricación industrial y el lanzamiento de un producto al mercado.

⁴ Reglamento de la Competición, IV Competición Internacional MotoStudent 2015 – 2016, versión 08.2015



5.2.2. Fase MS2: Pruebas dinámicas y carrera

La fase MS2 consiste en una serie de pruebas planteadas para evaluar el comportamiento dinámico y las prestaciones de la moto fabricada tales como circuito con conos, aceleración y frenada, todo ello a cargo de un piloto asignado por la organización de la competición. También será evaluada la destreza de los equipos en mecánica y organización sometiendo a pruebas

Para poder puntuar en la fase demostrativa MS2 es necesario haber superado la fase MS1 con un mínimo del 40% sobre la puntuación total de dicha fase.

5.3. Reglamentación y normativa

Esta hace referencia prácticamente a todos los elementos de la motocicleta, desde requisitos de diseño hasta dorsales y publicidad, por lo que aquí solo se incluirá lo establecido para el objeto del presente proyecto en lo relativo a chasis y que se puede consultar en el Anexo I

5.3.1. Requisitos generales de diseño

En esta primera parte se hace referencia al diseño de la motocicleta en conjunto, no obstante al ser el chasis una parte fundamental en el diseño final de esta es de vital importancia saber qué restricciones debe de cumplir. Citando el apartado correspondiente de requisitos generales de diseño (Reglamento de la Competición, IV Competición Internacional MotoStudent 2015 – 2016, versión 08.2015) en cuanto a dimensiones y peso se tiene:

“ B.2.1 Dimensiones

Las dimensiones de la motocicleta son libres exceptuando los requisitos básicos expuestos a continuación.

B.2.1.1 La anchura mínima entre los extremos de los semimanillares debe ser de 450mm (Ver figura 4).

B.2.1.2 El ángulo mínimo de inclinación lateral de la motocicleta sin que ningún elemento de la misma (exceptuando los neumáticos) toque el pavimento debe ser



50°. Dicha medición se realizará con la motocicleta descargada (es decir, sin piloto) pero con todo el equipamiento y líquidos para su funcionamiento (Ver figura 5).

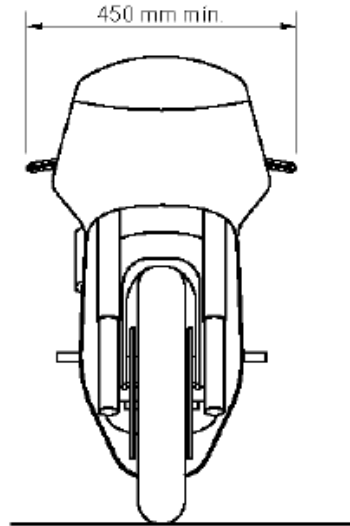


Figura 4.- Anchura máxima de la motocicleta ⁵

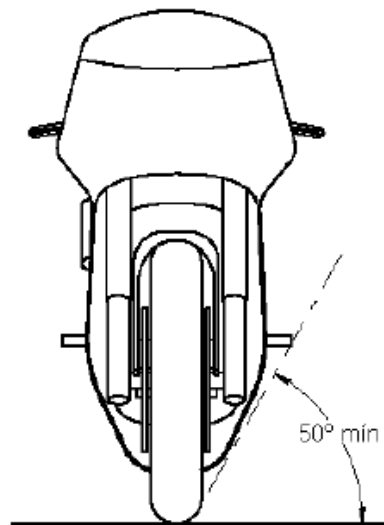


Figura 5.- Ángulo de inclinación lateral ⁶

B.2.1.3 La distancia libre al pavimento con la motocicleta en posición vertical ha de ser de un mínimo de 100mm en cualquier situación de compresión de suspensiones o reglajes de geometrías.

⁵ Reglamento de la Competición, IV Competición Internacional MotoStudent 2015 – 2016, versión 08.2015

⁶ Reglamento de la Competición, IV Competición Internacional MotoStudent 2015 – 2016, versión 08.2015

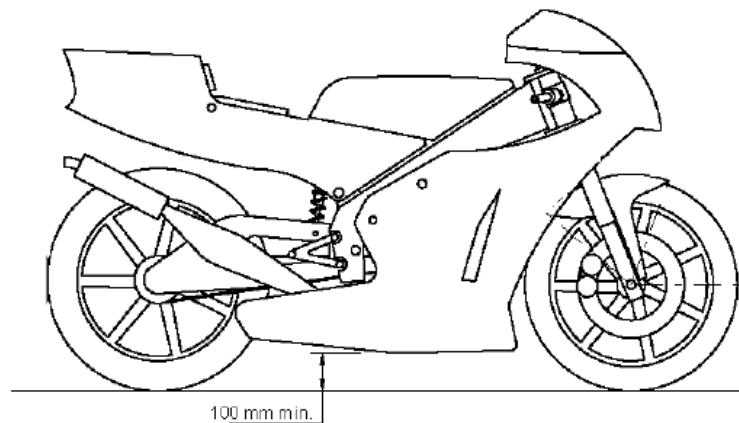


Figura 6.- Mínima altura libre al suelo ⁷

B.2.1.6 Los neumáticos deberán tener una distancia mínima de 15mm a cualquier elemento de la motocicleta, exceptuando las llantas, en toda posición de la misma y para cualquier reglaje de geometría.

B.2.1.8 La anchura máxima del carenado será de 600mm.

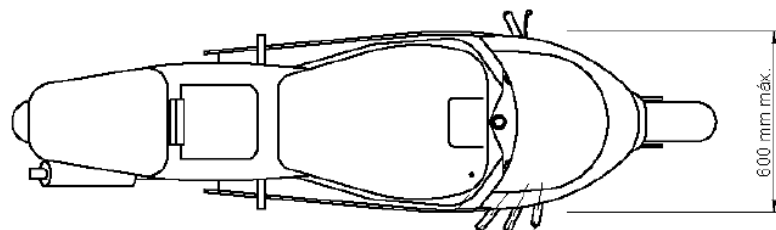


Figura 7.- Anchura máxima del carenado ⁸

B.2.2 Peso

B.2.2.1 El peso mínimo total de la motocicleta sin piloto será de 95 Kg para ambas categorías, incluyendo todos los líquidos que pudieran ser necesarios para el funcionamiento de la moto.

B.2.2.5 El uso de lastre tanto móvil como fijo está permitido para alcanzar el peso mínimo. Dicho lastre debe ser declarado a los comisarios técnicos durante las verificaciones previas.

⁷ Reglamento de la Competición, IV Competición Internacional MotoStudent 2015 – 2016, versión 08.2015

⁸ Reglamento de la Competición, IV Competición Internacional MotoStudent 2015 – 2016, versión 08.2015



B.2.2.6 El lastre móvil deberá ir correctamente sujeto al chasis, de forma que no pueda desprenderse del conjunto en caso de choque o caída. Puede ser instalado mediante bridas o atornillado. “

5.3.2. Reglamento Técnico General, Chasis

Atendiendo al artículo 3 referente a chasis propiamente se obtiene lo siguiente:

“B.3.1. Objetivo

No se permite el uso de un chasis comercial ni tan siquiera una unidad modificada. Deberá tratarse de un chasis prototipo novedoso de fabricación propia.

Se engloba en este artículo el chasis principal, el subchasis y el basculante.

B.3.1.1 No hay limitaciones en el tipo de diseño de chasis, basculante o subchasis, siempre y cuando el resultado cumpla con la normativa impuesta en el presente Reglamento.

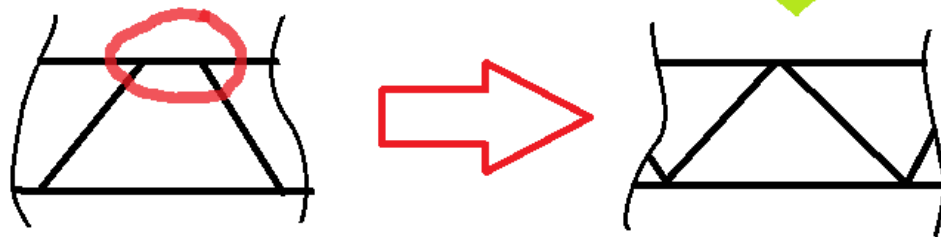
B.3.2 Materiales

No está permitido fabricar el chasis en titanio ni aleaciones de titanio. Respecto al resto de materiales no se impone ningún tipo de restricción.

B.3.3 Soldaduras y uniones

Está permitida la soldadura de elementos estructurales por cualquier medio, pero deberá resultar una estructura consistente.

B.3.3.1 En las estructuras de tipo celosía se deberá buscar la correcta triangulación en los nodos de la estructura.

Figura 8: Correcta triangulación en celosía⁹

B.3.4 Topes anticaída

B.3.4.1 Es obligatorio el uso de topes de Nylon, fibra o materiales de dureza similar para proteger el chasis y el motor lateralmente en caso de caída.

B.3.4.2 Los topes anticaída podrán situarse tanto en el interior como en el exterior del carenado.”

Figura 9.- Tope anticaída¹⁰

Todo lo anterior será examinado mediante las verificaciones técnicas, consistiendo en una primera etapa de verificaciones estáticas por parte de comisarios técnicos velando porque todos los componentes de la motocicleta estén dentro de la normativa expuesta.

Una segunda etapa de verificaciones en banco de ensayo mediante las cuales la motocicleta se podrá someter a la moto a una serie de fuerzas horizontales y

⁹ Reglamento de la Competición, IV Competición Internacional MotoStudent 2015 – 2016, versión 08.2015

¹⁰ Reglamento de la Competición, IV Competición Internacional MotoStudent 2015 – 2016, versión 08.2015



verticales para comprobar rigidez del chasis, correcto ensamblaje, geometrías y trabajo de suspensiones.

Se aplicarán sobre la moto las siguientes fuerzas:

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

Estas cargas se aplicarán sucesivamente dos veces consecutivas y se verificará que la medida es repetitiva en cuanto a deformación con un error entre medidas inferior a un 10% y que no aparece ningún tipo de fallo o fisura en los componentes estructurales o elementos de unión (artículo E.3.3. del Reglamento de la Competición, IV Competición Internacional MotoStudent 2015 – 2016, versión 08.2015).

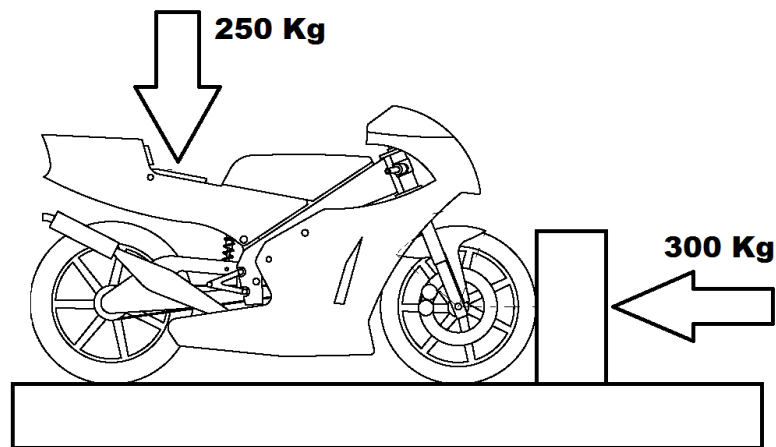


Figura 10.- Verificación estructural en banco de ensayo ¹¹

Finalmente se realiza una verificación dinámica en pista en la que un piloto probador se cerciorará de que la motocicleta inicia la marcha y avanza por sus propios medios, frena correctamente y es capaz de realizar una serie de giros a distintas velocidades.

¹¹ Reglamento de la Competición, IV Competición Internacional MotoStudent 2015 – 2016, versión 08.2015



6. Historia Y Evolución De La Motocicleta

Se hace a continuación un breve repaso por la historia de este vehículo, diferenciando entre el tipo de propulsor. Puesto que el más extendido es el de combustión interna, la gran parte de este apartado se dedica a él para ver su evolución a lo largo del tiempo. No obstante cabe considerar que ya desde los primeros tiempos hubo modelos eléctricos y que el que uno fuera más desarrollado que otro al final fue una cuestión casi fortuita. Es por ello que también se dedica un apartado a estos primeros modelos movidos por electricidad, que como se verá en su estructura no difieren mucho de los convencionales, así como un breve repaso a los modelos de competición.

6.1. La motocicleta de combustión interna

Se puede considerar la motocicleta moderna como una descendiente directa de la bicicleta que ya en el siglo XIX contaba con dos ruedas de igual tamaño y cuya tracción era proporcionada por un mecanismo de pedales a la rueda trasera. Con la llegada de la revolución industrial el paso lógico de estas bicicletas era dotarlas de motor, naciendo así las primeras motocicletas que llegan hasta hoy día como un medio de transporte que se ha ido adaptando a las necesidades que la sociedad de cada época demandaba de ellas, evolucionando a su vez conforme lo hacía la tecnología.

Al ser un derivado de bicicleta, los primeros modelos no fueron sino estos vehículos en todas sus versiones a las que se les acoplaba un motor. Así en el año 1868 surgía en París este primer híbrido sobre la base de un velocípedo (bicicleta con una rueda delantera grande en la que se encontraban los pedales y una pequeña trasera) a la que se le añadía un motor de vapor, obra de *Michaux-Perreaux* (ver figura 11).

Esta idea se fue extendiendo y unas décadas después aparecían modelos similares en Norte América.

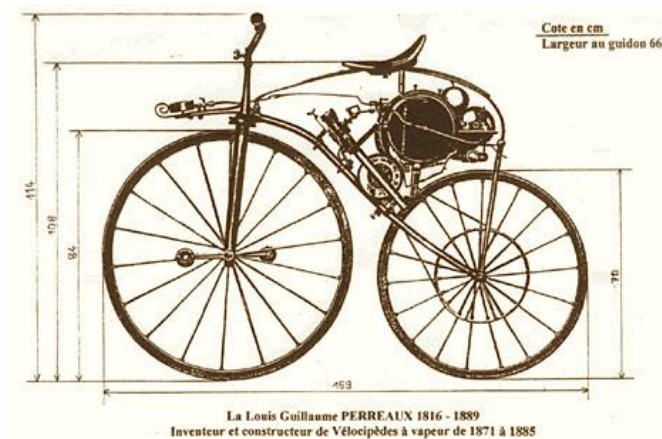


Figura 11.- Velocípedo con motor de vapor de *Michaux-Perreaux* de 1868 ¹²

No obstante la primera aproximación real no llegó hasta el año 1884, en el que se exhibió en Londres un prototipo de triciclo diseñado por *Edward Butler* y fabricado años más tarde, contando con un motor boxer de dos cilindros y y cuatro tiempos de 600 cc de cilindrada que movían la rueda trasera.

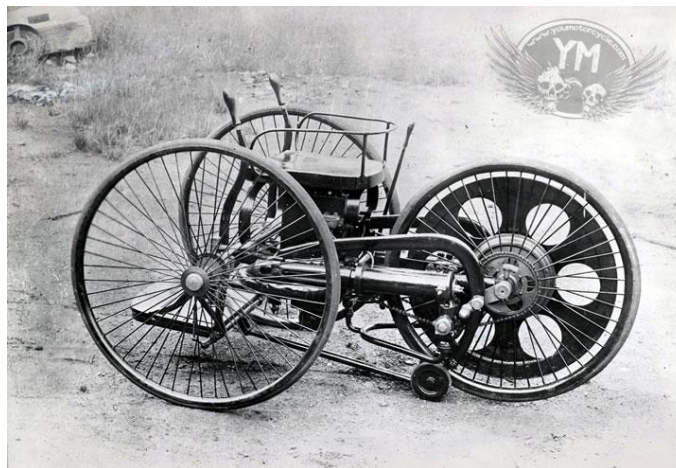


Figura 12: Triciclo "*Butler Petrol Cycle*" de 1884 ¹³

Sin embargo no encontró el apoyo comercial necesario para sacar el proyecto adelante.

En la misma época y paralelamente al desarrollo del automóvil, en Alemania los ingenieros *Gottlieb Daimler* y *Wilhelm Maybach* utilizaban otro motor de combustión interna para animar lo que llamaron la *Reitwagen*, un prototipo que,

¹² "Steam Cycles and History", blog "The Vintagent":
<http://thevintagent.blogspot.com.es/2011/04/steam-cycles-and-history.html>

¹³ "A Visual History of Motorcycle Design", web "You Motorcycle" <http://www.youmotorcycle.com/a-visual-history-of-motorcycle-design.html>



aunque tenía una peculiar disposición de la horquilla con cero grados de inclinación, disponía de dos ruedas iguales a la misma altura, siendo la trasera la encargada de la propulsión. Esta estructura, unida al motor de un cilindro y cuatro tiempos entregando 0,5 cv con un cubicaje de 264 cc y que describe un ciclo *Otto*, hacen que esta sea la pionera de las que conocemos en la actualidad, por lo que se suele afirmar que es el padre de todas las motocicletas.



Figura 13.- *Reitwagen* de Daimler-Maybach de 1885 ¹⁴

Quedaba claro que era el diseño a seguir y la evolución del motor de combustión interna propició que surgieran numerosas compañías aportando sus propios prototipos. Así en 1894 aparecía en Alemania la primera motocicleta llamada como tal y producida en serie, con una tirada de unos cientos de ejemplares contruidos. Se trataba de la *Hildebrand & Wolfmüller* usando un motor de dos cilindros y 1489 cc.



Figura 14.- *Hildebrand & Wolfmüller* de 1894 ¹⁵

¹⁴ Historia de *Gottlieb Daimler*, web "Auto Portal":
http://autoportal.hr/clanak/gottlieb_daimler_1834__1900__uz_benza_najvea_figura_povijesti_automobila



Simultáneamente aparecían en Inglaterra la *Excelsior Motor Company* o la *Orient-Aster* en Estados Unidos en una era en la que la gran mayoría de motocicletas procedían de bicicletas a las que se les acoplaba un motor de combustión.

El inicio de siglo trae consigo el nacimiento de varias marcas llamadas a ser líderes del sector en Inglaterra, tales como *Royal Enfield* que inicia su producción en 1901 (ver figura 15), *Triumph* que fabrica su primera motocicleta en 1902 o *Norton* que inicia su andadura en ese mismo año.

Lo mismo ocurre en América con la aparición de la *Indian Motorcycle Manufacturing Company* en 1901 y *Harley-Davidson* en 1903.

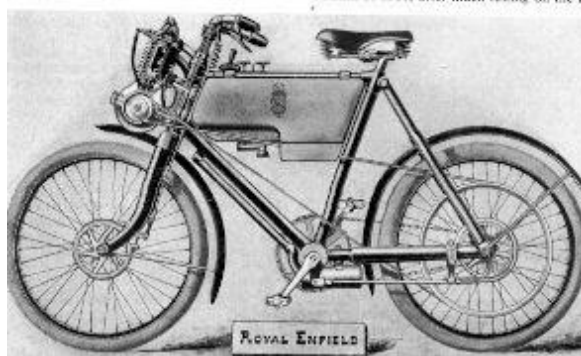


Figura 15.- *Royal Enfield 1901 model* ¹⁵

Son unos años de mucha innovación y desarrollo, gracias a la creciente popularidad de estas máquinas y sobre todo a la aparición de la competición que activaría aún más esa necesidad de avances tecnológicos.

Datos de ventas de la *Indian Single* dan fe de este crecimiento, pasando de fabricar 500 unidades en su primer año hasta las 32000 en 1913. Incluso empiezan a ser incorporadas por cuerpos de seguridad y más tarde, con la irrupción de la primera guerra mundial, usadas en el campo de batalla. No en vano, hubo marcas como *Harley-Davidson* que dedicaron gran parte de su fabricación a este fin.

¹⁵ “Hildebrand and Wolfmüller Steam Motorcycle”, web “Cars enc globe”

<http://carsenglobe.com/page/hildebrand-and-wolfmuller-steam-motorcycle/default.html>

¹⁶ Blog “My Royal Enfields”: http://myroyalenfields.blogspot.com.es/2009_09_01_archive.html



Figura 16.- *Indian Single 1901* ¹⁷

De entre ellas destacó la *Triumph Type H* que, equipada con un motor de un cilindro de cuatro tiempos refrigerado por aire y con un cubicaje de 499cc, fue fabricada en un número superior a las 30.000 unidades para las fuerzas aliadas. Tal fue su desarrollo durante estos años, que el modelo de 1915 ya contaba con un motor de 550cc de válvulas laterales con caja de 3 velocidades y transmisión por correa. Además prescindía de los pedales, por lo que se consideraba una motocicleta por derecho propio.



Figura 17.- *Triumph Type H* de 1915 ¹⁸

Después de la guerra se produjo otro crecimiento exponencial, y si bien en los años 20 *Harley-Davidson* dominaba el mercado mundial con ventas en 67 países, pronto se vería superada por la *DKW* alemana.

¹⁷ Web “*The rider newsletter*”: http://theridernewsletter.org/wp-content/uploads/2012/11/122_1012_02_o+1901_indian_f_head_camel_back+.jpg

¹⁸ Catálogo *Triumph*, web “*Bric a brac sur la toile 76*”
<http://www.bricabracsurlatoile76.com/triumph.php>



En esta época hacía aparición *BMW* obligada a diversificar su producción después de ser un exitoso constructor de motores de aviación durante la guerra. Lo hace con motores tipo bóxer de dos cilindros y aluminio, siendo su primer modelo la *BMW R32* de 1923 que desarrollaba 8,5 cv de potencia y capaz de alcanzar los 95 km/h (ver figura 18).



Figura 18.- *BMW R32* de 1923 ¹⁹

En los años 30 se siguen superando los números de ventas año tras año, llegando a ser en Gran Bretaña el número de fabricantes diferentes de hasta 80, doblando las cifras actuales.

Se rompen records de velocidad en tierra como el alcanzado por *Joe Petrali* a lomos de una *Harley-Davidson* con un motor de 1000 cc alcanzando la cifra de 219,165 km/h en 1937.



Figura 19.- Record de velocidad de *Harley-Davidson* en 1937 ²⁰

La década siguiente se incrementaría aún más la producción de motocicletas, si bien la razón no era otra que la de surtir a las fuerzas aliadas con estos vehículos que se convirtieron en herramienta militar.

¹⁹ Web "*BMW Motorcycle Magazine*": <http://bmwmcmag.com/2011/05/rare-1925-bmw-r32-sells-for-139000/>

²⁰ Web "*Bikernet*": http://www.bikernet.com/pages/April_26_2007_Part_3.aspx



Una vez pasado el periodo bélico, la figura de la motocicleta se empezó a alzar como un símbolo social que aunaba practicidad y diseño, naciendo en estos años iconos como la Piaggio Vespa en Italia en 1946.



Figura 20.- Piaggio Vespa de 1946 ²¹

Contaba con suspensión trasera rígida y pequeñas ruedas, siendo la trasera movida por un motor horizontal de dos cilindros de 98 cc refrigerado por aire. Con ella se creaba un nuevo concepto de motocicleta, la scooter.

En la década de los cincuenta se empieza a vivir una época de bonanza económica, y fabricantes de todo el mundo pugnan por ser la primera potencia mundial en la fabricación de motocicletas. El grupo británico BSA que aglutina entre otras marcas a *Norton* y *Triumph* dominará el mercado hasta que es desbancada a mediados de la década por la alemana NSU, un fabricante que resurge de sus cenizas tras quedar la Alemania nazi desbastada tras la guerra. Su punta de lanza es la NSU Max, una motocicleta que aparece en 1953 con un chasis monobloque de acero prensado y suspensión trasera central animada con un motor de 250 cc. La marca también se interesa por los records de velocidad y consigue superar la barrera de las 200 millas por hora (320 km/h) (ver figura 21).

Sin embargo, poco duraría el dominio de las marcas europeas cuando en los años 60 irrumpen en el mercado los fabricantes japoneses *Suzuki*, *Kawasaki* y *Yamaha*, con *Honda* a la cabeza. Estos cambiarían para siempre el mercado, ya que conseguían fabricar más rápido, más barato y con mejor calidad que la competencia.

²¹ "Vespa History", blog "Up Town Scooters": <http://www.oocities.org/uptownscooters/history.htm>



Figura 21.- NSU Max de 1953 ²²

Y aunque las marcas británicas seguían fabricando modelos exitosos como la *Triumph Boneville* que salió al mercado en 1959 para convertirse en la mejor moto disponible con un motor de dos cilindros en línea transversales de 649 cc, la realidad es que fueron los nipones los que convirtieron a la motocicleta en una herramienta de disfrute personal más que de trabajo.



Figura 22.- Triumph Boneville de 1959 ²³

Paralelamente a este auge aparecen cada vez con más fuerza diferentes competiciones de motociclismo. Si bien estas existen casi desde el mismo momento en que se inventa la moto, es ahora cuando se profesionaliza y regula con la aparición de la Federación Internacional de Motociclismo (FIM).

La competición es un excelente campo de desarrollo de nuevas tecnologías que se aplican a modelos de calle, ocurriendo en estos años importantes avances. Por ejemplo *Honda* desarrolla su sistema de árbol de levas en cabeza (SOHC por sus siglas en inglés) y bloque motor de cuatro cilindros transversales, aumentando la

²² NSU MAX espec., web "World Encyclopedia of Cars": <http://only-carz.com/gallery/nsu-max.html>

²³ Web "Biker Raffle": <http://harleydavidsonraffles.com/win-a-pair-of-triump-bonnevilles/>



potencia de los motores producidos hasta la fecha. Lo monta la CB750 en 1969 con un cubicaje de 736 cc y 68 cv de potencia y se convierte en un éxito inmediato.



Figura 23.- Honda CB750 de 1969 ²⁴

Kawasaki contraataca años mas tarde con la Z900, una moto con una disposición similar a la Honda pero de mayor potencia (81 cv) y cubicaje (903 cc), iniciando la guerra en un nuevo segmento, las *super bikes*.



Figura 24.- Kawasaki Z900 de 1972 ²⁵

En Europa, el dominio de las motocicletas japonesas en los años setenta resultan todo un mazazo para las marcas locales, que ven como se reducen sus ventas y se ven obligadas a reinventarse o a echar el cierre a sus fábricas. Así BMW en Alemania intenta reconquistar el mercado con el lanzamiento de las series 5, que

²⁴ "Historia de la Honda CB750", web "Daily Motos" <http://www.dailymotos.com/historia-de-la-honda-cb-750-original-la-primera-superbike/>

²⁵ Especificaciones Kawasaki Z900, web "Motorcycle Specs": http://www.motorcyclespecs.co.za/model/kawasaki/kawasaki_z1%2072.htm



destacan por incorporar encendido eléctrico, amortiguadores delanteros telescópicos y disponibles con una cilindrada de 500, 600 ó 750 cc.



Figura 25.- BMW R50/5 de 1970 ²⁶

En Estados Unidos la situación no era muy diferente y la marca Norteamericana por excelencia, *Harley-Davidson* sobrevive a duras penas gracias a la lealtad del mercado local, manteniendo los motores de doble cilindro en V a 45° como su seña de identidad.

En contraposición, en el resto del mundo se empiezan a popularizar cada vez más los pequeños motores de dos tiempos desarrollados en la Alemania del Este y puestos a disposición del mercado por *Suzuki*.

En estos años, y gracias a los avances en competición aparecen en las motos de serie características como el carenado completo portado por la BMW R100RS de 1977.



Figura 26.- BMW R100RS de 1977 ²⁷

²⁶ Especificaciones BMW R505, web "Stephen Bottcher":
<http://www.stephenbottcher.net/BMW/BMWR505.htm>



Aún con todo, las marcas japonesas siguen dominando el mercado hoy en día, si bien es cierto que actualmente se pueden encontrar diversos segmentos dependiendo del uso al que esté destinada la motocicleta y dentro de cada uno de ellos hay marcas con mayor o menor representación.

Así por ejemplo en la categoría de deportivas las japonesas encuentra duros rivales en marcas italianas como *Ducati* o *Aprilia*, mientras que en las turismo BMW son la referencia, sin dejar de lado otros mercados donde las británicas y otras marcas emergentes también tienen su hueco.

Y echando un vistazo a donde ha llegado el desarrollo de la motocicleta en todo este tiempo podemos dirigir la mirada a una de las más avanzadas del 2015, como es la *Kawasaki H2R* que incorpora un motor de 4 cilindros de 998 cc en línea con doble árbol en cabeza y supercompresor capaz de alcanzar los 340km/h desarrollando 310 caballos de potencia montado sobre un chasis *trellis* de acero y carbono.



Figura 27.- Kawasaki H2R de 2015 ²⁸

²⁷ Especificaciones BMW R100RS, web "Motorcycle Specs":
http://www.motorcyclespecs.co.za/model/bmw/bmw_r100rs%2076.htm

²⁸ Web oficial Kawasaki Europa: <http://storage.kawasaki.eu>



En el siglo XXI la motocicleta en todas sus variantes forma parte del paisaje urbano de muchas ciudades que, congestionadas en mayor o menor medida por el tráfico, ven en este pequeño vehículo un medio de transporte ideal. Es por ello que se están buscando alternativas mas eficientes al propulsor de combustión interna que generalmente anima estas máquinas, encontrando en los motores eléctricos una opción viable y prometedora.

6.2. La motocicleta eléctrica

La electricidad se está postulando como el “combustible” del futuro, puesto que es una tecnología que es de sobra conocida, probada, fiable y cuya obtención puede ser sostenible energéticamente hablando si proviene de fuentes renovables. El inconveniente principal reside en su almacenamiento y recarga, ya que para hacer funcionar un motor de este tipo con similares características a uno de combustión interna se necesita almacenar la electricidad en unas baterías que a día de hoy tienen una densidad energética mucho menor que los combustibles fósiles como la gasolina o el gasóleo, limitando mucho su autonomía e incrementando el peso del vehículo.

Combustible	Densidad energética (kWh/kg)
Gasolina	12,22
Gasóleo	12,70
Batería litio-manganeso	0.12

Tabla 2.- Densidades energéticas de los combustibles ²⁹

No obstante el cambio ya está en marcha y son muchas las compañías que han empezado a investigar cómo solventar estos problemas.

Pero echando la vista atrás, se comprueba que este concepto no es nuevo, y ya desde los albores de la motocicleta hubo prototipos con esta forma de locomoción. De hecho hay fechada una patente en 1895 en Ohio (EEUU).

²⁹ Datos de la *Battery University*: <http://batteryuniversity.com/>

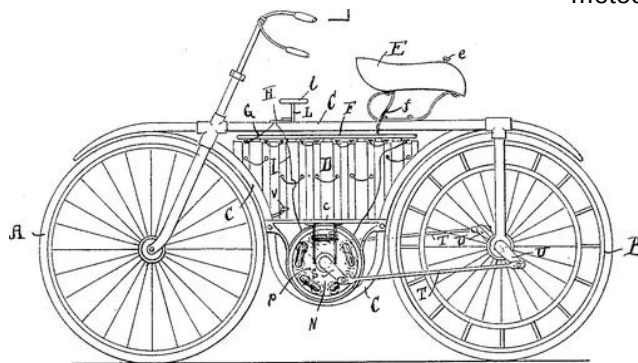


Figura 28.- Patente de motocicleta eléctrica de 1895 ³⁰

Su funcionamiento básico es sencillo y casi igual que el de los prototipos actuales, con un paquete de baterías alimentando un motor que transmite su movimiento a través de una cadena a la rueda trasera. Y lo que más llama la atención es que ya en 1911 las motos que habían de este tipo declaraban autonomías de 75 a 100 millas por recarga (120 a 160km) usando baterías de seis celdas y 12v ³¹.

No obstante eran años donde los motores de combustión interna ya se habían popularizado, y sólo periodos de racionamiento de combustible como en los años de acontecimientos bélicos dieron un cierto empujón a estos vehículos. Tal es el caso de la *Socovel* de 1936 originaria de Bélgica.



Figura 29.- Socovel de 1936 ³²

³⁰ "Electric Bike History", web "Electric bicycle guide": <http://www.electric-bicycle-guide.com/electric-bicycle-history.html>

³¹ Revista *Popular Mechanics*, Octubre 1911

³² "Socovel review", web "Visfor Voltage": <http://visforvoltage.org/forum/11775-socovel-electric-bike-review-1936>



En los años siguientes el refloreCIMIENTO industrial volvió a dejar de lado estos vehículos, si bien se siguieron construyendo prototipos con tecnología más moderna y optimizada, como el fabricado por *Mike Corbin* que logró establecer un record de velocidad de 266 km/h en 1975. Tal éxito le animó a fabricar algunos modelos para la venta al público, como es el caso de la *Corbin Electric City Bike*.



Figura 30.- *Corbin Electric City Bike* de 1975 ³³

Similares aproximaciones fueron realizadas por diversas compañías, desarrollando prototipos muy prometedores pero que se quedaban sin fabricar o lo hacían en muy pequeña escala. Hasta que llegó la década de los noventa y *Peugeot*, una empresa fuerte en el mundo de la automoción decidió apostar por ella. Así veía la luz en 1996 la *Peugeot Scoot'Elec*, la primera motocicleta eléctrica de producción en forma de scooter con un motor de 2,8 kW de corriente continua con baterías de níquel-cadmio de 18V y 100 Ah. Con un peso de 115 kg era capaz de cubrir 40 km con una sola carga a una velocidad nominal de 45 km/h.



Figura 31.- *Peugeot Scoot'Elec* de 1996 ³⁴

³³ Blog *Wheels* del *New York Times*: <http://wheels.blogs.nytimes.com/2010/05/11/>

³⁴ Web "*Heeg e auto*": www.heeg-e-auto.de/



Sin embargo no tuvo el éxito esperado y no ha sido hasta bien entrado el siglo XXI y, en otro contexto de crisis económica y energética cuando ese primer intento ha tenido continuidad. De esta manera son varias las marcas que están incluyendo este tipo de motocicletas en sus catálogos, como la estadounidense *Zero Motorcycles* que sólo fabrica este tipo de motocicletas. Actualmente posee hasta seis modelos diferentes en el mercado, siendo la moto más avanzada la SR, que cuenta con un motor capaz de desarrollar 50kW de potencia durante 317 km por ciudad con una sólo carga de batería de iones de litio.

Otras marcas con representación en el mercado son BMW en el segmento de las scooters o *Vectrix*.



Figura 32.- Zero Rs de 2014 ³⁵

6.3. Competición

Si hay algo que ha impulsado el desarrollo de las motocicletas en cualquiera de sus vertientes, eso ha sido la competición. Y es que el afán de victoria siempre lleva a sus competidores a intentar ir un paso por delante del resto, utilizando la más alta tecnología e invirtiendo tiempo y dinero en desarrollar e innovar. Avances que en su mayoría son trasladados al mercado, consiguiendo con ello vehículos más capaces y mejores.

³⁵ Artículo en blog *E Comento*: <http://ecomento.com/>



Por este motivo, casi desde la invención de la motocicleta han surgido numerosas disciplinas, desde carreras en asfalto hasta fuera de él, pasando por circuitos, ascensión de montañas, sobre pistas de hielo o aceleraciones en líneas rectas.

Pero si hay alguna categoría que destaque sobre las demás es el Campeonato del Mundo de Motociclismo. Un campeonato que se corre generalmente en circuitos cerrados de asfalto con motocicletas creadas especialmente para tales localizaciones, no estando permitido su uso fuera de ellas.

Desde su creación por la FIM en 1949 siempre ha habido diferentes categorías con el fin de fomentar la competitividad. Así se pueden enumerar desde motocicletas de 50 cc hasta los 1000 cc de hoy en día que cubren las de la categoría MotoGP. Las dos categorías restantes que configuran el campeonato actual son Moto 2 con 600 cc y Moto 3 con 250 cc, todas ellas de cuatro tiempos.

De este modo una motocicleta de la categoría MotoGP se puede considerar como el techo tecnológico del momento. Y atendiendo a las especificaciones de la última ganadora, la *Yamaha YZR-M1* de 2015, se entiende el por qué. El motor es un 4 cilindros en V, con 4 válvulas por cilindro y doble árbol, inyección de gasolina atmosférica, con cárter húmedo, una potencia de 240 cv que llega hasta las 18.000 rpm y con una relación peso/potencia de tan sólo 1,51 cv/kg. Todo ello capaz de catapultar al piloto a más de 350 km/h.



Figura 33.- Yamaha YZR-M1 ³⁶

³⁶ Especificaciones Yamaha YZR-M1, web *Motorbike Mag*: <https://www.motorbikemag.es>



Otras categorías que gozan de popularidad son las basadas en motocicletas de serie pero preparadas para competir, como los mundiales de *Superbikes* o las que se corren en carreteras públicas cerradas al tráfico como el TT de la Isla de Man.

Precisamente en esta última se está desarrollando paralelamente una competición para motocicletas eléctricas que se está perfilando como una de las referencias en este campo. La edición de 2015 fue ganada por la *Shinden Yon*, una máquina de 250 kg de peso, y dotada con un motor *brushless* trifásico refrigerado por aceite que entrega 110 kW con una batería laminada de ion-Litio de 370V y capaz de cubrir los 60 km del recorrido a una media de velocidad de 211.677km/h.



Figura 34.- *Shinden Yon* de 2015 ³⁷

7. El Chasis

Cualquier motocicleta se puede descomponer en dos subestructuras fundamentales: la parte motor y el chasis. De esta manera, se puede referir al chasis como el formado por todo lo que no es motor, es decir, bastidor suspendido, suspensiones, ruedas, frenos y demás elementos que complementan a estos. No obstante, a veces se refiere como chasis sólo al bastidor excluyendo todos los demás elementos, ya que en las primeras motocicletas estos eran menores y bastidor y chasis prácticamente eran la misma entidad. Como tercer elemento, se podría considerar la carrocería, que dependiendo del segmento podrá tener mayor o menor presencia en el global del vehículo.

³⁷ Artículo sobre la *Shinden Yon*, blog *Column*: <http://columnm.com/team-mugen-confirms-2015-isle-of-man-tt-entry-4178/>



La función principal del chasis es la de servir de apoyo y sujeción al resto de elementos que forman la motocicleta. Por un lado servir de sujeción al motor, y por otro, el de soportar las ruedas, suspensiones y a los propios ocupantes. De ahí la importancia de centrar todos los esfuerzos posibles en construir un bastidor rígido manteniendo un peso contenido que permita unas mínimas prestaciones y comportamiento dinámico, a la hora de diseñar una motocicleta.

7.1. Evolución del chasis

Los chasis usados hoy en día no son sino fruto de una serie de intentos por mejorar esta unidad estructural que al igual que los motores, ha ido evolucionando a lo largo del tiempo para ofrecer la mayor eficiencia y prestaciones.

De este modo se puede hacer un repaso de todo ellos empezando por los primeros que no eran más que chasis derivados de bicicletas que se formaban a base de tubos metálicos con el motor instalado entre las dos ruedas y el piloto sobre él, como se puede ver en la motocicleta de los hermanos *Werner* de 1901 de la figura 35. Se trata de un bastidor A reforzado que monta el motor en la parte central B y que adopta la horquilla C como método de dirección. No cuenta con suspensión, el depósito va situado en la parte superior y la estructura está compuesta por tubos de acero de pequeña sección. Esto logra una estructura cerrada, rígida y ligera que se denominará de cuna, surgiendo posteriormente variantes según sea simple o doble, completamente cerrada o abierta en la zona motor.

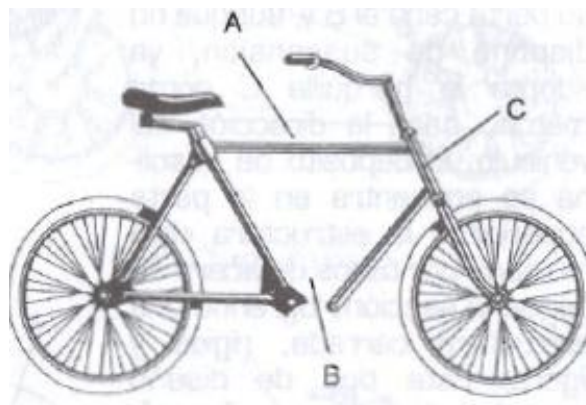


Figura 35.- Chasis *Werner* de 1901 ³⁸

³⁸ M. Arias-Paz (2003), *Motocicletas*, Editorial Dossat 2000



Con el fin de aumentar la rigidez, los tubos agrandan su sección y aparecen innovaciones en el diseño como la *Scott* de 1909, que plantea un bastidor A abierto por su parte superior, realizando el motor una función estructural. Introduce suspensión delantera B, siendo la trasera C todavía rígida. El motor se sitúa en la zona inferior D.

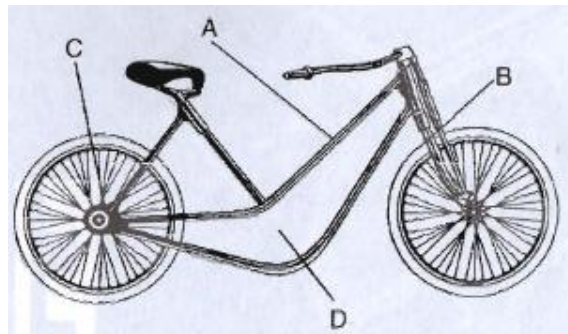


Figura 36.- Chasis *Scott* de 1909 ³⁹

En 1920, la *Mars* cambia los tubos de sección cuadrada por chapa estampada A, consiguiendo una gran rigidez al eliminar uniones soldadas. Por el contrario añade más peso, aunque repercute en una mayor resistencia. La unión de la rueda trasera B con la suspensión delantera C es casi directa, y esta viga de sección cuadrada forma prácticamente toda la estructura.



Figura 37.- Chasis *Mars* de 1920 ⁴⁰

Una pequeña evolución presenta la BMW R-32 de 1923, contando con el sistema de transmisión A como elemento resistente utilizando tubo de acero B como elemento principal de chasis, aunque consiguiendo aligerar la estructura gracias a que el motor, que se sitúa en la parte inferior C, cuenta con función estructural en el chasis.

³⁹ M. Arias-Paz (2003), *Motocicletas*, Editorial Dossat 2000

⁴⁰ M. Arias-Paz (2003), *Motocicletas*, Editorial Dossat 2000

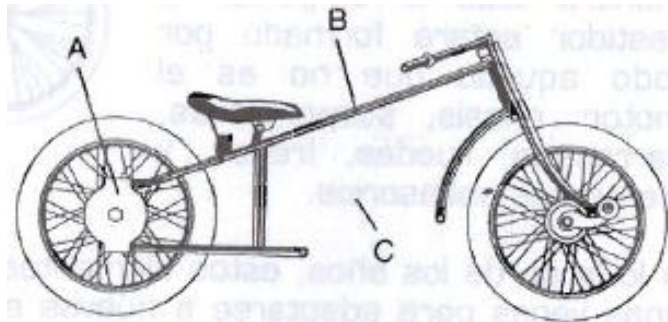


Figura 38.- Chasis BMW R-32 de 1923 ⁴¹

Zundapp rescata el chasis de chapa de acero en la K800 de 1934, pero evolucionando en el concepto haciendolo más ligero. Este (A) se corta y se dobla haciendo la estructura más rígida y dura. La geometría es similar al de chasis tubulares, aunque de nuevo une la suspensión delantera C con el eje posterior B en una sola pieza.

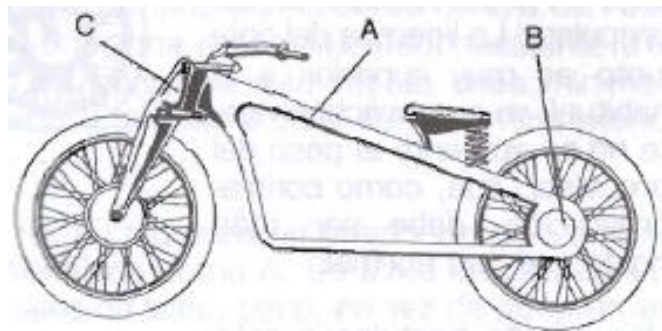


Figura 39.- Chasis Zundapp de 1934 ⁴²

A finales de la década de los 30 aparece la *Vincent HRD Rapid* de 1939, una motocicleta revolucionaria con un bastidor A que se reduce en tamaño para dar protagonismo al motor B que prácticamente lleva todo el peso estructural del chasis, al unirse a la innovadora suspensión trasera mediante un tirante C y a la delantera mediante un elemento intermedio situado en la parte superior del propulsor. De esta manera el conjunto es mucho más ligero que los que se venían haciendo hasta la fecha, aunque por el contrario el motor debe presentar una mayor rigidez.

⁴¹ M. Arias-Paz (2003), *Motocicletas*, Editorial Dossat 2000

⁴² M. Arias-Paz (2003), *Motocicletas*, Editorial Dossat 2000

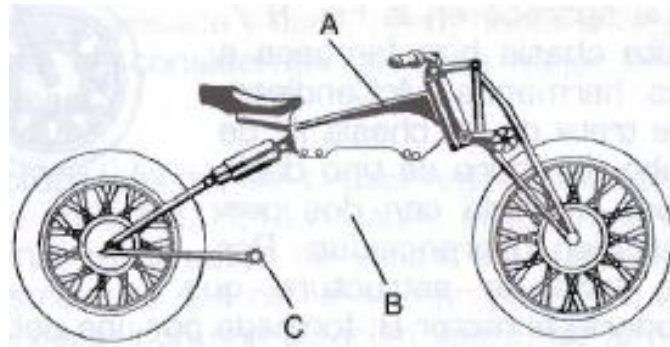


Figura 40.- Chasis HRD de 1939 ⁴³

Pero no sería hasta después de la Segunda Guerra Mundial cuando aparecía uno de los chasis más reconocidos y con más influencia en la historia. Se trata del *Norton Manx* de 1950. Cuenta con un chasis A de tubo de acero con dos zonas diferenciadas: la estructura que soporta el motor B formada por una doble cuna cerrada y un subchasis posterior C que sirve de soporte para el piloto y la amortiguación trasera D, que actúa mediante un basculante articulado y amortiguadores.

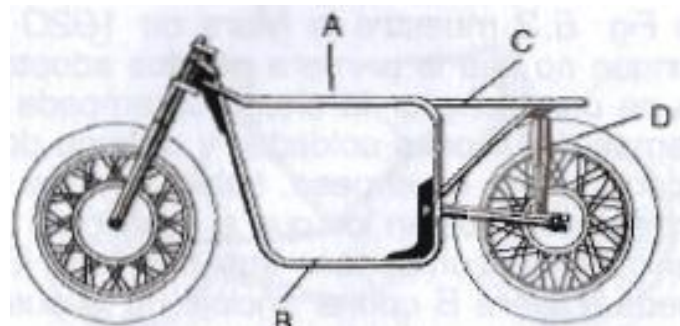


Figura 41.- Chasis de cuna Norton de 1950 ⁴⁴

No obstante el emplear el motor como elemento estructural seguiría teniendo vigencia, como es el caso de la Honda CR 72 de 1963 empleado en competición. El chasis A sorteja por la parte superior al motor, pero se unen a este tanto la suspensión delantera como la trasera B. Para la primera se emplea una horquilla C, mientras que en la trasera se encuentra un basculante D y doble amortiguador, sentando de esta manera un precedente para la gran mayoría de modelos posteriores que emplearían una configuración de suspensiones muy similar. (Ver figura 42)

⁴³ M. Arias-Paz (2003), *Motocicletas*, Editorial Dossat 2000

⁴⁴ M. Arias-Paz (2003), *Motocicletas*, Editorial Dossat 2000



Volviendo a los chasis de chapa, en los años 60 Ossa emplea uno en el que además se integra el depósito A en la zona media, pero cambiando el acero por una aleación de magnesio, el cual es mucho más ligero. Al emplear una estructura cerrada salvo en el anclaje al basculante C, el chasis B presenta gran rigidez. Esto permite un peso liviano y dimensiones contenidas. A los chasis de este tipo se les llamarán monocasco.

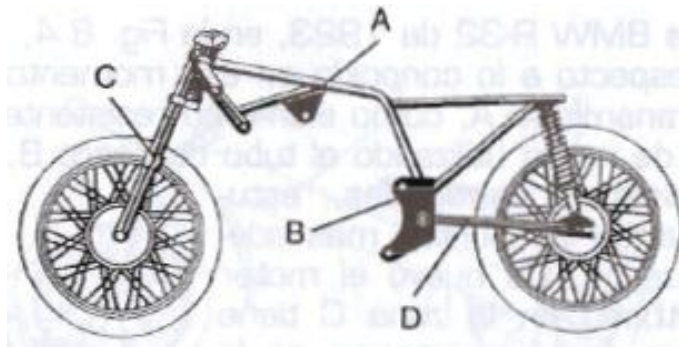


Figura 42.- Chasis Honda de 1963 ⁴⁵

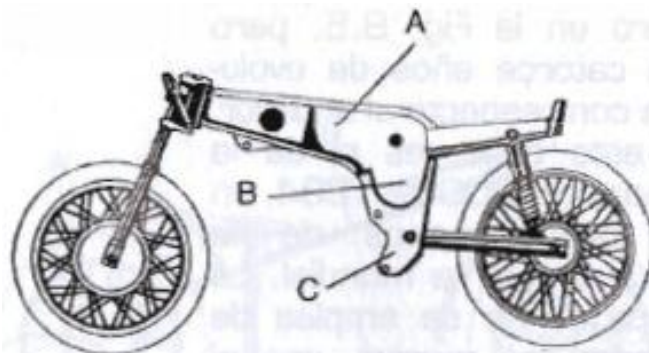


Figura 43.- Chasis monobloque Ossa de finales de los años 60 ⁴⁶

En los años 70 de nuevo *Norton* introduciría un chasis innovador montado en su modelo *Challenge*. En este caso se trata de un derivado de los bastidores tradicionales en tubo que en vez de adoptar forma de cuna, utiliza numerosos tubos de sección recta A que anclan al motor en su parte superior B, haciendo que los tubos no trabajen con esfuerzos de flexión. A esta configuración se le llamaría multitubular. La ventaja principal es que permite aumentar la rigidez de la estructura sin penalizar en peso. Por el contrario es una estructura complicada de realizar y por tanto, cara. Es hasta la fecha la mejor opción de cara a usarla en motocicletas de altas prestaciones.

⁴⁵ M. Arias-Paz (2003), *Motocicletas*, Editorial Dossat 2000

⁴⁶ M. Arias-Paz (2003), *Motocicletas*, Editorial Dossat 2000

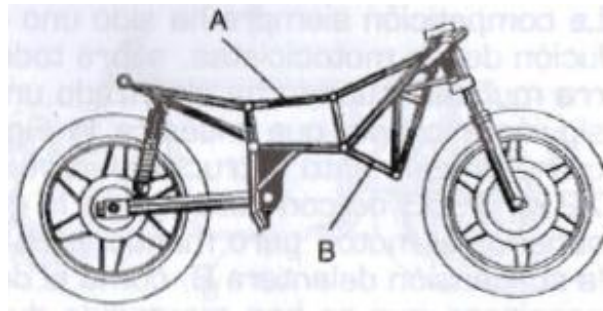


Figura 44.- Chasis multitubular Norton de 1975 ⁴⁷

La última gran revolución de la estructura y forma del chasis llegó en los años 80 cuando se presenta el que llegaría a llamarse de doble viga. En este caso se forma una estructura A en aleación ligera que une directamente la pipa de sujeción de la suspensión delantera B con el eje del basculante trasero C. Se obtiene de esta manera una estructura con alta rigidez pero a la vez sencilla de llevar a cabo y ligera. Actualmente pueden verse variaciones de esta configuración básica engordando las secciones superiores y eliminando las inferiores o manteniéndolas sólo como soportes del motor.

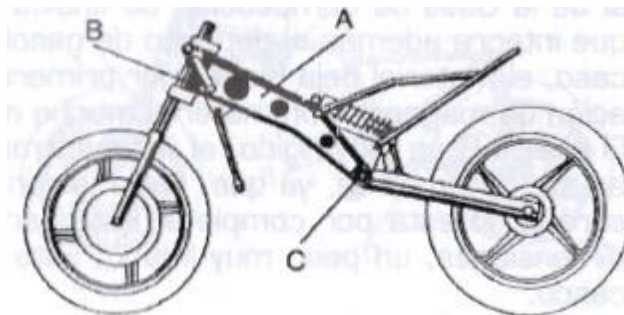


Figura 45.- Chasis de doble viga de los años 80 ⁴⁸

Aunque se ha experimentado con distintas configuraciones a lo largo de la historia, los dominantes han sido de tipo cuna. Sin embargo en la actualidad los de doble viga tienen cada vez mayor presencia, sobre todo gracias al abaratamiento en el empleo de aleaciones ligeras.

Las últimas innovaciones van encaminadas sobre todo a la variación de la geometría de suspensiones delanteras y basculantes, posibles por el diseño y

⁴⁷ M. Arias-Paz (2003), Motocicletas, Editorial Dossat 2000

⁴⁸ M. Arias-Paz (2003), Motocicletas, Editorial Dossat 2000



fabricación mediante computación, y por el empleo de materiales como la fibra de carbono.

Ejemplo de ello es el chasis con suspensión delantera tipo *Telelever* de la BMW R1100GS de 1993, con el cual se consigue que las fuerzas de la suspensión se transmitan al chasis de la moto, eliminado así el hundimiento de la horquilla en una frenada.



Figura 46.-Chasis *Telelever* de BMW de 1993 ⁴⁹

La gran mayoría de estos chasis han sido empleados para motores de combustión interna, y aunque el objetivo de este proyecto es fabricar una motocicleta eléctrica, los componentes esenciales son los mismos, a saber, suspensiones, un motor y un combustible que en este caso se almacena en baterías en vez de en un depósito. Es por ello que se pueden emplear estos chasis como referencia.

7.2. Tipos De Chasis

Una vez vista su evolución a lo largo de la historia, se hará un recuento de los tipos de chasis más extendidos en la actualidad.

7.2.1. Elementos comunes

La mayoría comparten una estructura general, independientemente del tipo. Así hay unos componentes que se pueden encontrar en la práctica totalidad de ellos y que se enumeran a continuación:

⁴⁹ Foro "Adventure Rider": <http://advrider.com>



- A: Zona de anclaje de la suspensión delantera. Se suele situar en la parte más alta del chasis en su zona delantera. A ella se ancla normalmente una horquilla telescópica, en un eje llamado “pipa de dirección”.

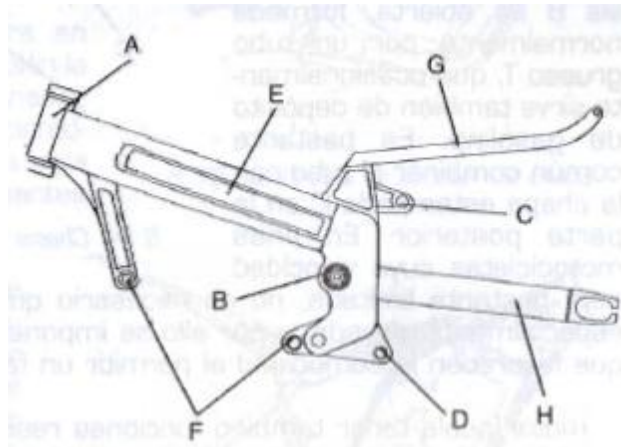


Figura 47.- Partes de un bastidor (M. Arias-Paz (2003), Motocicletas, Editorial Dossat 2000)

- B: Punto de anclaje del basculante B, que se combina con un soporte para el amortiguador trasero.
- C: Zona de anclaje del o de los amortiguadores traseros.
- D: Punto de anclaje de bieletas, si las hubiera.
- E: Unión de las zonas de anclajes de la suspensión delantera y trasera. Aquí es donde se encuentran la gran mayoría de variantes que determinan el tipo de chasis.
- F: Anclajes para el motor. Pueden jugar un rol fundamental dependiendo de si el motor participa de la estructura del chasis o no.
- G: Subchasis. Permite acomodar al piloto y además sirve de sujeción a distintos elementos accesorios como depósitos y carrocería.
- H: Basculante. Es una pieza elemental del chasis por estar sometida a grandes esfuerzos. Debe ser muy resistente.

Vistos estos componentes básicos se hace a continuación un repaso por los principales tipos de chasis que se pueden encontrar:

7.2.2. Chasis tubular

Es uno de los más simples, y a su vez de los más utilizados. Suelen emplearse en pequeños ciclomotores y scooters, pasando por motocicletas medianas, turísticas y custom de prestaciones medias, hasta motos *off-road* debido a que presentan un peso contenido para una gran robustez y flexibilidad.



Pueden ser de cuna simple completos o interrumpidos empleando el motor como elemento resistente. También existe un tercer tipo en el que el chasis aparece desdoblado, donde la zona inferior del motor y el anclaje del basculante se sujetan mediante tubos que partiendo de la pipa de dirección sortean el motor por la parte superior y bajan desdoblándose o en la pipa o al llegar a la zona trasera del motor. El anclaje de la amortiguación trasera es soportada por una subestructura trasera unida a la principal.



Figura 48: Chasis de cuna simple interrumpida ⁵⁰

Existe otra variante del chasis de cuna denominado doble, que a diferencia del simple cuenta con dos tubos delanteros que partiendo de la pipa de dirección abrazan al motor por los laterales en su parte inferior uniéndose al basculante por separado.



Figura 49.- Chasis de doble cuna ⁵¹

⁵⁰ Tipos de chasis en scooters, web "Portal Scooter": www.portalscooter.com

⁵¹ Tipos de chasis de motocicletas, web :Centro-Zaragoza": www.centro-zaragoza.com



Por su popularidad se pueden encontrar diversas variaciones de los anteriores, tanto estructurales como en cuanto a material de fabricación.

Así mismo los de doble cuna son más rígidos que los de cuna simple al formar una estructura más sólida y sujetar la motor en los laterales, mejorado el apoyo y aumentano la rigidez.

7.2.3. Chasis multitubular

Si bien este tipo se podría englobar dentro de tubulares, tiene una diferencia fundamental con respecto a estos, y es el empleo de multitud de tubos de diferentes tamaños y que idealmente nunca trabajan en flexión, sólo a compresión y tracción.



Figura 50.- Chasis multitubular ⁵²

Normalmente los tubos inferiores se eliminan y el motor se ancla por la culata. Hay algunas variedades donde hay un único tubo muy grueso en la parte superior.

Son en general chasis ligeros y muy rígidos, que hacen que la moto sea muy eficaz pero de difícil manejo, más orientados a competición.

7.2.4. Chasis de viga

Son chasis en el que dos vigas, normalmente realizadas en aluminio, enlazan la pipa de la dirección y el eje del basculante, rodeando al motor. Los puntos de anclaje al motor y pasaje se encargan a tubos de menor tamaño unidos a la estructura principal.

⁵² Web "Motomir": www.motomir.kz

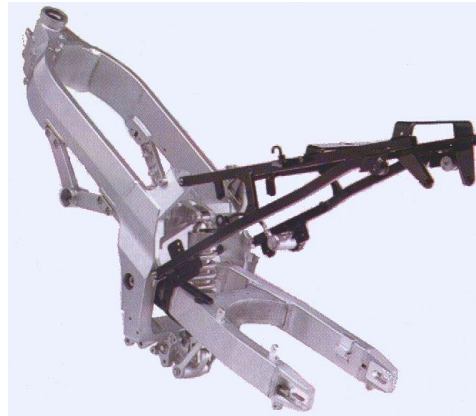


Figura 51.- Chasis de doble viga ⁵³

Suelen ser fabricados por fundición, laminación o extrusión o una combinación, aunque la pipa de la dirección y la zona de anclaje del bascuante, que sufren mayores esfuerzos, se suelen fabricar por fundición.

Es el más utilizado en motocicletas deportivas ya que resulta ligero y rígido, relativamente barato de construir y más fácil de pilotar que el tubular.

7.2.5.Chasis monocasco

Es un tipo de chasis autoportante de chapa estampada que hace las funciones de chasis y a la vez de carrocería, entendiéndose como tal en una motocicleta diversos elementos como pueden ser el depósito de gasolina. Es un tipo de bastidor más propio de scooters como la Vespa aunque algunas motocicletas deportivas lo han usado incorporando en él la caja de admisión.



Figura 52.- Chasis monocasco ⁵⁴

⁵³ Chasis de doble viga, foro “Xciting Club”: www.xcitingclub.es



7.2.6. Chasis con motor estructural

En estos bastidores el bloque motor es elemento estructural fundamental por lo que se refuerza a conciencia para soportar todos los esfuerzos a los que se verá sometido. Es una solución efectiva sobre todo para motores de grandes dimensiones que conectan la pipa de la dirección con el eje del basculante.



Figura 53.- Chasis con motor estructural ⁵⁵

Actualmente algunos fabricantes como BMW lo emplean junto con una estructura delantera que une la horquilla al motor mediante una triangulación. Es el denominado *Telelever* y tiene la ventaja de que las cargas que viajan hacia atrás desde la suspensión de la rueda delantera se reparten alrededor de un área mayor, de forma que las cargas localizadas son menores.

En el futuro el chasis con motor estructural puede convertirse en protagonista debido a la irrupción de los propulsores eléctricos, con la salvedad de que se puedan usar las estructuras que soportan las baterías como elemento estructural en vez del bloque motor en sí. Así algunos prototipos que ya usan esta tecnología presentan dicha configuración, como la *Amarok P1*.

⁵⁴ Diseño de chasis, web "Mototribu": mototribu.com

⁵⁵ Foro "Club CB500X": <http://www.clubcb500x.com/t275-protectores-de-motor>



Figura 54.- Chasis con caja de baterías como elemento estructural en motocicleta eléctrica ⁵⁶

7.2.7. El subchasis

Es la estructura que complementa a un bastidor, que sirve para soportar piezas como la suspensión o el motor. El subchasis aporta rigidez y da más libertad a los diseñadores para colocar los puntos de sujeción de estos elementos. Los subchasis modernos se fabrican con un proceso llamado hidroconformación, que produce tubos de acero de muy variada forma y sección.

7.3. Materiales Y Propiedades

Aunque en la descripción de los distintos tipos de chasis se ha dado una pincelada sobre la elección del material en cada caso, aquí se hará un repaso más exhaustivo antes de decidir qué material es más recomendable para el chasis objeto de estudio.

Las propiedades más importantes son:

- Fuerza
- Rigidez
- Densidad (o peso específico)
- Ductilidad
- Resistencia a fatiga
- Métodos de unión disponibles

⁵⁶ Blog "Ducati Monster 696": <http://ducati-monster-696.blogspot.com.es>



- Coste de material
- Coste de mecanizado y fabricación

La importancia de estas propiedades dependen del propósito de uso de la motocicleta.

Para medir la resistencia del chasis se usan las tensiones de rotura y el límite elástico. La tensión se define como la fuerza aplicada por unidad de sección transversal del material, siendo la relación entre la carga aplicada y la deformación que se produce el denominado módulo de Young.

El límite elástico es aquel por debajo del cual, al aplicar a un trozo de material una tensión con un valor inferior a él, el material recupera la forma y tamaño inicial al dejar de aplicarla. Si se aplicara una carga por encima de aquel, el material quedaría permanentemente deformado, y si se sigue aumentando el valor de la carga podría llegar a romper, alcanzando el límite de rotura. A la diferencia entre el límite elástico y el de rotura es a lo que se llama ductilidad. Así pues si un material sufre una gran deformación antes de la rotura se dirá que el material es dúctil, llamándose frágil en caso contrario.

De esta manera, a la hora de considerar el material para el presente chasis es aconsejable que el material presente un carácter dúctil que permita soportar una determinada carga antes de romper. No obstante, un aumento de la resistencia suele ir unido a un aumento en su fragilidad, por lo que la selección de material y el tratamiento térmico que se le pueda aplicar es una decisión que hay que estudiar concienzudamente.

Los materiales más propensos por sus características, a ser usados en la fabricación de un bastidor son los siguientes:

7.3.1. *Acero*

Se entiende como la aleación de hierro y carbono en la que el porcentaje de carbono no supera el 2% en peso. Si se supera ese porcentaje se obtienen fundiciones y aleaciones.



Los aceros son fácilmente deformables en caliente por forja, laminación o extrusión, gracias a su ductilidad. Por el contrario las fundiciones se fabrican generalmente por moldeo. Así mismo el acero puede templarse adquiriendo extraordinaria dureza. En cuando a las aleaciones las hay de numerosos tipos dependiendo del uso al que se destine, y se suelen denominar aceros especiales.

7.3.2. Acero al cromo-molibdeno

Es uno de los aceros inoxidables, ya que tanto el cromo como el molibdeno se emplean para evitar la corrosión y oxidación. Además el molibdeno aporta una mayor resistencia a impactos.

7.3.3. Aluminio

Su ligereza, conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión y bajo punto de fusión lo convierten en un material con multitud de aplicaciones.

Es un material, ligero, blando pero a la vez resistente. Su densidad es casi un tercio la del acero y es muy maleable y dúctil, apto para mecanizado y fundición. También presenta gran resistencia a la corrosión y durabilidad.

Las ventajas del acero sobre el aluminio residen en que es más barato y más fácil de trabajar (no necesita soldadura TIG) y tiene una mayor tenacidad, por lo que puede absorber vibraciones, torsiones o impactos sin rajarse o romperse. Por el contrario el aluminio es hasta tres veces más ligero que el acero, lo cual permite conseguir chasis muy resistentes y ligeros. Además el aluminio no se oxida ni erosiona fácilmente, al contrario que la gran mayoría de los aceros. Sin embargo necesita ser soldado por soldadura TIG y por norma general suele ser más caro.

7.3.4. Titanio

El titanio es un elemento de gran dureza, resistente a la corrosión y de propiedades físicas parecidas al acero. Se caracteriza por una alta resistencia a la corrosión y con un alto grado de pureza es un metal ligero, fuerte y de baja densidad. Posee muy buenas propiedades mecánicas y es relativamente ligero. Sus aleaciones permiten una fabricación de piezas con una relación resistencia/masa envidiable.



7.3.5. Fibra de carbono

Es un material compuesto de plástico reforzado con grafito o fibras de carbono. Es fuerte, y ligero. El plástico (resina) es habitualmente epoxy y tiene una densidad muy baja. Sus principales características son una elevada resistencia mecánica con un módulo de elasticidad elevado, resistencia a agentes externos, gran capacidad de aislamiento térmico y resistencia a las variaciones de temperatura, conservando su forma. En contra tiene su elevado coste, derivado de su proceso de obtención.

7.3.6. Magnesio

El magnesio elemental es un metal liviano, medianamente fuerte. Tanto fundido como trabajado por otros métodos se suele usar para construir chasis con espina central. Pero a su elevado coste, se suman las dificultades que presenta para soldar y una vida limitada tanto a fallo por fatiga como por corrosión.

A modo de resumen se muestra en la siguiente tabla algunas propiedades características de estos materiales:

Material	Resistencia a la tracción última (N/mm ²)	Peso específico	Modulo de Young x 10 ⁴ (N/mm ²)	Rigidez relativa
Aleación de hierro gris	160-220	7,33	12,7	0,65
Acero estructural	470-630	7,8	21	1
Aleaciones de aluminio	170-630	2,7	7	0,96
Aleaciones de magnesio	190-320	1,7	4,4	0,96
Aleaciones de titanio	470-1260	4,4	12	1,01
Fibra de carbono	1400	1,6	22	5,11

Tabla 3.- Propiedades de materiales usados en la fabricación de chasis ⁵⁷

⁵⁷ Creación propia

7.4. Consideraciones Geométricas

7.4.1. Geometría básica de una motocicleta

Se puede ver en la siguiente imagen:

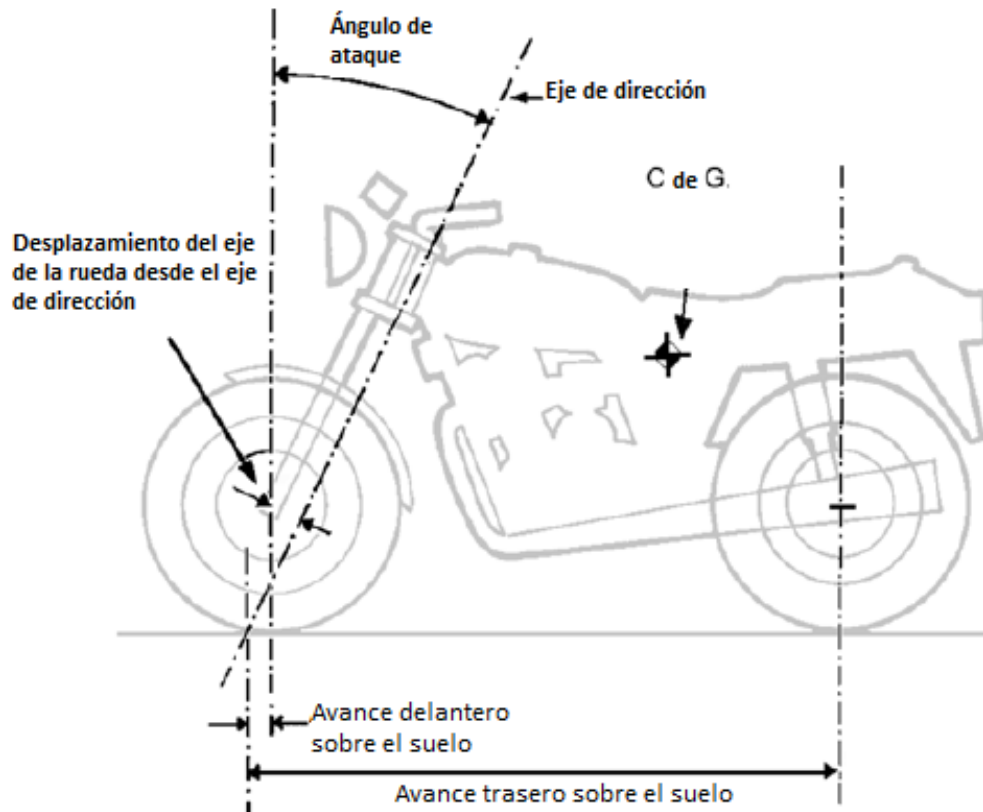


Figura 55.- Geometría básica de una motocicleta ⁵⁸

El eje de dirección es la línea sobre la que gira el sistema de dirección. El ángulo de ataque o lanzamiento es la inclinación del eje de dirección. El avance en el suelo es la distancia desde el eje dirección proyectado sobre el suelo hasta la zona de contacto del neumático con el suelo.

Hay un valor tanto respecto a la rueda delantera como a la trasera

C.de G. es el centro de gravedad y para la mayoría de los propósitos, se considera el C.de G.combinado de piloto y máquina.

⁵⁸ Adaptado de: Tony Foale (2002) Motorcycle handling and chassis design.

7.4.2. Avance

La función principal del avance es añadir estabilidad a la dirección, y también es de gran importancia a la hora de trazar las curvas. Podemos ver que los dos neumáticos, delantero y trasero tocan el suelo detrás del punto en que el eje de dirección los encuentra, esto da lugar a una autocentrado sobre las dos ruedas. La medición lineal sobre el suelo (eje de dirección al centro de la zona de contacto) se le suele llamar el avance.

Sin embargo, sería más lógico utilizar la distancia entre el contacto con el suelo y el eje de dirección, medido en ángulo recto con dicho eje. Esta es la distancia que crea un momento de torsión alrededor del eje de dirección de todas las fuerzas en el neumático. Para distinguir entre estas dos definiciones del avance, a la primera se le suele llamar avance en el suelo y a la segunda avance real.

Cómo el avance causa el efecto auto centrante se puede ver en la siguiente figura:

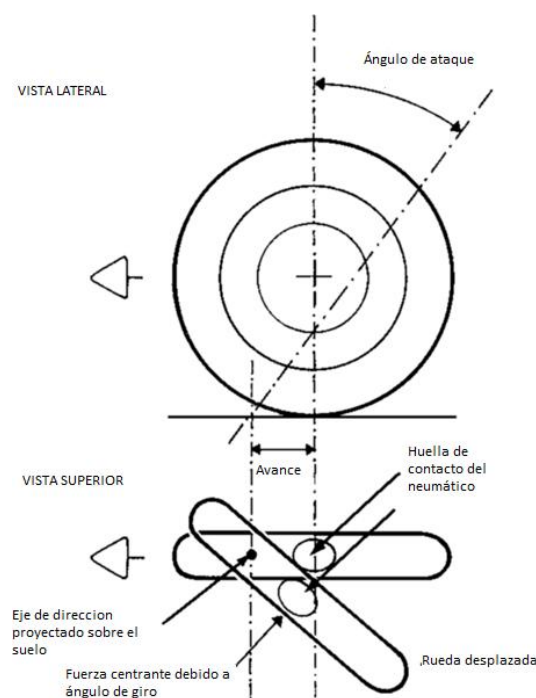


Figura 56.- Fuerzas autocentrantes en rueda delantera ⁵⁹

⁵⁹ Adaptado de: Tony Foale (2002) Motorcycle handling and chassis design.

Debido a que la rueda forma un ángulo con la dirección de desplazamiento, se genera una fuerza perpendicular al neumático. Dado que la superficie de contacto está detrás del eje de dirección (avance positivo), entonces esta fuerza actúa sobre un brazo de palanca para proporcionar un par motor a la rueda. Este brazo de palanca es igual al avance real.

7.4.3. Ángulo de ataque o lanzamiento (inclinación del eje de dirección)

La razón fundamental de este ángulo es menos fácil de explicar que la de avance. Sin embargo hoy en día la gran mayoría de motocicletas presenta un ángulo comprendido entre los 23 y los 30 grados. No hay una respuesta simple y varios son los factores relevantes.

Si se comparan dos esquemas con el mismo avance, pero diferente ángulo de ataque, se ve como el que tiene un ángulo respecto a la vertical es más conveniente y lógico que el que es perpendicular al suelo:

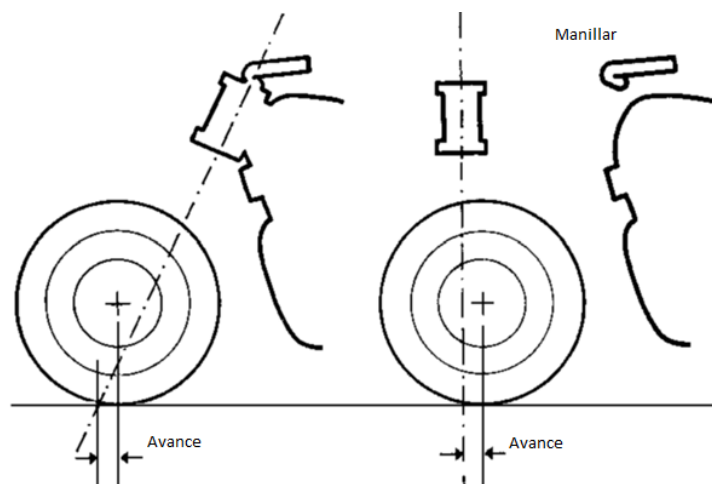


Figura 57.- Distintos ángulos de ataque⁶⁰

En la mayoría de los diseños convencionales, simplemente por razones de espacio, el eje de la rueda no está desplazado del eje de dirección, por lo tanto, el ángulo de ataque, que suele ser de entre 10 y 15 grados puede dar un resultado

⁶⁰ Adaptado de: Tony Foale (2002) Motorcycle handling and chassis design.



satisfactorio, ya que se logra un compromiso entre facilidad de construcción y eficiencia bastante grande. Sin embargo, ha habido una tendencia gradual hacia el uso de ángulos de inclinación más pronunciada, en particular para motocicletas de carreras y deportes que usan ahora comúnmente ángulos de ataque de 20 a 23 grados. No obstante, algunas de las razones para el cambio viene probablemente de nuevo a la facilidad de construcción

En el último par de décadas, ha habido una tendencia hacia distribuciones de peso más adelante y el piloto se ha movido hacia adelante. Estos cambios se hacen más fáciles con un adelantamiento del peso y por lo tanto más pronunciado ángulo de ataque, que también ayudar a compensar las fuerzas de dirección más altas requeridas por el aumento de la carga en la rueda delantera.

En la siguiente imagen se representa una motocicleta como dos planos que intersectan a lo largo del eje de dirección puede ayudar a visualizar los aspectos geométricos causados por la inclinación y el giro.

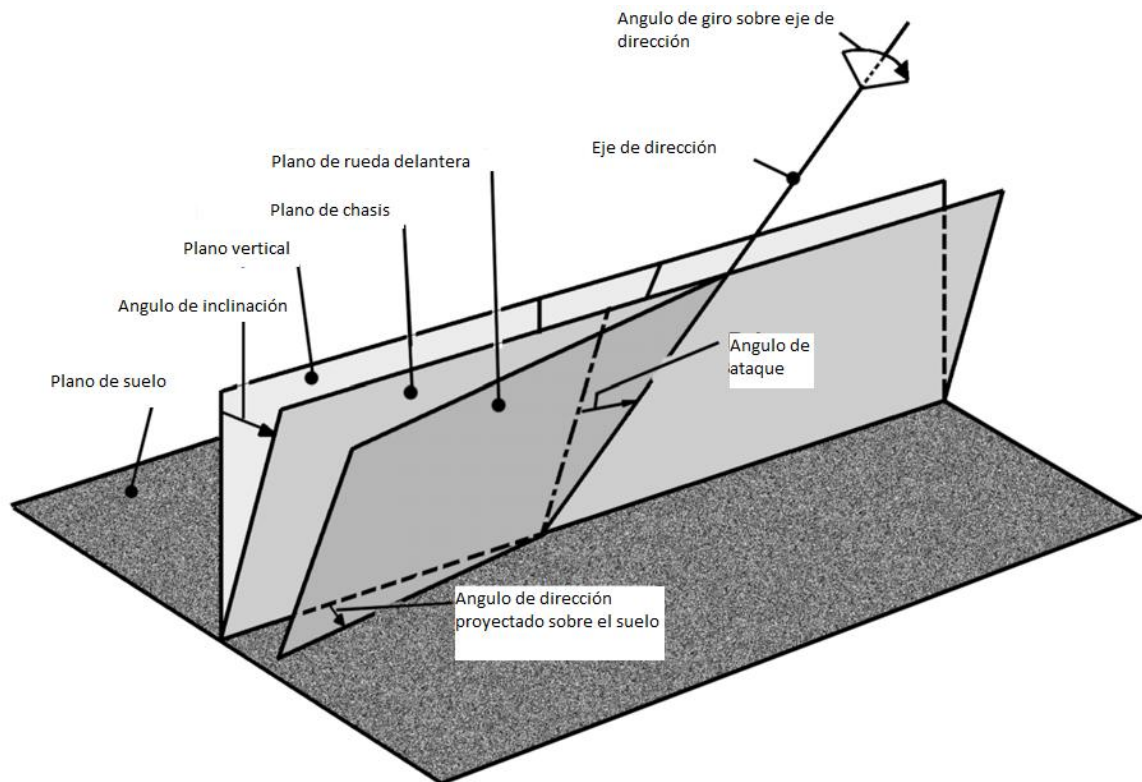


Figura 58.- Representación esquemática de motocicleta con inclinación y giro ⁶¹

⁶¹ Adaptado de: Tony Foale (2002) Motorcycle handling and chassis design.



Uno de los planos contiene el chasis principal, el cual incluye la rueda trasera. El otro es el plano que contiene la rueda delantera, el cual puede rotar a lo largo del eje de dirección contenido en el plano de chasis, y el plano de chasis puede inclinarse respecto del vertical.

Los efectos perjudiciales del ángulo de ataque se vuelven más pronunciados a mayores ángulos de dirección. El efecto de auto-dirección asistida puede o no ser beneficiosa. Al tomar las curvas en un ángulo y velocidad en particular necesitamos un efecto de auto dirección concreto para darnos el ángulo de dirección correcto; demasiado y el piloto debe aplicar un esfuerzo inverso al manillar, muy poco y es necesario aplicar un giro adicional. El ángulo de giro necesario para un determinado ángulo de inclinación depende de muchos parámetros, por lo que no es posible conseguir un efecto de auto-dirección que sea perfecto para todas las condiciones. Un cambio en el tipo de neumático sería suficiente para alterar las cosas.

7.4.4. *Distancia entre ejes*

La distancia entre ejes tiene diversos efectos, pero en general a mayor distancia, mejor estabilidad direccional a cambio de mayor esfuerzo para girar.

Ello es debido en primer lugar al ángulo de giro requerido. Para un radio de curvatura dado, una distancia de ejes mayor requiere un mayor ángulo de giro, como demuestra el diagrama de *Ackerman* (ver figura 59).

Otro factor viene dado por la influencia de la rueda trasera, puesto que para un determinado giro el ángulo de la esta con respecto a la dirección de avance es menor cuanto mayor es la distancia entre ejes.

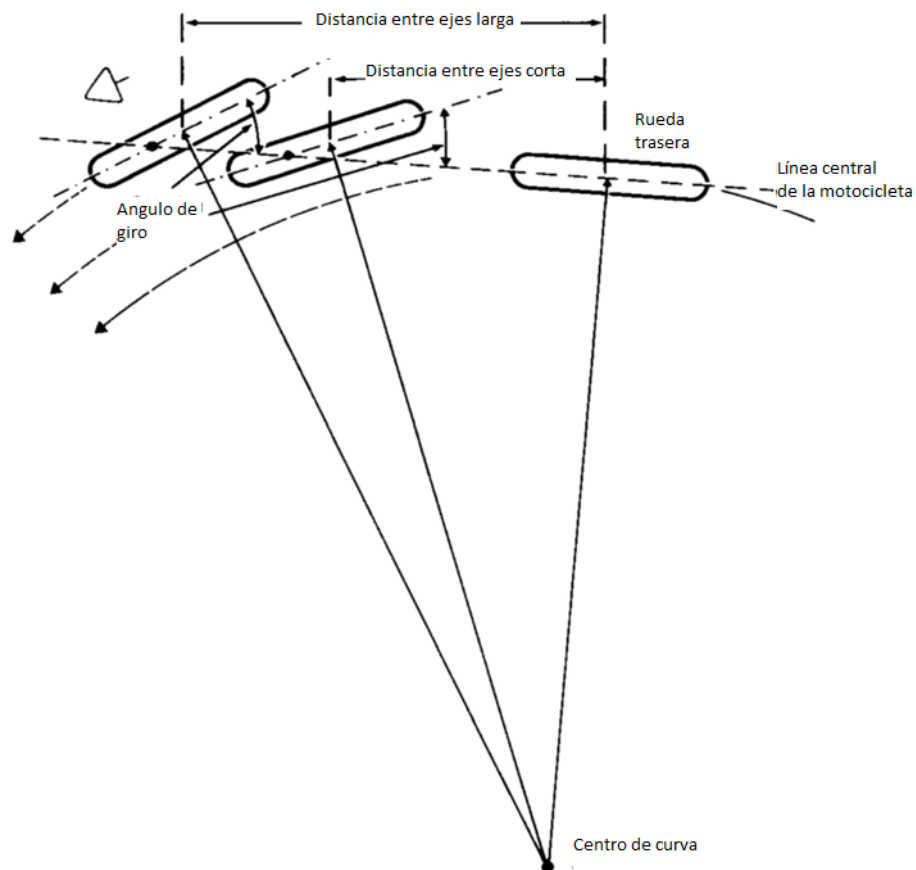


Figura 59.- Diagrama de Ackerman para un giro ⁶²

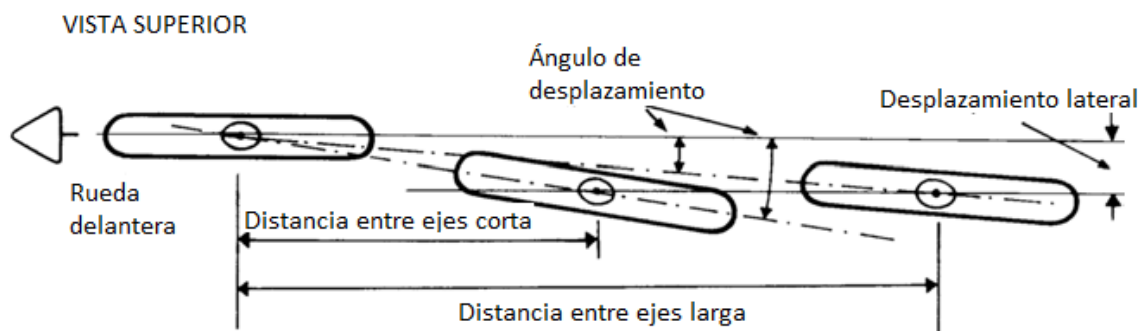


Figura 60.-Efecto del giro sobre la rueda trasera ⁶³

Por último, también hay que tener en cuenta la inercia, puesto que en frenadas y aceleraciones se producen transferencias de carga para un centro de gravedad dado, así pues a mayor distancia entre ejes menor será la transferencia de carga.

⁶² Adaptado de: Tony Foale (2002) Motorcycle handling and chassis design.

⁶³ Adaptado de: Tony Foale (2002) Motorcycle handling and chassis design.



7.4.5. Centro De Gravedad y Transferencia de Carga

El peso de cualquier cuerpo es la atracción gravitatoria de todas las partículas hacia el centro de la tierra, y normalmente se supone que esas fuerzas actúan sobre un punto que es el llamado centro de gravedad.

En el caso de una motocicleta, al frenar o acelerar se puede sentir como la carga en un neumático se reduce mientras que en el otro aumenta. En condiciones estables la carga total que soportan ambos neumáticos es siempre la misma, por lo que la carga que se transfiere a una de las ruedas es la que se descarga de la otra, de tal forma que la suma de ambas es el peso de la moto. El caso extremo sería en el que la moto sólo estuviese apoyada por una sola rueda, actuando sobre ella todo el peso de la moto.

El centro de gravedad en una motocicleta es por norma general relativamente alto en comparación con la distancia entre ejes, por lo que el efecto de la transferencia de cargas es mucho mayor que en otro tipo de vehículos, y tiene tres fuentes principales:

- Inercial: Provocada al acelerar y frenar la moto.
- Aerodinámica: La resistencia aerodinámica tiende a levantar la parte delantera y a cargar la trasera.
- Posicional: Al bajar un desnivel el tren delantero soporta más peso y viceversa.

La transferencia de carga se puede calcular sabiendo la aceleración que se sufre en una aceleración o en una frenada. Si se supone una motocicleta compuesta por las dos ruedas y su masa reducida en el C.deG. se tiene:

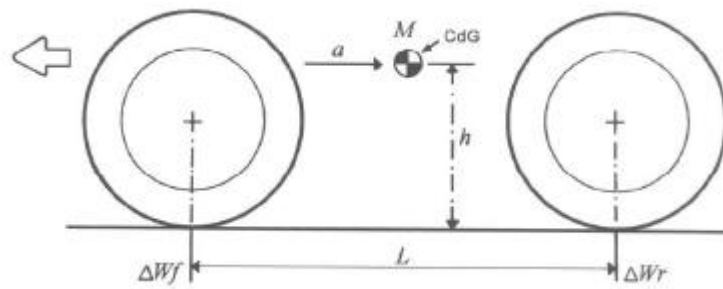


Figura 61.- Transferencia de carga ⁶⁴

Donde:

L= Distancia entre ejes

h = Altura del centro de gravedad

M =Masa de la moto

a = Aceleración

ΔW_f = Transferencia de carga delante

ΔW_r = Transferencia de carga detrás

g = Constante gravitatoria

Si se considera F_a la fuerza de aceleración horizontal que actúa sobre el centro de gravedad y de valor:

$$F_a = \frac{M a h}{g} \quad (7.1)$$

y su momento M_a :

$$M_a = \frac{M a}{g} \quad (7.2)$$

⁶⁴ Adaptado de: Tony Foale (2002) Motorcycle handling and chassis design.



este debe ser contrarrestado por otro de igual valor debido a la transferencia de carga que actúa sobre la distancia entre ejes. Así pues para el momento:

$$\Delta W_r L = - \Delta W_f L = M_a \quad (7.3)$$

Mientras que la transferencia de carga tendrá un valor:

$$\Delta W_r = - \Delta W_f = F_a \quad (7.4)$$

La transferencia es proporcional a la masa, altura del centro de gravedad y aceleración de la moto, e inversamente proporcional a la distancia entre ejes. En cambio la posición longitudinal del CdeG no afecta a la transferencia de carga aunque sí a la carga sobre cada rueda.

7.4.6. *Squat Y Hundimiento*

Estos términos se refieren a cambios en altura de la parte suspendida de la motocicleta y de cabeceo.

El hundimiento es un cabeceo hacia delante que ocurre normalmente al frenar mientras que el squat es una rotación hacia atrás provocado por la aceleración y las fuerzas aerodinámicas que provocan que la parte de atrás se hunda.

Para evitar el squat que sufre una moto, lo más significativo es la actuación sobre el comportamiento del tren trasero que dependerá de la inclinación que tenga el basculante.

Si se supone un sistema de transmisión de fuerzas por cadena y un basculante con un pequeño ángulo de inclinación positivo como se ve en la figura siguiente:

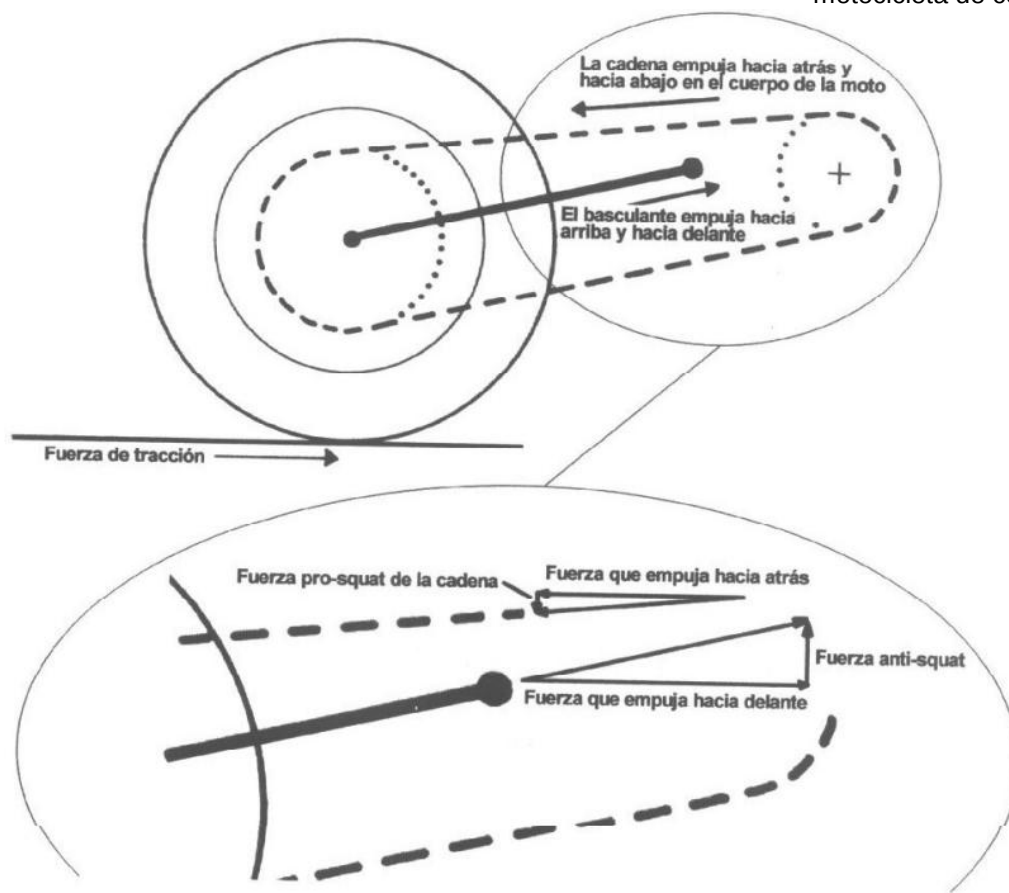


Figura 62.- Fuerzas de tracción debido a cadena ⁶⁵

La cadena tira hacia atrás de la mayor parte de la moto, pero la fuerza en el basculante es mayor, haciendo que al acelerar, el modelo vaya hacia adelante. La componente vertical de la fuerza de la cadena es hacia abajo favoreciendo el squat, mientras que la componente vertical del basculante es mayor, actúa hacia arriba y produce de esta manera un efecto anti-squat.

Este proceso depende de la inclinación del basculante y su longitud, así como del radio del piñón de la cadena, obteniéndose de la intersección de ambas líneas un centro instantáneo de fuerzas. Así un piñón de pequeño radio produce un mayor antisquat que un piñón mayor. De igual modo, una corona trasera grande produce el mismo efecto que un piñón delantero pequeño.

El antisquat también se ve aumentado con la suspensión extendida y reducido al comprimirse.

⁶⁵ Adaptado de: Tony Foale (2002) Motorcycle handling and chassis design.



Pasando ahora al tren delantero, este suele estar formado por una horquilla telescópica, con lo que aparecen dos fuentes de hundimiento siendo una de ellas el efecto de transferencia de carga que depende de la altura del centro de gravedad y la distancia entre ejes; y la otra fuente que sería el lanzamiento de la horquilla.

El lanzamiento hace que la fuerza de frenado en el neumático delantero se divida en dos componentes, una en línea con la horquilla que tiende a comprimir los muelles y otra perpendicular a la horquilla. La transferencia de carga hace que la fuerza en los muelles se vea incrementada en un 45% aproximadamente.

El hundimiento del tren delantero está relacionado con la compresión de la horquilla por el coseno del ángulo de lanzamiento. Por otro lado para mantener fija la constante del muelle en sentido vertical, la dureza del muelle debe reducirse conforme aumenta el ángulo de lanzamiento.

En resumen la transferencia de carga que se produce tanto al acelerar como al frenar hace que la moto tenga tendencia a cambiar su posición. Las fuerzas horizontales reaccionan en función de las características geométricas de la moto, produciendo fuerzas y momentos internos que pueden oponerse o favorecer los movimientos de hundimientos o anti hundimiento de las suspensiones

Existen multitud de opciones de ajuste en la suspensión de una motocicleta, por tanto hay que llegar a un compromiso para que la amortiguación funcione razonablemente bien en todas las situaciones que se consideren, y no sólo óptimamente en determinadas circunstancias.

7.4.7. Rigidez del bastidor

En la construcción de un chasis adecuado para nuestro propósito, tenemos más problemas que simplemente lograr el mejor compromiso entre los diversos parámetros geométricos discutido hasta ahora. Porque si el chasis no es lo suficientemente rígido para mantener la geometría elegida, entonces todos los cálculos carecen de validez. Hay muchas fuentes de flexión en una motocicleta. Por ello es especialmente importante mantener la alineación entre los planos centrales de las ruedas y el eje de dirección, de otro modo la estabilidad direccional sufrirá. En



el extremo delantero, que es el más importante, esta alineación se rige principalmente por la rigidez lateral de la horquilla y la rueda.

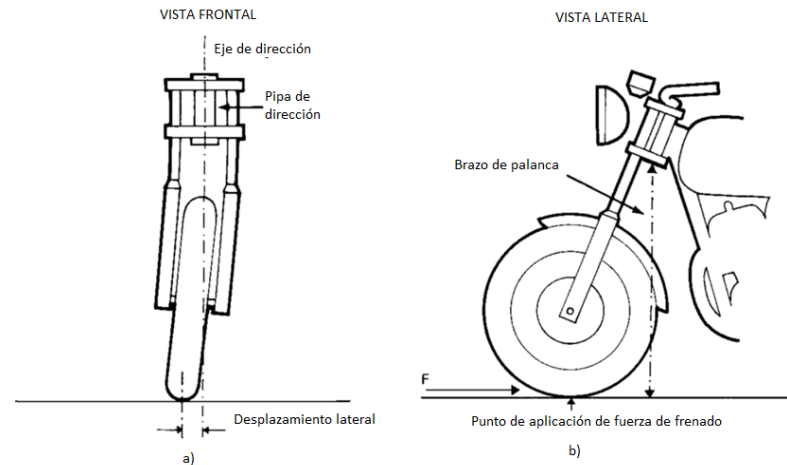


Figura 63.- a) Desplazamiento lateral debido a flexión de horquilla y rueda. b) brazo de palanca que actúa sobre deflexión frontal⁶⁶

A su vez las horquillas telescópicas apoyadas en una pipa de dirección convencional también carecen de rigidez en un plano longitudinal pero esto es menos preocupante, excepto tal vez en la frenada.

Mantener la rueda trasera alineada con el eje de dirección implica no sólo la rigidez lateral de la rueda, sino también la rigidez torsional y lateral del bastidor principal.

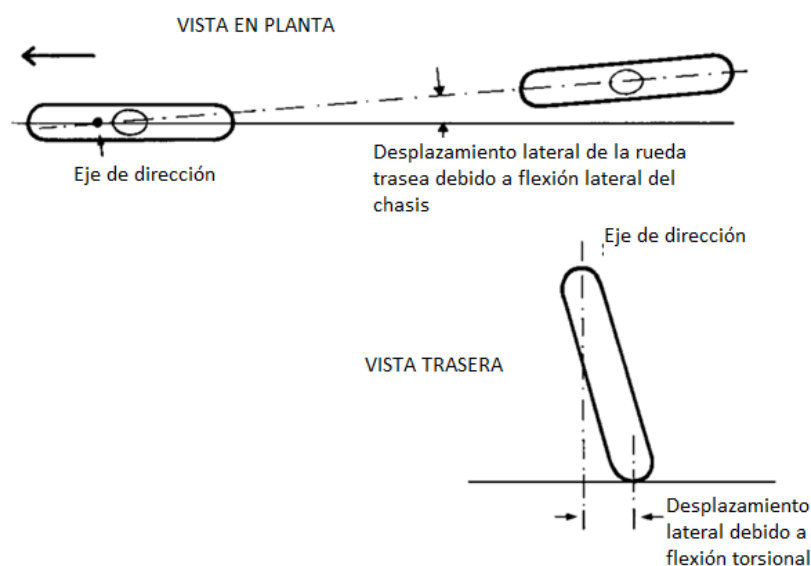


Figura 64.- Desplazamiento lateral de la rueda trasera debido a la flexión y torsión del chasis.⁶⁷

⁶⁶ Adaptado de: Tony Foale (2002) Motorcycle handling and chassis design.



Un punto práctico es la rigidez lateral del subchasis de soporte del asiento. El piloto recibe su percepción sobre el comportamiento de la máquina a través del asiento, por lo que es importante que esté soportado por una estructura rígida.

Aparte de los anteriores hay otros aspectos geométricos de menor importancia como el diámetro de rueda que se omitirá en su estudio por ser un elemento impuesto por la organización de la competición.

8. Cargas A Soportar Por El Chasis

Aunque en el uso normal de un vehículo aparecen numerosas cargas debidas a su interacción con la carretera, baches, peso propio... en el objeto de este estudio se puede considerar que sobre el chasis de una motocicleta actúan cargas en dos situaciones extremas: frenada máxima sobre la rueda delantera y paso por curva.

Elegir las fuerzas que actúan y sus puntos de aplicación sobre la motocicleta serán los puntos más delicados del análisis puesto que de su correcta elección dependerá la fiabilidad de los resultados de la simulación.

8.1. Frenada máxima en la rueda delantera

Si se considera que solamente se actúa sobre el freno delantero con la máxima eficiencia posible se someterá a máxima flexión al chasis, ya que si se utilizase el trasero también su acción reduciría el momento aplicado por la horquilla sobre la pipa de dirección.

La fuerza de frenada en esta situación máxima viene determinada por la geometría de la moto. Las fuerzas representadas en la siguiente figura muestran el peso de la moto m_T (término que incluye el peso del piloto) y sus reacciones sobre el suelo, F_1 y F_2 . La fuerza debida a la inercia de la moto sufrida como consecuencia de la deceleración se representa por F_4 , que es compensada por la fuerza de rozamiento del neumático con el asfalto F_3 .

⁶⁷ Adaptado de: Tony Foale (2002) Motorcycle handling and chassis design.

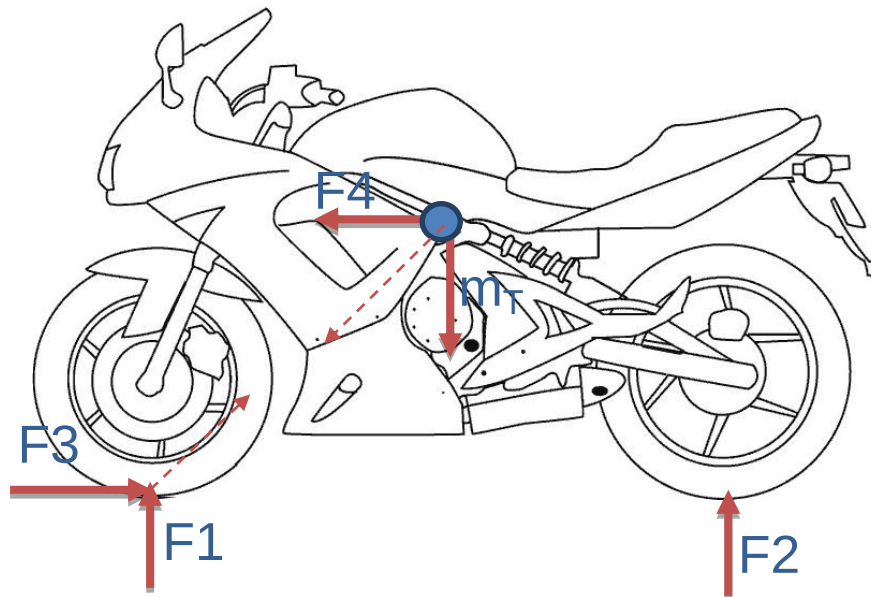


Figura 65.- Fuerzas en frenada máxima sobre la rueda delantera ⁶⁸

La resultante de sumar vectorialmente m_T y F_4 es un vector aplicado en el C.deG. que debe estar alineado en el caso límite con el vector resultante de la suma vectorial de F_3 y F_1 , situado este en el punto de contacto de la rueda delantera y el asfalto. Si F_3 y F_4 siguieran aumentando por encima de la situación límite la moto giraría en sentido antihorario alrededor de un eje perpendicular al plano del dibujo y que pasa por el punto de contacto de la rueda delantera y el asfalto.

Considerando m_c la masa aproximada del chasis con todos sus elementos de suspensión, basculante... y m_p la masa aproximada del piloto se tiene m_{cp} como suma de ambos. Así la masa chasis más piloto es de:

$$m_{cp} = m_c + m_p = 30 \text{ kg} + 75 \text{ kg} = 105 \text{ kg} \quad (8.1)$$

A la ecuación anterior hay que sumar la masa del motor m_m que es de aproximadamente 25 kg, mientras que la de las baterías m_b es de aproximadamente 40 kg, considerando el peso total del conjunto m_T de unos 170 kg.

⁶⁸ Creación propia



Si se estima que la motocicleta puede decelerar en una frenada de 150 a 10 km/h en un tiempo de 4 segundos, la fuerza de deceleración media que sufre será de:

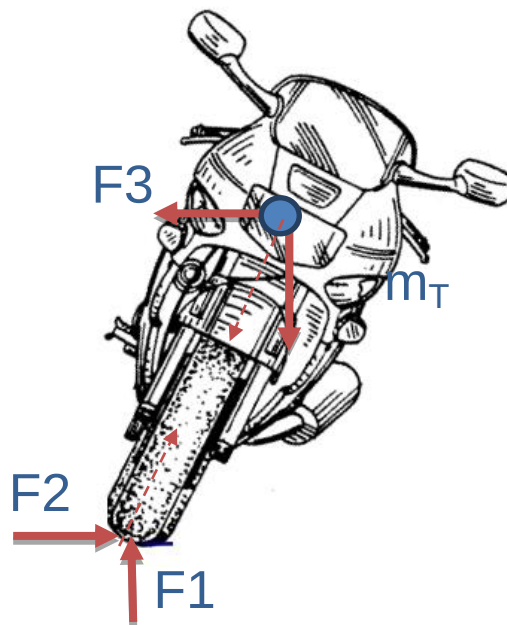
$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{150 \frac{km}{h} - 10 \frac{km}{h}}{4 s \cdot 3600 \frac{s}{h} \cdot 10^{-3} \frac{km}{m}} = 9,72 \frac{m}{s^2} \approx 1 G \quad (8.2)$$

Así pues, según lo anterior en esta frenada máxima la masa de la moto será sometida a aproximadamente 1G de deceleración, actuando en dirección horizontal. Como componente vertical sólo actuará el peso.

Los valores anteriores son estimados, por lo que a las fuerzas que se consideren se aplicará un coeficiente de seguridad que garantice que bajo desviaciones aleatorias exista un margen de prestaciones por encima de las mínimamente exigidas. Este coeficiente de seguridad será de 1,5 y afectará a todas las fuerzas incluidas en el análisis

8.2. Paso por curva

Para este análisis se considera que en el momento de paso por curva la motocicleta se encuentra con una inclinación máxima no existiendo fuerzas de aceleración o frenada, por lo que el agarre del neumático se encargará de contrarrestar la fuerza centrífuga de la motocicleta, además del propio peso del conjunto. El vector resultante de sumar vectorialmente F_1 y F_2 debe ser colineal con la suma vectorial de m_T y F_3 en ambas ruedas:

Figura 66.- Fuerzas en paso por curva ⁶⁹

Suponiendo que se quiere trazar una curva de radio 60 m a una velocidad media de 70 km/h, la aceleración centrípeta experimentada por la moto será de:

$$a_c = \frac{v^2}{r} = \frac{\left(\frac{70 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}\right)^2}{60 \text{ m}} = 6,301 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 0,66 \text{ G} \quad (8.3)$$

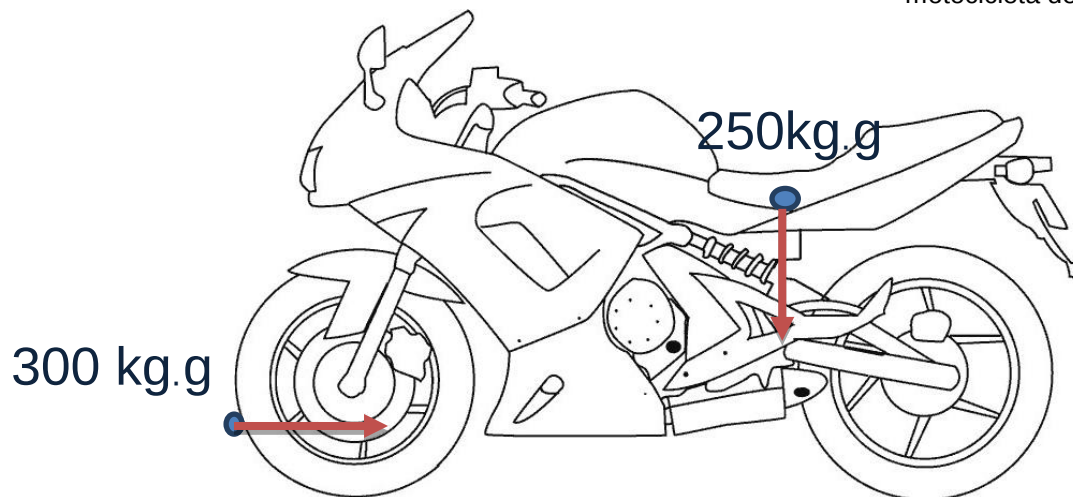
La motocicleta puede llegar a inclinarse un ángulo que puede ser de aproximadamente 50°. Así pues la fuerza que actúa lateralmente sobre el chasis es menor, considerando que esta es en torno al 10% de la fuerza vertical.

8.3. Prueba estática en banco

Como se indicó en el apartado 5.3.2 de este documento, la motocicleta será sometida a una prueba estática en banco el día de la competición para homologar que el chasis cumple con los requerimientos mínimos de resistencia exigidos. A modo de recordatorio, se puede ver en la siguiente figura las cargas aplicadas:

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

⁶⁹ Creación propia

Figura 67.- Solicitaciones de fuerza en prueba estática en banco ⁷⁰

Estas cargas se aplicarán sucesivamente dos veces consecutivas y se verificará que la medida es repetitiva en cuanto a deformación con un error entre medidas inferior a un 10% y que no aparece ningún tipo de fallo o fisura en los componentes estructurales o elementos de unión (artículo E.3.3. del Reglamento de la Competición, IV Competición Internacional MotoStudent 2015 – 2016, versión 08.2015).

9. Modelado Del Chasis

El modelado del chasis se ha llevado a cabo empleando el software denominado *Solidworks®* versión 2015. Este es un programa de diseño asistido por computación, el cual usa el kernel de modelado geométrico *Parasolid*. *Solidworks®* permite modelar piezas y ensamblajes y extraer de ellos planos y otras propiedades de interés.



Figura 68.- Logo de Solidworks ®

⁷⁰ Creación propia



Todos los elementos han sido realizados sobre el propio software con operaciones tales como extrusiones, cortes, vaciados, revoluciones, barridos, simetrías... a partir de las medidas proporcionadas teóricamente. La premisa del modelado era realizarlo con la mayor fidelidad posible respecto a la realidad.

El diseño final de la motocicleta objeto de este proyecto es un proceso llevado a cabo con el trabajo conjunto de varios miembros de varias áreas dentro del equipo, por lo que la geometría definida en un principio es susceptible de ser modificada según requerimientos de dichas áreas, diferentes de las propuestas según el análisis en este trabajo. No obstante, los valores que se tomarán de partida se consideran definitivos, y sólo en caso de que al final del análisis se concluya que los resultados son imposibles de alcanzar satisfactoriamente con éstos se procedería a una nueva definición del problema.

9.1. Datos básicos

9.1.1. *Parámetros*

Como valores iniciales de la geometría y considerados como de referencia y recomendados para la geometría final son los indicados a continuación:

Ángulo de lanzamiento (°)	24
Ángulo de balancín (°)	14
Longitud de la horquilla (mm)	680
Diámetro rueda delantera (Pulgadas)	17
Longitud balancín (mm)	620
Distancia entre ejes (mm)	170

Tabla 4.- Parámetros básicos de la geometría ⁷¹

9.1.2. *Material y perfilera*

El material elegido es Aluminio que con respecto al Acero tienen parecidas rigideces relativas. Sin embargo el Aluminio permite, para barras de similar sollicitación, tener un mayor espesor lo cual ofrece ventajas a la hora de soldar y

⁷¹ Creación propia



evitar daños por doblado como abolladuras y pandeo que sí podrían ocurrir en barras similares en Acero por tener menor espesor comparativamente.

Otra razón es la estética. Puesto que se trata de diseñar un prototipo que va a ser objeto de evaluación en todos los ámbitos, un chasis realizado en Aluminio tiene un mejor aspecto visual que en Acero.

Los elementos estructurales del chasis serán tubos y perfiles de las siguientes medidas:

- Perfil de 50x20x3mm de Aluminio 6063 T5
- Perfil de 40x20x3mm de Aluminio 6063 T5
- Tubo de diámetro 20mm y espesor 2 mm de Aluminio 6063 T5
- Macizo soldable de Aluminio 6082 T6.
- Macizo no soldable de Aluminio 7075.

Los materiales citados son diversas aleaciones basadas en Aluminio-Magnesio-Silicio en el caso del 6063 y 6082 y en Aluminio-Zinc para el 7075 con diferentes tratamientos térmico de solución, temple y maduración artificial con objeto de mejorar sus propiedades mecánicas.:

- T5: Enfriado desde un proceso de fabricación a alta temperatura y envejecida artificialmente.
- T6: Solución tratada térmicamente y envejecida artificialmente. Son designados de esta forma los productos que después de un proceso de conformado a alta temperatura (moldeo o extrusión) no son endurecidos en frío, sino que sufren un envejecimiento artificial

Se incluyen a continuación algunas propiedades básicas de cada uno de ellos:

Tipo	Densidad (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (MPa)	Carga de rotura (MPa)	Límite elástico (MPa)
6063 T5	2700	69000	185	145
6082 T6	2710	70000	295	250
7075 T6	2810	72000	480-530	390-450

Tabla 5.- Tabla de propiedades de materiales. Aluminios ⁷²

Los Aluminios 6063 y 6082 se usarán para las piezas que deban ser soldadas debido a sus aptitudes a la soldadura, que se resumen en la siguiente tabla:

Tipo	Soldadura	Aptitud
6063 T5	A la llama	Buena
	Al arco bajo gas argón	Buena
	Por resistencia eléctrica	Muy buena
	Braseado	Muy buena
6082 T6	A la llama	Muy buena
	Al arco bajo gas argón	Buena
	Por resistencia eléctrica	Muy buena
	Braseado	Buena

Tabla 6.- Aptitud a la soldabilidad de Aluminios 6063 y 6082 ⁷³

Por otro lado el Aluminio 7075 también conocido como Duraluminio presenta un mal comportamiento a la soldadura por lo que junto a su elevado límite elástico es una aleación muy adecuada para piezas sometidas a grandes fatigas que no vayan soldadas, como puedan ser tijas, estribas...

9.2. Elementos de chasis

El diseño final de chasis consistirá en una estructura de “tijera de tres hojas” que persigue una notable mejora en la eficiencia estructural tanto del bastidor como del tren delantero, mejorando otros aspectos fundamentales como facilidad de construcción, coste y posibilidades de reglaje.

En lo sucesivo se hace un estudio detallado de todos los elementos que afectan directamente a la definición final del diseño del chasis y del chasis en cuestión

9.2.1. Suspensión delantera y dirección

El tren delantero mantiene la horquilla telescópica convencional, pero modifica su enlace al bastidor soportándose, no sólo desde su extremo superior fijo (eje de

⁷² Datos de Alacermas S.A.

⁷³ Datos de Alacermas S.A.



dirección) sino también desde la parte inferior solidaria a la rueda, mediante un balancín oscilante triangular y una rótula esférica.

Este tren deantero presenta otra ventaja en cuanto a la facilidad de fijar los parámetros de suspensión y de dirección adecuados al tipo de uso, y posibilidad del control de sus cambios (progresividad o regresividad)

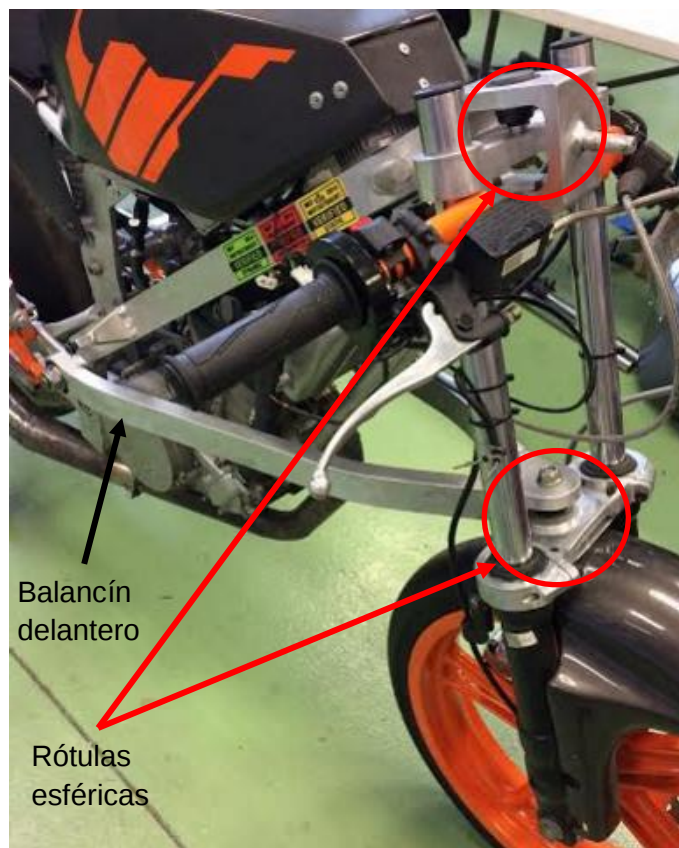


Figura 69.- Detalle de sistema de suspensión de modelo 2014 ⁷⁴

Como se observa en la figura anterior, la rótula esférica superior constituye la unión de la horquilla delantera con el chasis. A diferencia del chasis convencional de doble viga, este chasis no requiere un refuerzo para soportar el par de flexión y de torsión que introduce la horquilla, pues esta zona sólo va a estar sometida a fuerzas longitudinales y laterales. Por tanto, este tipo de suspensión permite la utilización de un chasis más ligero en dicha zona. Esto obliga a utilizar una solución de eje de dirección un poco especial, ya que se sustituye el cilindro por el que entraría el eje de

⁷⁴ EPS-UJA TEAM, MotoStudent 2014



giro de la horquilla por una placa soldada que alojará a la rótula esférica, fabricada en Aluminio 6082 T6:

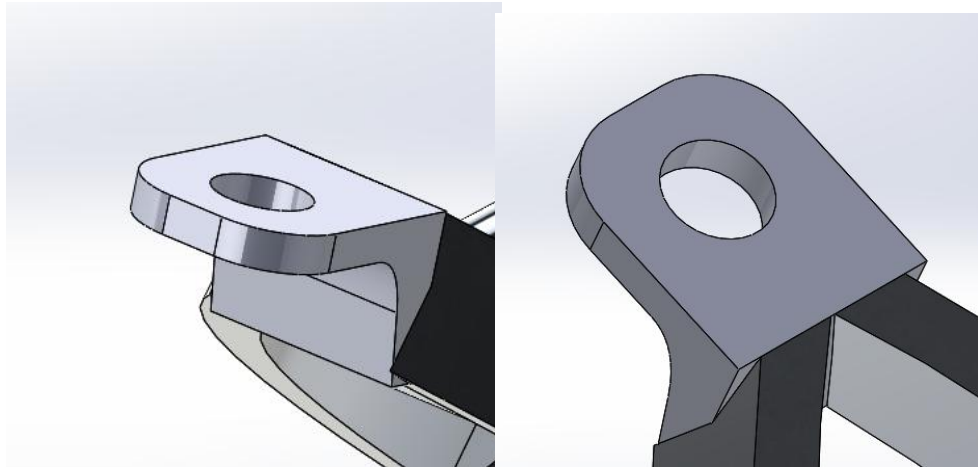


Figura 70.- Soporte rótula de dirección ⁷⁵

Por otro lado, la rótula inferior permite la unión de la tija inferior, que sujeta las botellas de la horquilla telescópica con el bastidor a través del balancín. Éste, que tampoco está sometido a ningún par, permite reducir las deformaciones de la horquilla delantera. Se diseñará con perfil de Aluminio 6063 T5 en medidas 50x20x3mm para las barras y Aluminio 6082 T6 para el soporte de rótula y las fijaciones laterales.

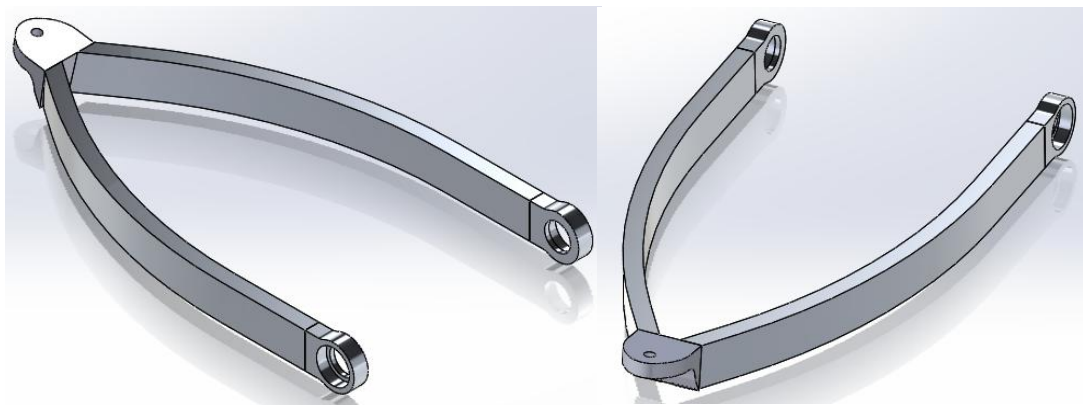


Figura 71.- Balancín de suspensión delantera ⁷⁶

El eje de giro del balancín se sitúa en una región del chasis en la zona entre el motor y las células de baterías, a la que se transmiten los esfuerzos que recibe dicho balancín.

⁷⁵ Creación propia, Solidworks® 2015

⁷⁶ Creación propia, Solidworks® 2015



9.2.2. Suspensión trasera y Basculante

La suspensión trasera se confía a un amortiguador simple que une el basculante en su parte superior al chasis. Debido a la ubicación del motor, el amortiguador se ha debido situar en la parte superior del basculante, dificultando la introducción de un sistema con bieletas.

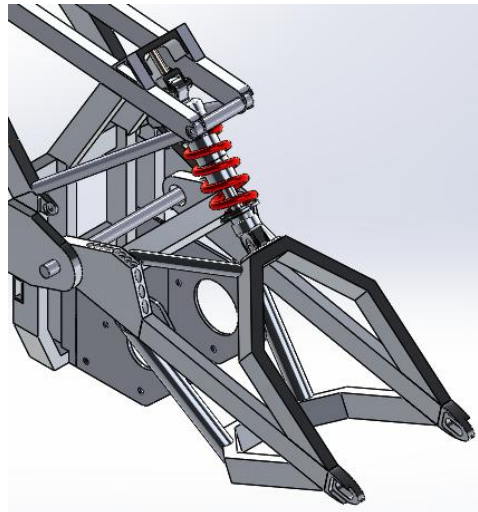


Figura 72.- Amortiguación trasera⁷⁷

Por su parte el basculante presenta un reto adicional debido a la localización del motor, muy cerca de la rueda de trasera, lo que ha obligado a buscar un diseño fuera de lo convencional, apostando por un brazo doble con doble refuerzo. Esta solución nos permite salvar el obstáculo que representa el motor, uniendo la suspensión en el refuerzo superior y aumentando la rigidez a torsión gracias al inferior.

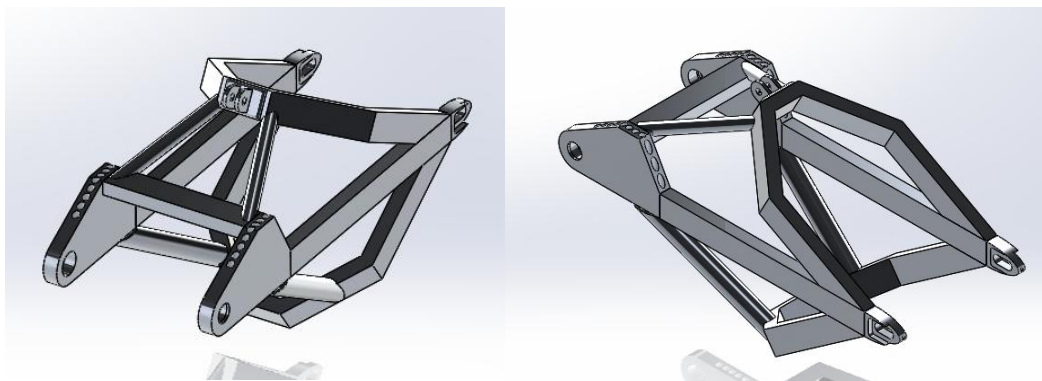


Figura 73.- Basculante⁷⁸

⁷⁷ Creación propia, Solidworks® 2015



9.2.3. Motor

El motor en la presente edición condicionará enormemente el diseño del chasis puesto que su forma circular amén de un elevado peso requieren de un replanteamiento en su ubicación con respecto a un motor de combustión interna convencional. La organización del concurso proporciona a todos los equipos el mismo motor, siendo obligatoria su utilización y quedando estrictamente prohibida su manipulación.

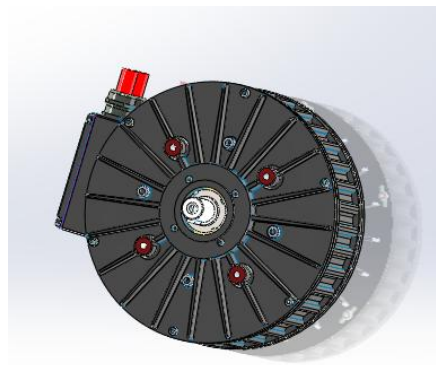


Figura 74.- Motor ⁷⁹

El motor eléctrico proporcionado en esta edición es un HEINZMANN PMS 150 - RLS , cuyas características principales son:

MOTOR HEINZMANN PMS 150 - RLS	
Tipo	AFPM Motor
Potencia nominal	13kW
Ventilación	Aire
Velocidad máxima	6.000 rpm (sin <i>field weakening</i>)
Tensión nominal	96 VDC
Intensidad nominal	153 A
Intensidad pico a motor bloqueado	550 A
Par nominal	20,7 N.m
Par pico a motor bloqueado	71 N.m

⁷⁸ Creación propia, Solidworks® 2015

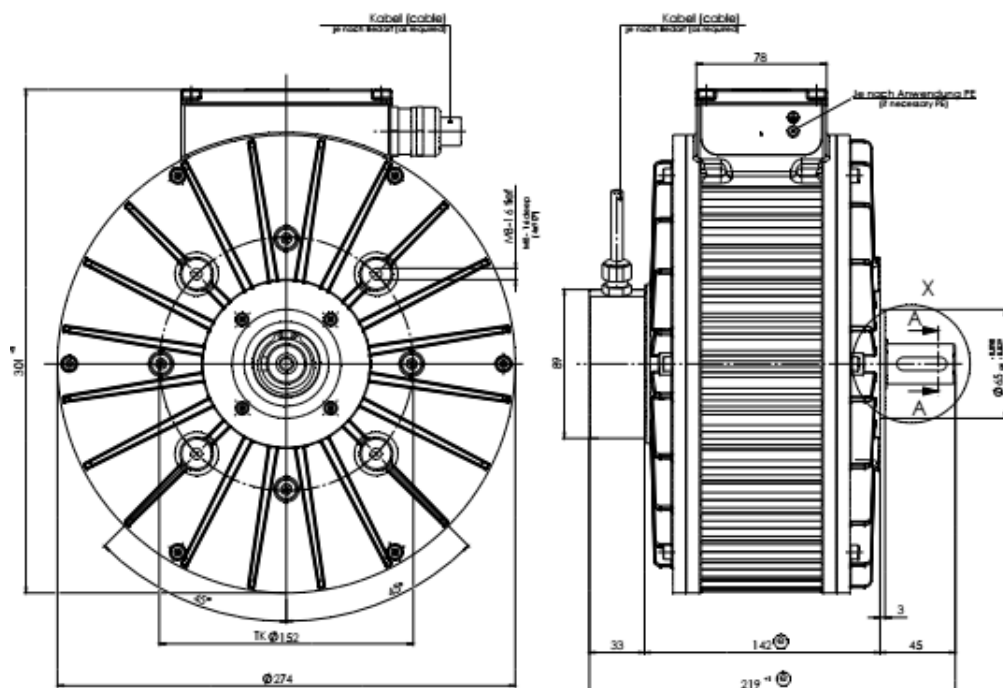
⁷⁹ Solidworks®. Diseño proporcionado por HeinzMann



Constante Motor, Ke	0,0087 V/rpm
Peso motor	22,3 kg
Encoder	RLS-RMB29AC01SS1, analógico seno-coseno, alimentación +5V (GND independiente)
Sonda de temperatura	KTY-84

Tabla 7.- Características técnicas del motor ⁸⁰

Su forma y dimensiones se pueden ver en la siguiente imagen:

Figura 75.- Planos motor ⁸¹

El motor eléctrico va sujeto al chasis en su parte trasera mediante unas placas en Aluminio 6082 T6, regulables en ángulo para conseguir el mejor ajuste de la cadena (ver figura 77)

⁸⁰ Creación propia. Datos de HeinzMann

⁸¹ HEINZMANN PMS 150 – RLS

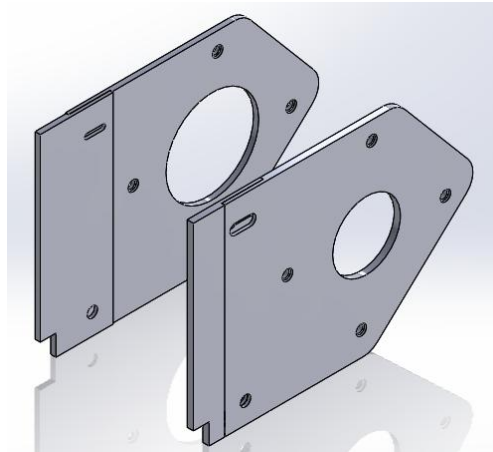


Figura 76.- Placas de motor ⁸²

9.2.4. Baterías

En el caso de una motocicleta eléctrica, una de las tareas más complicadas a la hora del diseño es la colocación de las baterías debido a su gran volumen y peso.

En nuestro caso disponemos de celdas de marca Kokam con un peso de 40 kg, por lo que comparativamente a una moto de combustión interna este paquete de baterías se asimila al motor. Es por ello que para nuestro diseño hemos hecho una variante del chasis de la edición anterior pero cambiando el motor por el paquete de baterías y haciendo las adaptaciones oportunas.

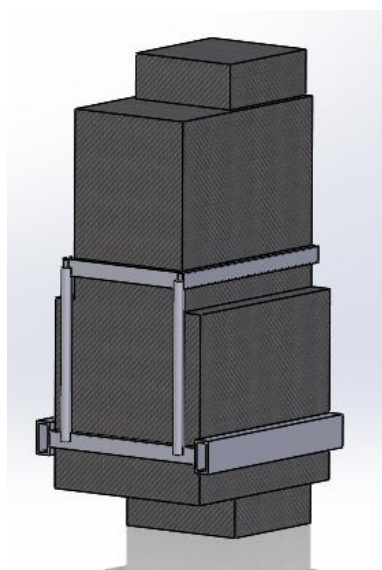


Figura 77.- Paquete de baterías ⁸³

⁸² Creación propia, Solidworks ® 2015

9.2.5. Bastidor suspendido

Con la definición de todos los elementos presentes en esta motocicleta, se llegó a la conclusión de que la mejor opción era plantear un chasis compuesto de dos bastidores unidos solidariamente.

El primer subconjunto es el que podríamos denominar interior, al que le corresponde la misión de sujetar parte de los elementos vitales de la motocicleta como son el motor, baterías y suspensión trasera, transmitiendo los esfuerzos de esta al chasis completo. Está compuesto básicamente por perfiles de Aluminio 6063 T5 en 40X20x3mm, y tubo de 20x2mm. Además lleva la unión del amortiguador trasero fabricado a partir de tocho de aluminio 6083 T6 y las placas de motor en el mismo material, como se observa en la figura siguiente:

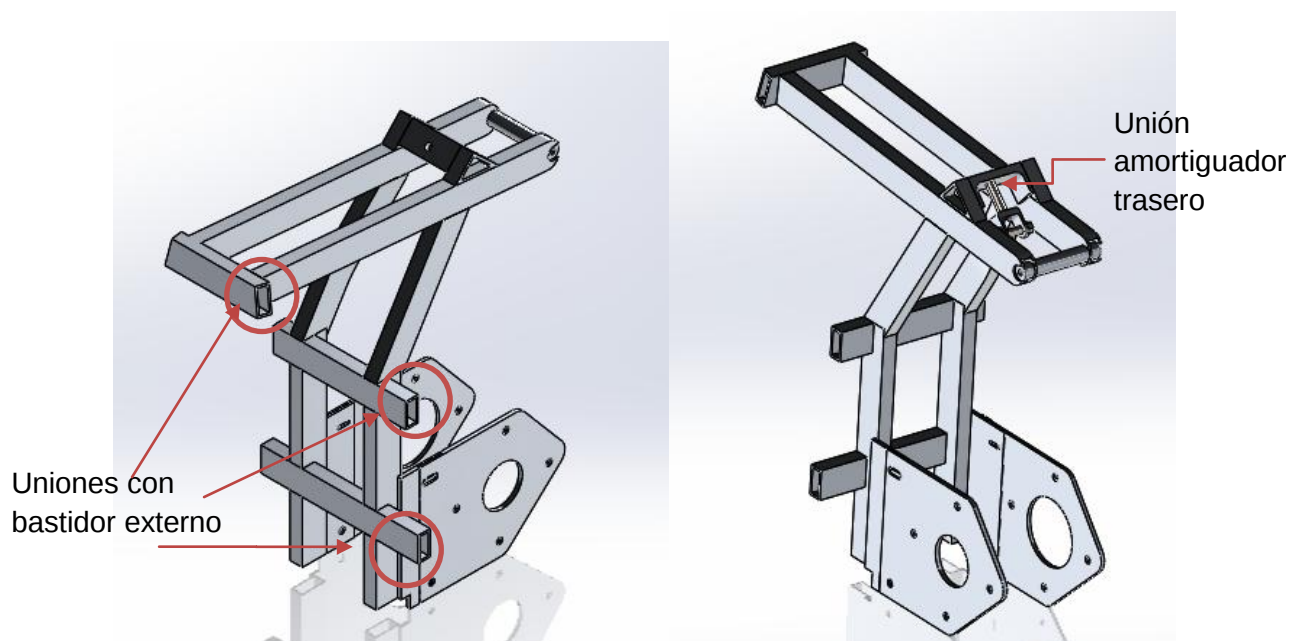


Figura 78.- Bastidor interno⁸⁴

Además si se observa la vista de este bastidor en alzado, es evidente que hay una asimetría de piezas. Esto es así debido a la necesidad de alinear el motor con los piñones y coronas.

⁸³ Creación propia, Solidworks® 2015

⁸⁴ Creación propia, Solidworks® 2015

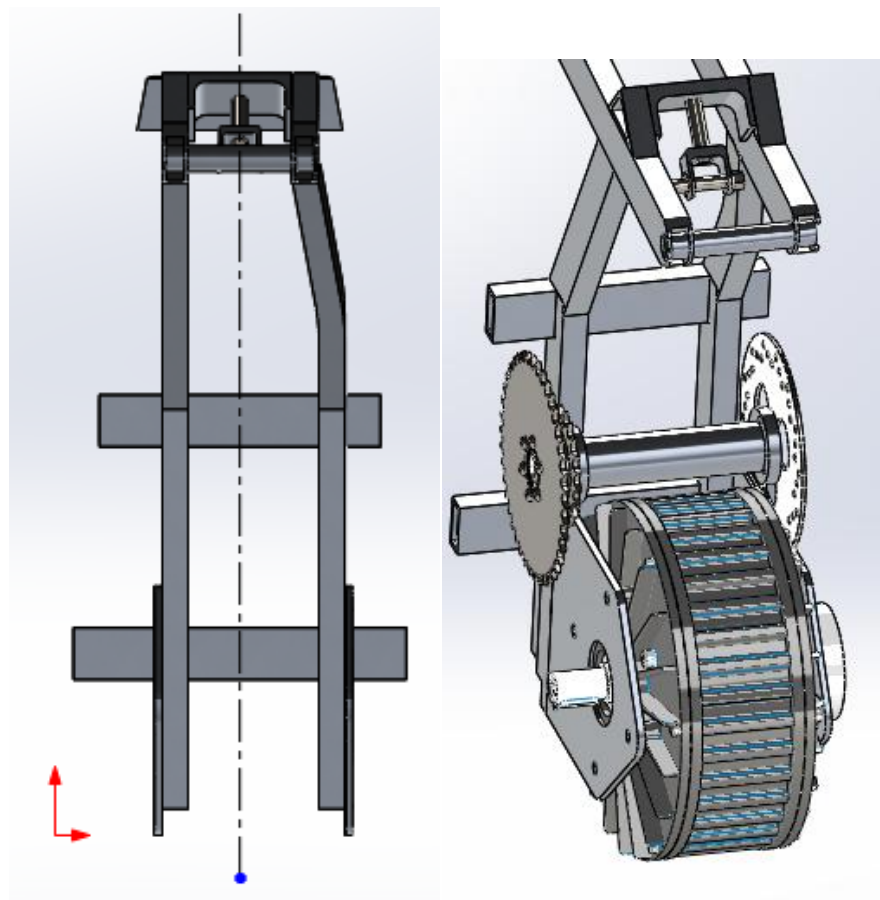


Figura 79.- a) Asimetría del bastidor interno b) Bastidor interno con motor HEINZMANN PMS 150 - RLS ⁸⁵

Todo este bastidor interno va soldado al externo en varios puntos indicados en la figura 79, conformando así un único chasis rígido. Éste es una cuna doble que se une a la tija de la horquilla en su parte superior mediante la rótula alojada en el soporte superior del chasis, y en su parte inferior cerrando el chasis. Junto con el balancín y el basculante forman la tijera de triple hoja comentada.

El bastidor externo está fabricado en su totalidad en perfil de Aluminio 6063 T5 en sección 50x20x3mm doblado y soldado junto al soporte que alberga la rótula, los nudos y las placas de anclaje del eje intermedio que serán mecanizadas en Aluminio 6082 T6.

⁸⁵ Creación propia, Solidworks® 2015

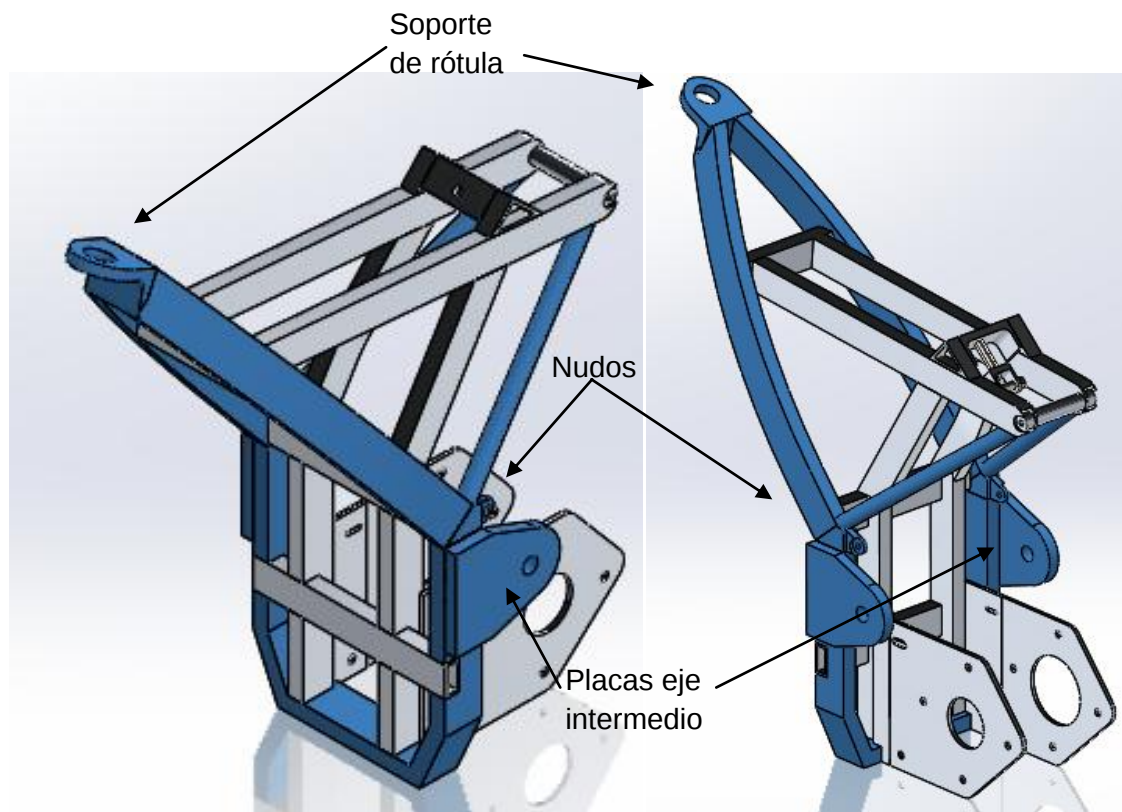
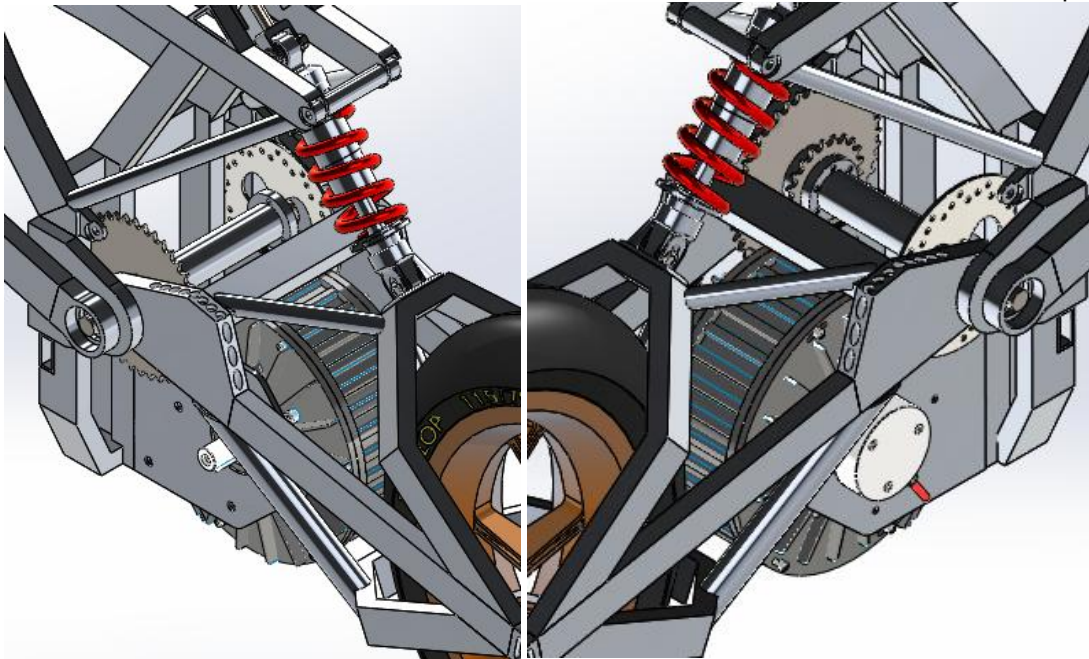
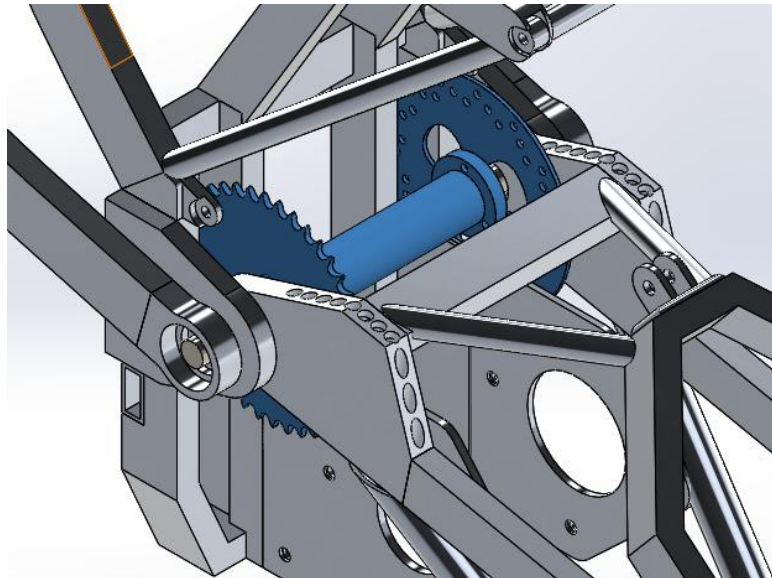


Figura 80.- Bastidor externo (sombreado en azul) ⁸⁶

El núcleo del bastidor, encargado de la función estructural básica se reduce a un único eje en su parte central que articula tanto al basculante trasero como al brazo triangular oscilante que soporta la rueda delantera.

Sobre las placas anteriormente indicadas se monta un eje transversal fijo de Acero y 20 mm de diámetro sobre el que gira otro eje este sí de Aluminio 6062 que es el encargado de transmitir el giro del motor a la rueda mediante un conjunto piñón/engranaje intercambiable. Este sistema permitirá un ajuste de relaciones de velocidades rápido dependiendo de la prueba, actuando como una falsa caja de velocidades de la que carece este tipo de motocicleta. Además se añade el freno trasero cuyo disco gira solidario al eje exterior apoyado en rodamientos, estando la pinza fijada al basculante.

⁸⁶ Creación propia, Solidworks® 2015

Figura 81- Conjunto eje intermedio ⁸⁷Figura 82.- Detalle de eje intermedio ⁸⁸

9.2.6. Subchasis

Por último queda ver el subchasis, que será una estructura conformada por tubo de Aluminio 6062 T5 en medida 20x2 mm atornillada al chasis interno en su parte superior y a los nudos del chasis externo en su parte inferior. Será el encargado de soportar el sillín y las estriberas, así que debe ser lo suficientemente

⁸⁷ Creación propia, Solidworks® 2015

⁸⁸ Creación propia, Solidworks® 2015



rígido para soportar todos los esfuerzos del piloto. Es por ello que en su parte inferior se une mediante un tubo desmontable, aumentando así la rigidez a flexión de los tubos que soportan las estribas y limitan su desplazamiento.

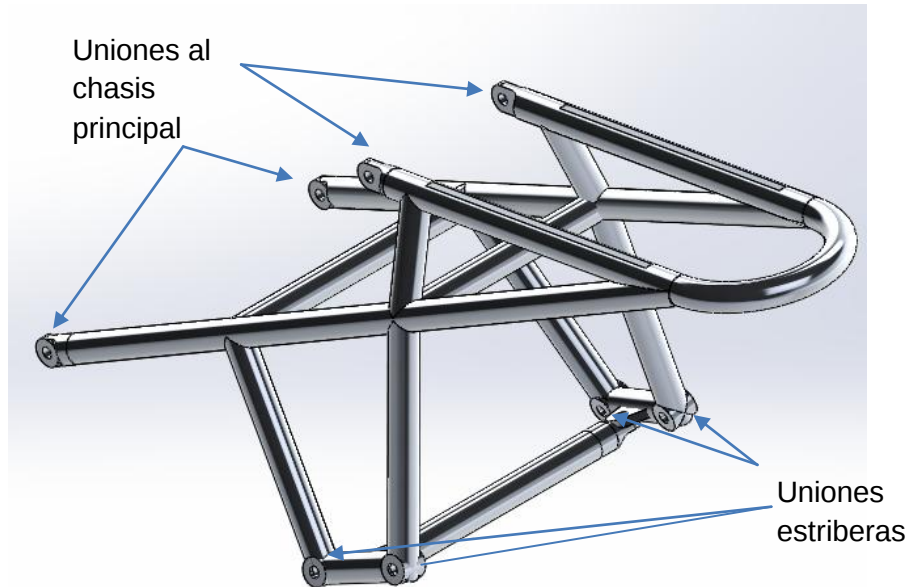


Figura 83.- Subchasis ⁸⁹

El peso total del chasis, contando como tal la conjunción de chasis interno y externo junto con el subchasis, pero sin considerar ninguna fijación (soldaduras, tornillería, rodamientos...) es de aproximadamente 9 kg. Si comparamos con el de la edición anterior supone un incremento de unos 3 kg de peso. Esto quiere decir que es más pesado, pero teniendo en cuenta que este año ni el motor ni otros elementos mecánicos actúan como elementos estructurales y las innovaciones introducidas por el hecho de contar con un propulsor eléctrico es un buen punto de partida.

Los planos del modelo al completo se pueden encontrar en el anexo II de este mismo trabajo.

⁸⁹ Creación propia, Solidworks® 2015

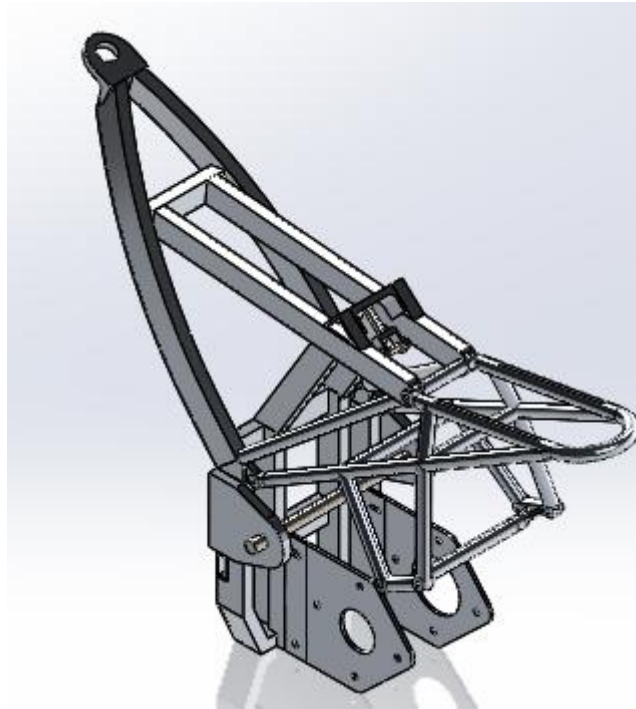


Figura 84.- Chasis interno + externo y subchasis⁹⁰

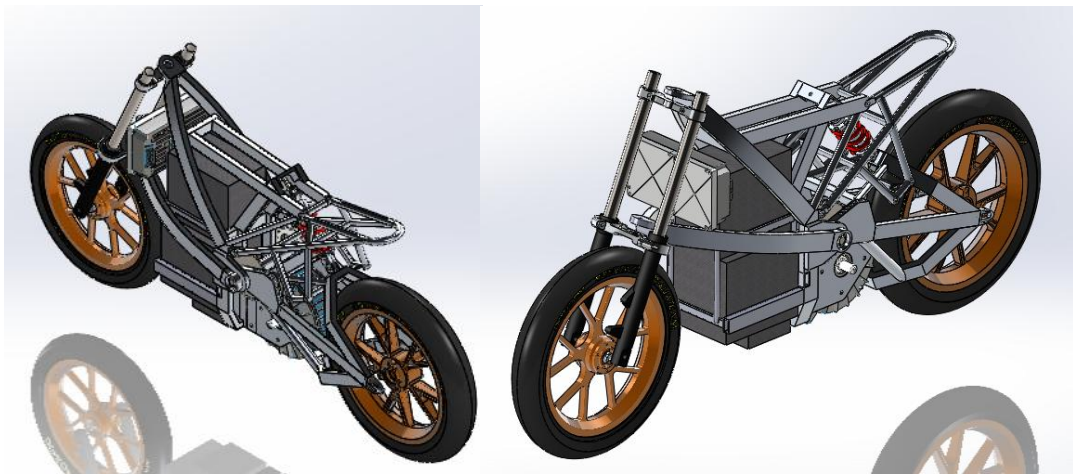


Figura 85.- Conjunto final con elementos accesorios, suspensiones, motor y baterías⁹¹

⁹⁰ Creación propia, Solidworks® 2015

⁹¹ Creación propia, Solidworks® 2015



10. Análisis Estructural Del Chasis

Con el objetivo de llevar a cabo el análisis estructural del chasis y su optimización, en este capítulo se empleará una herramienta informática que nos permita hacer simulaciones de carga. Se trata del software Abaqus® en su versión 6.14, que es un conjunto de programas informáticos (*product suite*) de simulación que aplica el método de los elementos finitos (MEF) para realizar cálculos estructurales estáticos lineales y no lineales, dinámicos incluyendo simulación de impactos, problemas de contacto de sólidos, térmicos, acoplamientos acústico-estructurales, mecánica de fluidos, piezoeléctricos y otros.



Figura 86.- Logotipo de Abaqus ®⁹²

Este software permite importar ficheros *Parasolid*, *STEP*, *ACIS*, e *IGES* tanto de piezas como de ensamblajes por lo que es compatible con el chasis realizado en *SolidWorks*® previamente. Además los resultados se pueden consultar con un postprocesador que cuenta con un entorno gráfico muy intuitivo.

10.1. El método de los elementos finitos (MEF)

El método de los elementos finitos permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Antes de ello, era obligado realizar prototipos, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que conllevaba un elevado coste económico y en tiempo de desarrollo.

Este método permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, de manera similar a un prototipo pero más fácilmente modificable y económico. No obstante no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. Así los prototipos siguen siendo necesarios, pero sólo en una

⁹² Marca registrada Abaqus®



etapa de diseño tardía, puesto que con el modelado se consigue una solución casi óptima.

El método de los elementos finitos en los últimos años ha sufrido un gran desarrollo debido a los avances informáticos, aunque su estructura básica es conocida desde hace bastante tiempo. No obstante hay que hacer un exhaustivo examen del problema en cuestión y su evaluación para estar en condiciones de garantizar que los resultados obtenidos en los análisis se ajustan a la realidad

Resumiendo, se trata de dividir un problema complejo en elementos fáciles de modelar y después obtener la solución del problema inicial componiendo las soluciones elementales

10.1.1. *Historia*

Si bien es una técnica relativamente reciente, el concepto se ha venido usando desde hace siglos. El desarrollo de los elementos finitos tal y como se conocen hoy en día ha estado ligado al cálculo estructural fundamentalmente en el campo aeroespacial. En los años 40 *Courant* propone la utilización de funciones polinómicas para la formulación de problemas elásticos en subregiones triangulares, como un método especial del método variacional de *Rayleigh-Ritz* para aproximar soluciones

Posteriormente, se introdujeron la aplicación de elementos finitos simples (barras y placas triangulares con cargas en su plano) al análisis de estructuras aeronáuticas, utilizando los conceptos de discretizado y funciones de forma

Se demuestra que las ecuaciones de los EF pueden obtenerse utilizando un método de aproximación de pesos residuales, tal como el método de *Galerkin* o el de mínimos cuadrados, lo que difundió un gran interés entre los matemáticos para la solución de ecuaciones diferenciales lineales y no lineales mediante el MEF. Es por ello que hoy en día el MEF está considerado como una de las herramientas más potentes y probadas para la solución de problemas de ingeniería y ciencia aplicada.

Actualmente los ordenadores han aportado el medio eficaz de resolver la multitud de ecuaciones que se plantean en el MEF, cuyo desarrollo práctico ha ido

caminando parejo de las innovaciones obtenidas en el campo de la arquitectura de los ordenadores. Hoy en día ya se concibe la conexión inteligente entre las técnicas de análisis estructural, las técnicas de diseño (CAD), y las técnicas de fabricación.

10.1.2. Ecuaciones

Las ecuaciones generales empleadas se basan en formulación fuerte o débil y la ecuación de rigidez. Veamos cada una de ellas en detalle:

1. Formulación fuerte y débil.

Si se considera un caso sencillo de una barra empotrada de material continuo sometida a carga axial como en la figura:

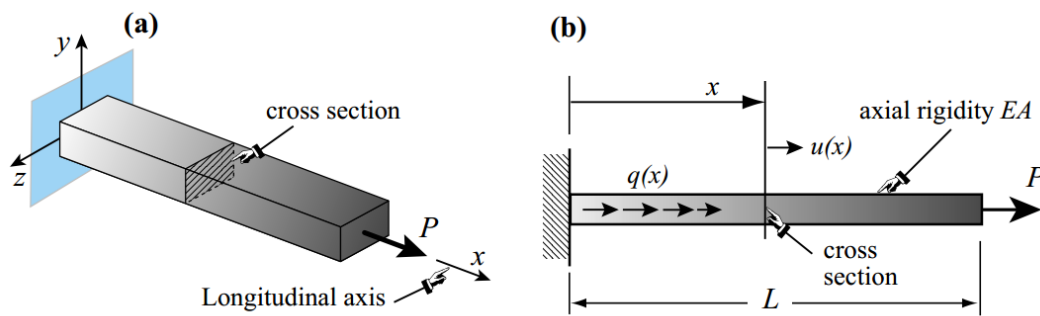


Figura 87.- Barra empotrada/extremo libre. a) Vista 3D. b) Vista 2D.⁹³

La energía potencial total de la barra viene dada por:

$$\Pi = U - W \quad (10.1.)$$

Siendo U la energía interna:

$$U = \frac{1}{2} \int_V \sigma e \, dV = \frac{1}{2} \int_0^L F e \, dx \quad (10.2.)$$

Donde :

⁹³ "Introduction to Finite Element Methods". Department of Aerospace Engineering Sciences (University of Colorado at Boulder).
Web: <http://www.colorado.edu/engineering/cas/courses.d/IFEM.d/>



- σ : Tensión
- e : Deformación
- F : Fuerza

Por otro lado W es el trabajo de las fuerzas exteriores:

$$W = \int q u dx \quad (10.3.)$$

Donde :

- q : Tensión
- u : Desplazamiento
- Sustituyendo en la fórmula 9.1.:

$$\Pi = \int_0^L F e dx - \int q u dx \quad (10.4.)$$

La energía potencial total de la barra depende del desplazamiento axial $u(x)$. En el cálculo variacional, esta es conocida como variable primaria. Una vez conocida dicha incógnita, pueden obtenerse el resto de variables empleando las ecuaciones de cinemática, constitutiva y de equilibrio.

El principio de Mínima Energía Potencial Total dice que el valor de $u(x)$ que satisface las ecuaciones de gobierno es aquel que hace Π estacionaria, obteniendo la ecuación variacional fuerte:

$$\delta \Pi = \delta U - \delta W = 0 \quad (10.5.)$$

Si se reemplaza el material continuo por un modelo discreto formado por la unión de elementos barra se obtiene la formulación débil de *Galerkin*:

$$\delta \Pi^e = \delta U^e - \delta W^e = 0 \quad (10.6.)$$

Donde el subíndice e representa a cada uno de los elementos que componen la barra.



La ecuación variacional anterior es la base para la derivación de las ecuaciones de rigidez de los elementos.

2. Ecuación de rigidez

El proceso de discretización basado en el Teorema de la Energía Potencial lleva a la siguiente forma:

$$\Pi^e = U^e - W^e \quad (10.7.)$$

Donde

$$U^e = \frac{1}{2} (u^e)^T K^e u^e \quad (10.8.)$$

Y

$$W^e = (u^e)^T f^e \quad (10.9.)$$

Siendo K^e y f^e la matriz de rigidez y el vector de fuerzas nodales del elemento respectivamente. Los tres escalares Π^e , U^e y W^e son funciones del desplazamiento u^e , que era la variable primaria. Tomando la variación de Π^e con respecto a los desplazamientos nodales se tiene:

$$\delta \Pi^e = (\delta u^e)^T \frac{\delta \Pi^e}{\delta y^e} = (\delta u^e)^T [K^e u^e - f^e] = 0 \quad (10.10.)$$

Lo que permite enunciar la ecuación de la rigidez:

$$K^e u^e = f^e \quad (10.11.)$$

La forma de K^e y f^e depende del tipo de elemento finito que se emplee en el análisis, que a su vez dependerá del programa comercial que se utilice.

Obtenidos los desplazamientos nodales mediante la *ecuación de rigidez* pueden obtenerse el resto de variables mediante las ecuaciones de gobierno.



10.1.3. *Etapas básicas en la utilización del método de los elementos finitos.*

El análisis mediante el MEF sigue los siguientes pasos:

1. Definición del problema y su dominio.

El análisis de cualquier problema tiene implícito tres tipos de aproximaciones: la definición del dominio (física y geoméricamente), la discretización de las ecuaciones y los algoritmos empleados en la solución del sistema de ecuaciones algebraicas simultáneas resultante.

La definición geométrica del dominio requiere el establecimiento de ejes coordenados globales en referencia a los cuales se describen las coordenadas de ciertos puntos llamados nodos que definen las ecuaciones de las líneas, superficies y volumen de los elementos. No necesita ser rectangular y cartesiano.

El dominio puede ser limitado o no. Para regiones limitadas la idealización se realiza mediante elementos finitos, usando elementos infinitos o de contorno en caso contrario. A veces el dominio está constituido por subdominios. Las condiciones de interfaz entre subdominios deben ser definidas antes de la discretización.

2. Discretización del dominio.

Las ecuaciones gobernantes de un problema son válidas en todo el dominio cuando es continuo, lo que permite idealizar el dominio a través de regiones de tamaño finito. Esta forma de discretizar introduce ciertas aproximaciones. Sin embargo colocando un número suficiente de elementos se puede reproducir el dominio con tanta aproximación como se quiera.

De este modo hay que conseguir un equilibrio entre un número suficiente de elementos que arrojen buenos resultados sin tener un refinamiento excesivo que conduzca a grandes ecuaciones. Para ello se pueden usar procesos adaptativos o refinamientos de mallas y generación automática de estas.

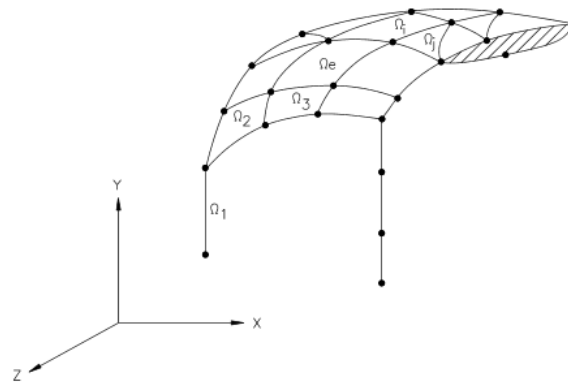


Figura 88.- Discretización del dominio con diferentes elementos finitos ⁹⁴

3. Identificación de la(s) variable(s) de estado.

Para cada problema en particular la descripción matemática del fenómeno físico conducirá a un problema de valor de contorno que contendrá las variables de estado asociadas al mismo. Estas variables se relacionarán entre sí a través de las ecuaciones constitutivas que representan una expresión matemática de una ley física en particular.

4. Formulación del problema.

Un problema físico puede estar formulado a través de un conjunto de ecuaciones diferenciales con sus correspondientes condiciones de contorno o mediante una ecuación integral sujeta a un requerimiento estacionario (máximo o mínimo). En el primer caso se dice que está referido a su forma diferencial y en el segundo a su forma variacional. En ambos casos se llega al mismo resultado.

5. Establecimiento de los sistemas de referencia.

Existen dos razones para seleccionar un sistema de referencia local aparte de los ejes globales del sistema completo: la facilidad con la que se construyen las llamadas funciones de forma de los elementos y la facilidad con la que se integra en el interior de los mismos con respecto al sistema local de cada elemento. Sin embargo este paso introduce una transformación de coordenadas.

⁹⁴ El método de los elementos finitos: una introducción. Zeferino da Fonseca (2011)

A pesar de que todos los cálculos se pueden realizar en el sistema global, este procedimiento es muy complicado para cualquier problema de interés práctico y puesto que la transformación de coordenadas está bien definida y es una operación sencilla, se deben deducir las ecuaciones de los elementos con relación a su sistema local de referencia que puede ser cartesiano o curvilíneo. En la siguiente figura se muestra un elemento bidimensional y los sistemas global y local de referencia.

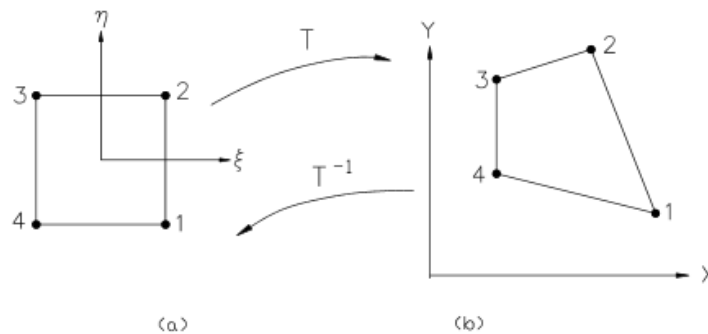


Figura 89.- Sistema de referencia usados en el método de los elementos finitos. a) Sistema local de referencia y b) sistema global de referencia ⁹⁵

6. Construcción de las funciones de aproximación de los elementos.

La aproximación tanto del dominio del problema como de las variables involucradas se realiza mediante funciones algebraicas. Si el elemento es plano o de lados rectos, las coordenadas de los nodos primarios definirán la forma exacta del mismo, por lo que la discretización suele hacerse muchas veces mediante elementos de lados rectos. Sin embargo para algunos problemas estos elementos pueden producir errores inaceptables y debe hacerse con elementos de orden superior.

El argumento anterior es válido también para la aproximación de las variables de estado, ya que pueden aproximarse mediante una función lineal o a través de funciones de orden superior. Se debe decidir si la aproximación y la geométrica tienen el mismo dominio o no, lo cual conduce a tres categorías diferentes de elementos. De esta manera si m representa el grado de aproximación para la forma de los elementos y n el de la variable de esta, puede ocurrir que $m < n$ siendo el elemento subparamétrico; isoparamétrico si $m = n$ y superparamétrico si $m > n$.

⁹⁵ El método de los elementos finitos: una introducción. Zeferino da Fonseca (2011)



7. Determinación de las ecuaciones a nivel de cada elemento.

En esta etapa el modelaje del problema se ha completado. Usado un modelo matemático apropiado se debe establecer a continuación las ecuaciones discretas del problema continuo sobre cada elemento. Esto involucra la determinación de la *matriz de rigidez* de cada elemento con respecto a su sistema local de referencia, como por ejemplo en un problema de mecánica de sólidos, los desplazamientos nodales con las fuerza nodales. Este paso involucra la consideración de las ecuaciones constitutivas y el uso de la integración numérica.

8. Transformación de coordenadas.

Determinadas las matrices de rigidez de todos los elementos que conforman la discretización del dominio y antes del ensamblaje de todas las matrices es necesario realizar la transformación de coordenadas que permita transformar las matrices de rigidez de los elementos, desde sus respectivos ejes coordenados locales, al sistema global de referencia.

9. Ensamblaje de las ecuaciones de los elementos.

El ensamblaje de las matrices de las ecuaciones de los elementos se realiza de acuerdo con la configuración topológica de los mismos, después de que estas han sido transformadas al sistema global de referencia. Dicha configuración se obtiene a través del establecimiento de una relación entre la numeración local de los nodos y la numeración global. El ensamblaje se efectúa considerando los nodos de las interfaces y a la matriz resultante se la denomina matriz global del sistema.

10. Introducción de las condiciones de contorno.

Aquí se introducen las condiciones de contorno en la matriz global del sistema, con lo cual la matriz se podrá reducir o condensar a su forma final aunque en algunos casos se prefiera dejar el sistema con su tamaño global para no añadir nuevos algoritmos. No obstante hay algunos algoritmos que permiten reducir el tiempo de ejecución y la memoria requerida, pero son difíciles de implementar.



Los valores prescritos de la función en los contornos son las llamadas condiciones de contorno esenciales. Estos valores son usualmente cero o constantes (equivalentes a especificar velocidades, desplazamientos... en las cargas) o como una función de la carga en el caso de soportes elásticos que aparecen en algunos problemas de la mecánica de sólidos.

11. Solución del conjunto de ecuaciones simultáneas resultante.

El paso final lo constituye la resolución del sistema de ecuaciones simultáneas resultante. Los procedimientos de solución se pueden clasificar en dos grupos:

- Métodos directos, como los de *Gauss* y de factorización de *Cholesky*, que son los más utilizados para sistemas de ecuaciones pequeños o moderados.
- Métodos iterativos, como el de *Jacobi* que son mas apropiados para sistemas de grandes órdenes. En estos métodos el tiempo de solución es menor que en los directos. Sin embargo no son adecuados en problemas con múltiples sistemas de cargas.

12. Interpretación de los resultados.

Con la resolución del sistema de ecuaciones se obtienen los valores aproximados de las variables en los nodos del dominio. Generalmente estos valores son interpretados y usados en el cálculo de otras cantidades físicas en todo el dominio o en parte del mismo. Estos cálculos se conocen como post-procesamiento.

La comparación de los resultados obtenidos con la evidencia experimental es una de las tareas más importantes del MEF. Para saber cuales resultados son buenos se requiere la estimación del error y para saber qué hacer con ellos hay que tener en cuenta la naturaleza física del problema. Lo anterior ayudará a decidir si el análisis es válido o si se requiere la repetición de algunos de los pasos anteriores. No obstante se pueden obtener resultados fiables comparando diferentes análisis del mismo problema basados en diferentes discretizaciones. A su vez los procesos adaptativos y la generación automática de mallas permiten incrementar la exactitud de un problema una vez estimado el error del análisis inicial.



10.2. Análisis general del chasis

Se inicia ahora el análisis del chasis con el software Abaqus®, describiendo a continuación los pasos seguidos.

- *PART*

En el paso anterior de modelado se ha conseguido una geometría en formato .SLDASM que es un documento de ensamblaje de Solidworks® que a su vez está constituido por elementos .SLDPRT que son partes. Sin embargo Abaqus® no soporta este tipo de archivos, por lo que lo primero que se debe hacer es convertir dichos archivos a formatos como STEP o IGS.

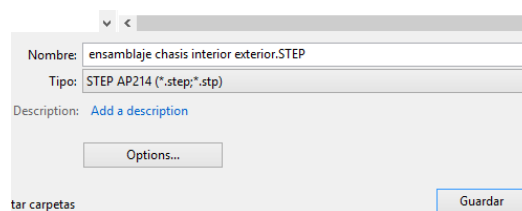


Figura 90.- Exportado de Solidworks como .STEP ⁹⁶

En esta ocasión se exportará como .STEP. Hecho esto, ya se puede importar a Abaqus®. Para ello sólo basta con abrir el software Abaqus y seleccionar Import>Part. Se acepta el archivo en cuestión y aparece una ventana que da opción de importar como ensamblaje o de combinar todas las piezas como si se tratara de una sola. Debido a que realmente todas las piezas se van a soldar en el modelo final, se selecciona esta opción.

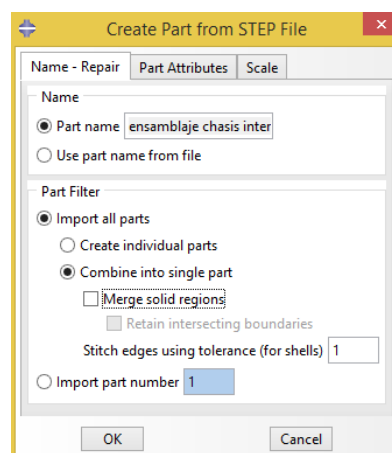
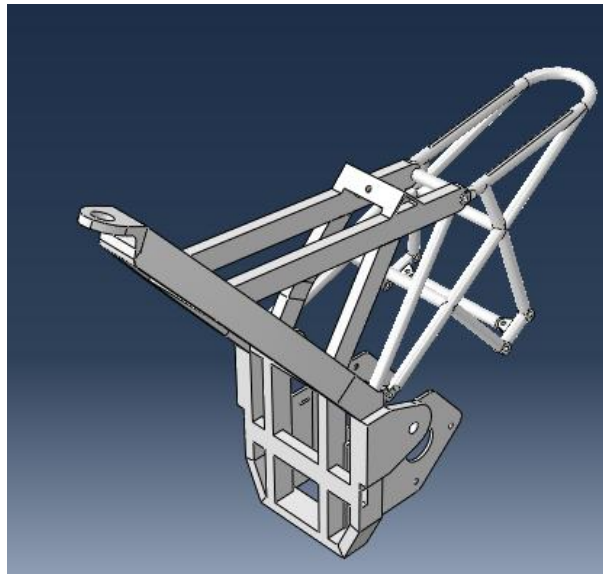


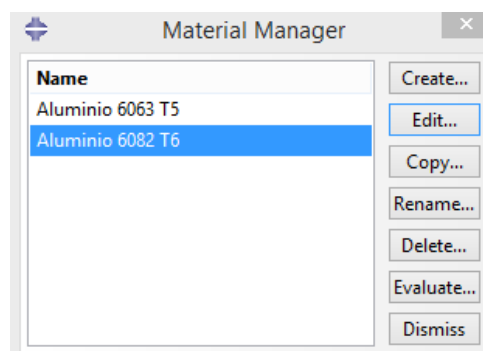
Figura 91.- Importar archivo en Abaqus® ⁹⁷

⁹⁶ Abaqus® 6-14

Figura 92.- Estructura importada⁹⁸

- *PROPERTY*

Acto seguido se definen los materiales de los que se van a dotar los elementos mediante el comando *Property*, que como especificado en el proceso de modelado serán Aluminios 6062 T5 y Aluminios 6083 T6, introduciendo manualmente dichas especificaciones:

Figura 93.- Editor materiales⁹⁹

La estructura se considera que falla si se exceda el límite elástico del aluminio 6063 T5 en las piezas fabricadas en tal material, que es de 145 MPa. Para las piezas fabricadas en 6082 T6 se considerará que incumple si supera los 250 MPa. Es por ello que se realiza solamente un análisis elástico lineal.

⁹⁷ Abaqus® 6.14

⁹⁸ Abaqus® 6.14

⁹⁹ Abaqus 6.14



Una vez definidos los materiales se crean las secciones homogéneas con ellas y se aplican sobre la estructura.

Como el chasis no es una estructura aislada, sino que se encuentra sometido a la acción de otros elementos, a fin de simular esta interacción se hace un símil de suspensión delantera mediante elementos de tipo viga con un radio de 30mm, y un material de alto límite elástico para conseguir que estos elementos se comporte de una manera lo más rígida posible y transmitan al chasis las cargas especificadas:

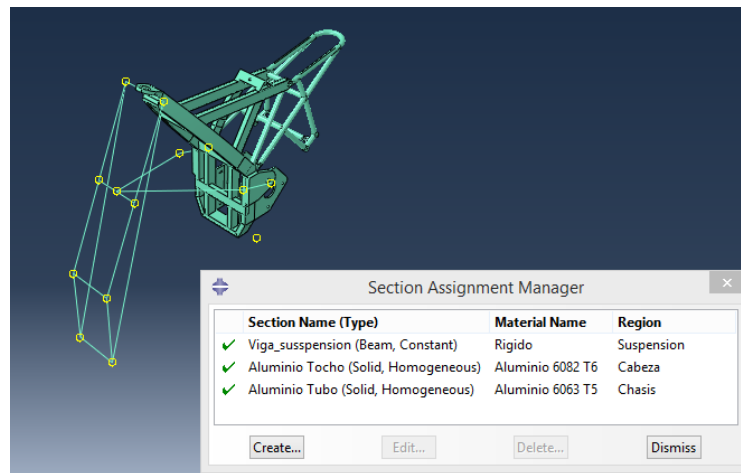


Figura 94.- Aplicación de material a la estructura¹⁰⁰

- **ASSEMBLY**

El siguiente paso en el módulo *Assembly* se crea una instancia, que en este caso comprende la estructura completa.

¹⁰⁰ Abaqus® 6.14

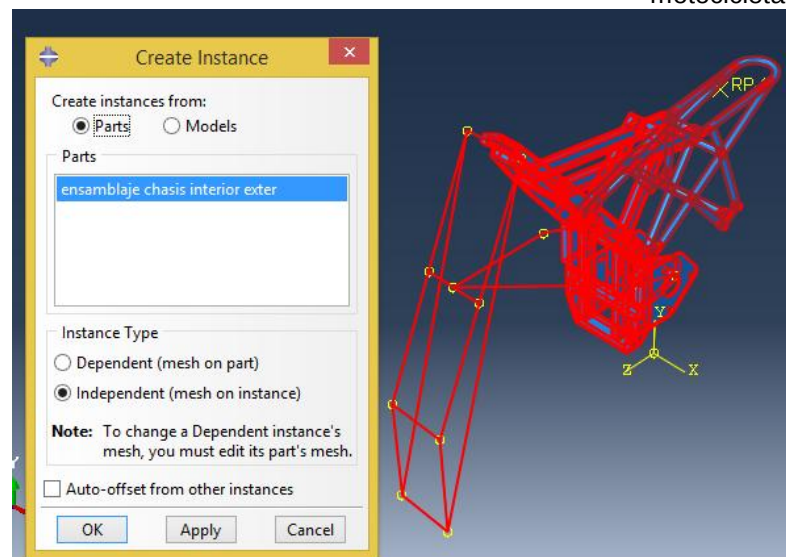


Figura 95.- Creación instancia¹⁰¹

- STEP

En el módulo *Step* se refleja el paso en el que se va a aplicar la carga. Por defecto viene creado el *Step Initial*, en el que se definirán las condiciones de contorno. Por ello se creará uno adicional en el que se apliquen las cargas consideradas. Este será de tipo estático y general, así pues el material se comportará de manera elástica y lineal.

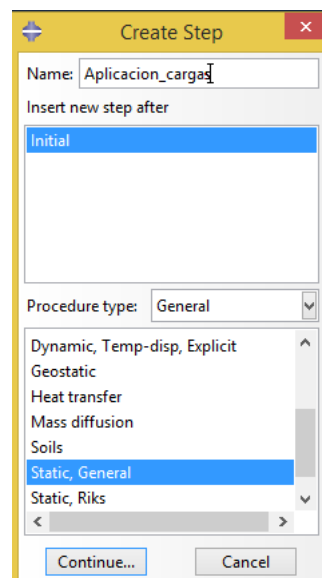


Figura 96.- Step de aplicación de cargas¹⁰²

¹⁰¹ Abaqus® 6.14

¹⁰² Abaqus® 6.14



- *INTERACTION*

El módulo siguiente *Interaction* es quizás el más importante, puesto que en él se definirán los puntos que interaccionan con el chasis completo. De una correcta elección de estos depende que las cargas aplicadas interactúen correctamente con la estructura.

Consistirán en elegir los puntos sobre los que se aplican las cargas según visto en el apartado 8, introduciendo las coordendas correspondientes mediante *Reference Point*. Es por ello que dependerá de la situación que se esté considerando. No obstante todos estos puntos tienen en común que se unen al chasis mediante restricciones del tipo *Coupling*, *Continuum distributing*, que están ideadas para la transmisión de fuerza.

Estos puntos se unen a la estructura de forma que se restrinjan los desplazamientos en los tres ejes de coordenadas y haciendo lo propio con el giro, que sólo se dejará libre en el eje X.

Las restricciones anteriores se consideran sólo para los puntos de unión entre elementos de carrocería. Para fijar el chasis a un sistema de referencia externa se usarán en cada caso los grados de libertad que correspondan.

Los puntos y sus superficies de restricción se muestran en la figura siguiente:

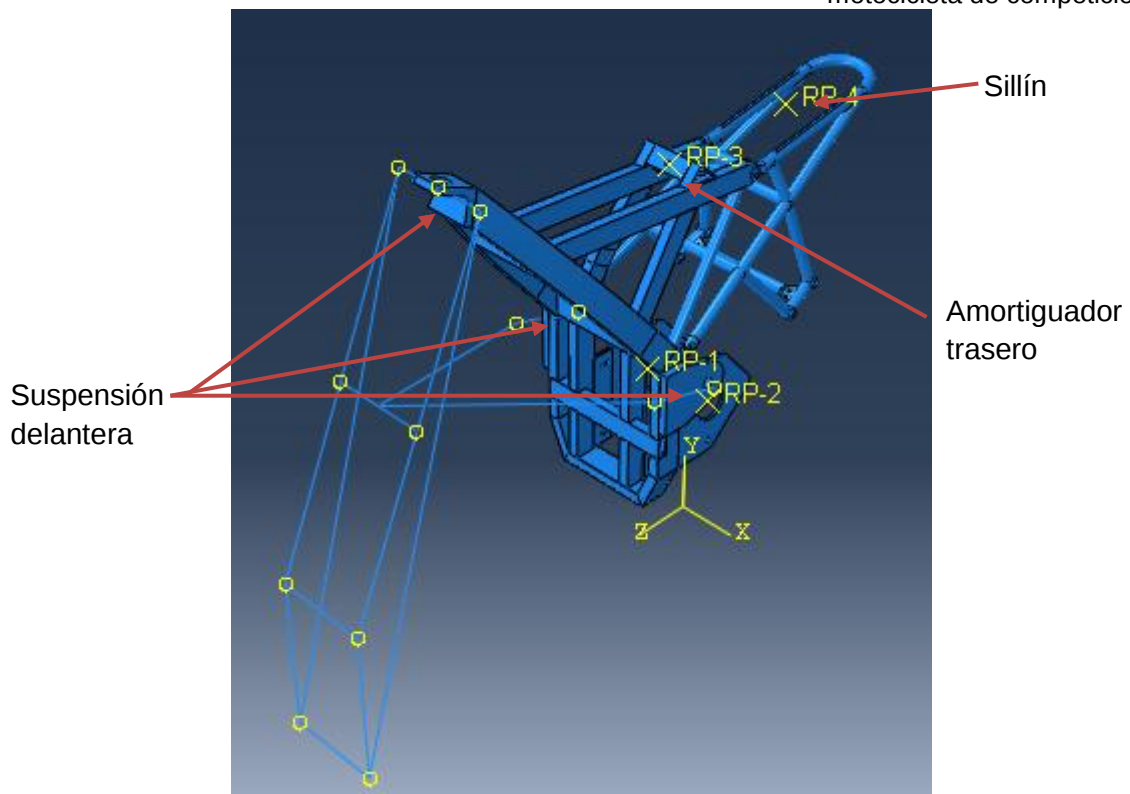


Figura 97.- Puntos de restricción y aplicación de cargas ¹⁰³

- **LOAD**

En este paso se establecen la cantidad y lugar de aplicación de las cargas. Para ello, basta echar un vistazo al apartado 8 de este documento donde se describen las situaciones a las que va a ser sometida la motocicleta, esto es, a frenada máxima, paso por curva y prueba estática en prensa.

A ellas, también hay que sumar las fuerzas del propio peso del piloto aplicado sobre el sillín, del motor sobre sus anclajes y baterías sobre el chasis, siendo sus valores:

$$F_p = m_p g = 75 \text{ kg } 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 735.75 \text{ N} \quad (10.12)$$

$$F_m = m_m g = 25 \text{ kg } 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 245 \text{ N} \quad (10.13)$$

$$F_b = m_b g = 40 \text{ kg } 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 392.4 \text{ N} \quad (10.14)$$

¹⁰³ Abaqus® 6.14

Frenada máxima y paso por curva

Por simplificar, las situaciones de frenada máxima y paso por curva se unirán en una, puesto que normalmente en la realidad una frenada a fondo suele venir precedida, cuando no solapada, con un inicio de viraje. Así pues se considera este como el caso más desfavorable, actuando tanto fuerzas longitudinales como laterales:

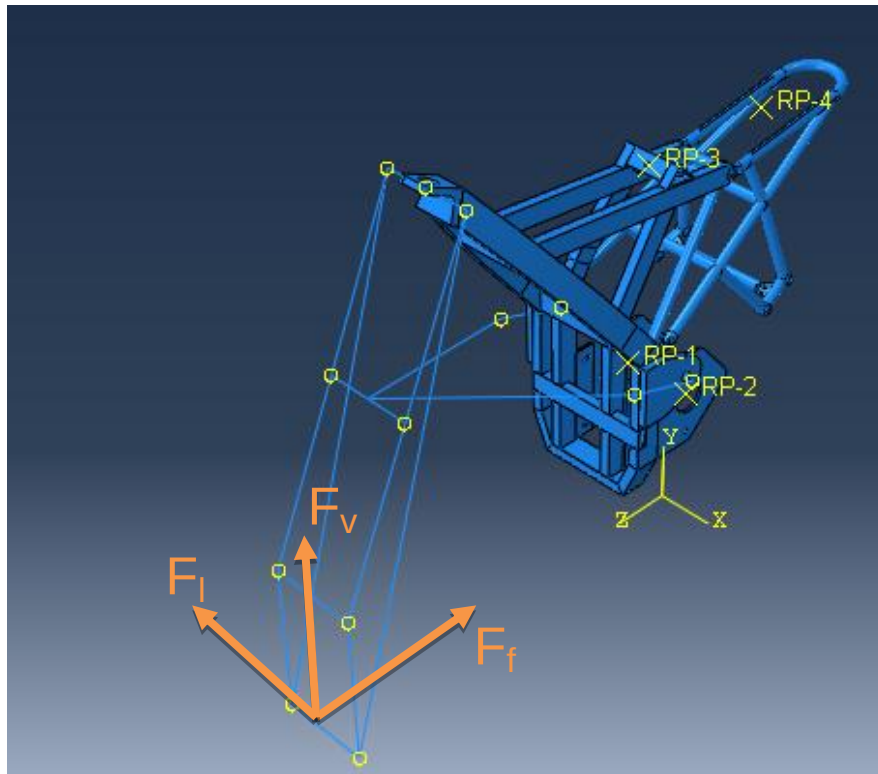


Figura 98.-Cargas en frenada máxima + lateral ¹⁰⁴

Como se dijo anteriormente, en una frenada máxima, se considera que todo el peso se desplaza hacia la rueda delantera, levantándose la rueda trasera del asfalto y como consecuencia la reacción vertical en esta se hace cero. Por ello todo el peso del conjunto recae sobre la rueda delantera. Así pues la reacción vertical será:

$$F_v = m_T g C_s = 170 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1.5 = 2502 \text{ N} \quad (10.15)$$

La fuerza de fricción, considerando una fuerza de deceleración según visto en el apartado 8 de 1G, tendrá como valor el mismo que la fuerza vertical, es decir:

¹⁰⁴ Creación propia en Abaqus® 6.14



$$F_f = m_T G C_s = 170 \text{ kg } 1 \text{ } 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 1.5 = 2502 \text{ N} \quad (10.16)$$

La fuerza lateral también se calculó previamente, arrojando un valor de aceleración centrípeta de 0.66G, por lo que:

$$F_l = 0.66 m_T g C_s = 0.66 \text{ } 170 \text{ kg } 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 1.5 = 1668 \text{ N} \quad (10.17)$$

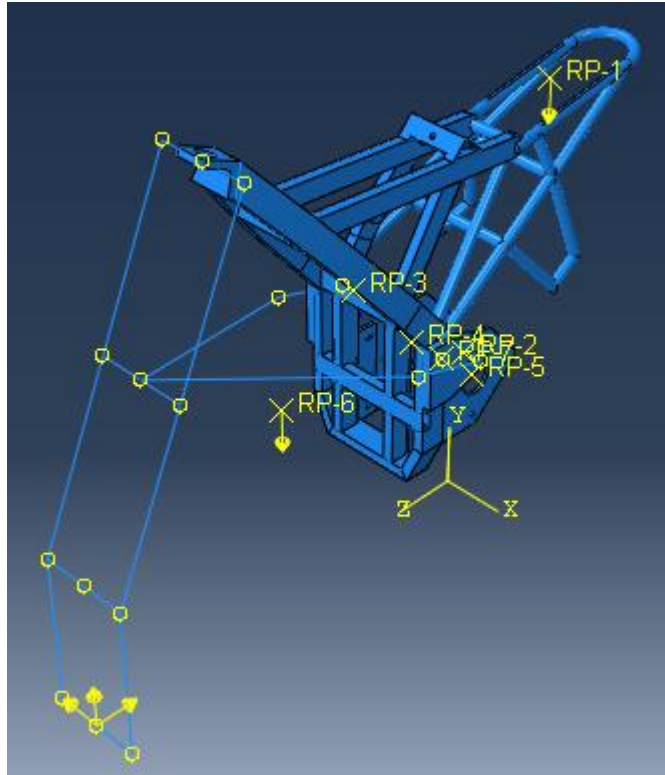


Figura 99.- Aplicación de cargas en frenada máxima + lateral ¹⁰⁵

Por último hay que definir unos puntos como condicones de contorno. Para ello se aplica una *Boundary condition* del tipo articulado articulado que restringe los movimientos en los tres ejes y giro limitado a 7.5° en torno al eje X en las las uniones del eje intermedio, puesto que en su eje interno se fija el basculante y el balancín de la suspensión trasera, además del freno trasero. El giro limitado lo impone el balancin delantero y el recorrido de la horquilla, que se supone de 80mm en compresión.

¹⁰⁵ Creación propia en Abaqus® 6.14

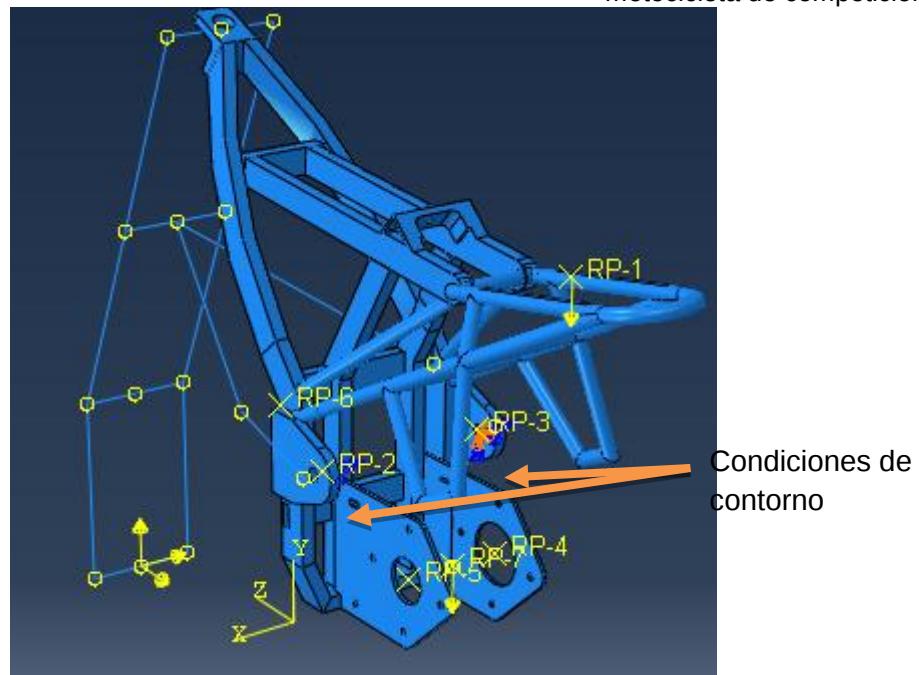


Figura 100.- Condiciones de contorno en frenada máxima ¹⁰⁶

Prueba estática en banco

Esta se definió también anteriormente en el apartado 8, siendo requisito indispensable superarla con éxito para conseguir la homologación por parte de la organización.

Según la normativa de MotoStudent, la cual se puede consultar en el anexo I a este documento, la motocicleta es colocada en un banco de prueba en reposo total. Seguidamente se introducen dos fuerzas simultáneamente. La primera es horizontal con un valor de 300 kg en sentido de la marcha sobre la rueda delantera. La segunda es una carga vertical aplicada en el sillín, sobre el subchasis, y de 250 kg de valor:

¹⁰⁶ Creación propia en Abaqus® 6.14

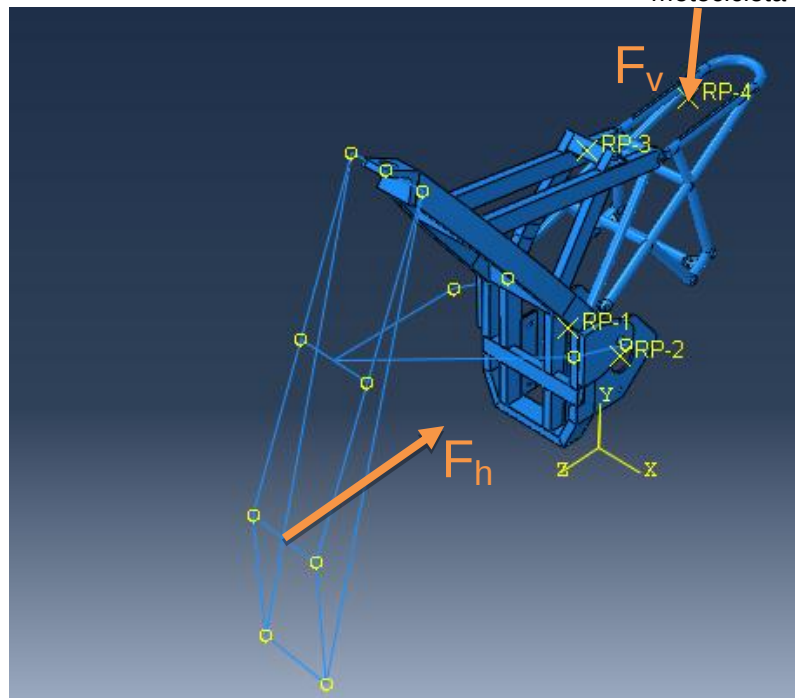


Figura 101.- Cargas en prueba estática en prensa ¹⁰⁷

Los valores de dichas cargas serán de:

$$F_h = 300 \text{ kg } g = 2943 \text{ N} \quad (10.18)$$

$$F_v = 250 \text{ kg } g = 2452.5 \text{ N} \quad (10.19)$$

Como en la parte trasera la rueda también está sujeta contra la prensa, ésta transmite al chasis una fuerza a través del baculante y a su vez al amortiguador trasero. Esta estructura se ha vuelto a simular como en el caso anterior a base de una estructura de vigas infinitamente rígidas:

¹⁰⁷ Creación propia en Abaqus® 6.14

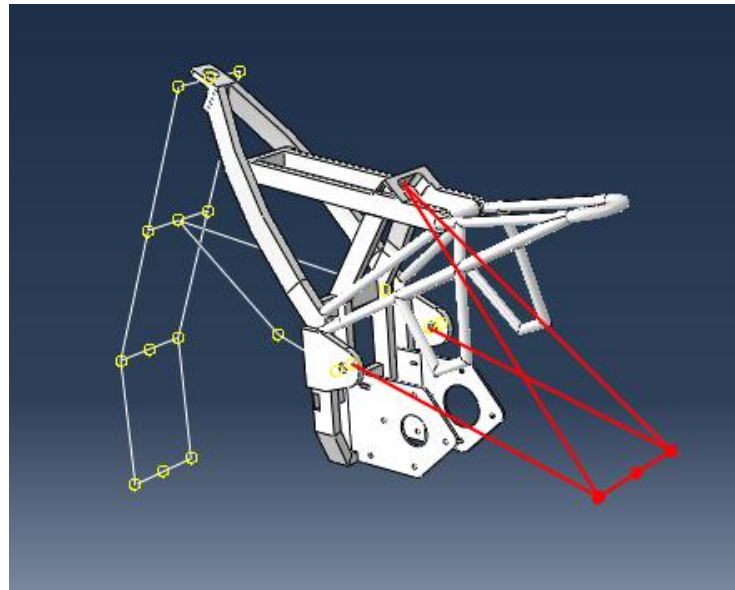


Figura 102.- Estructura suspensión trasera ¹⁰⁸

En este caso como condiciones de contorno los puntos van a ser el eje de la rueda delantera como una articulación que puede moverse libremente en el eje Z, y una articulación en el eje de la rueda trasera que restringe el movimiento en los tres ejes, no así el giro. A continuación se presentan las fuerzas y las condiciones de contorno:

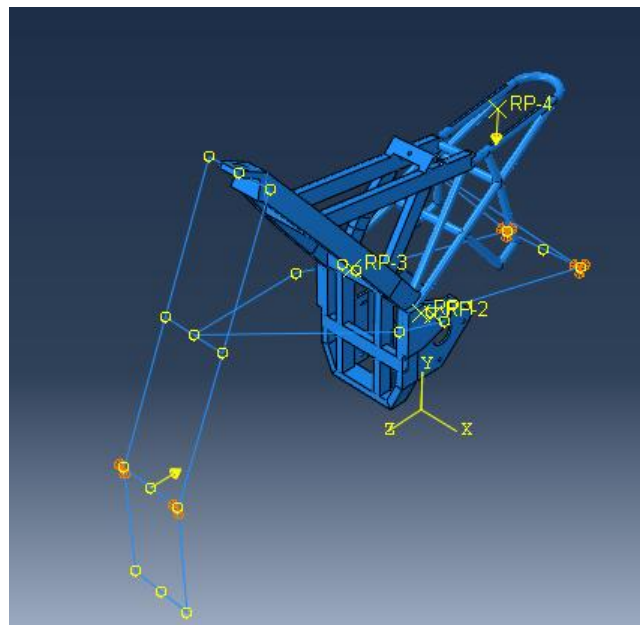


Figura 103.- Condiciones de contorno en fuerzas para prueba estática en banco ¹⁰⁹

¹⁰⁸ Creación propia en Abaqus® 6.14

¹⁰⁹ Creación propia en Abaqus® 6.14

- *MESH*

En este paso se produce el mallado del modelo. Para ello, se empleará un tipo de discretizado a base de tetrahedros cuadráticos de 10 nodos. A su vez, el tamaño de cada elemento será de 6 unidades:

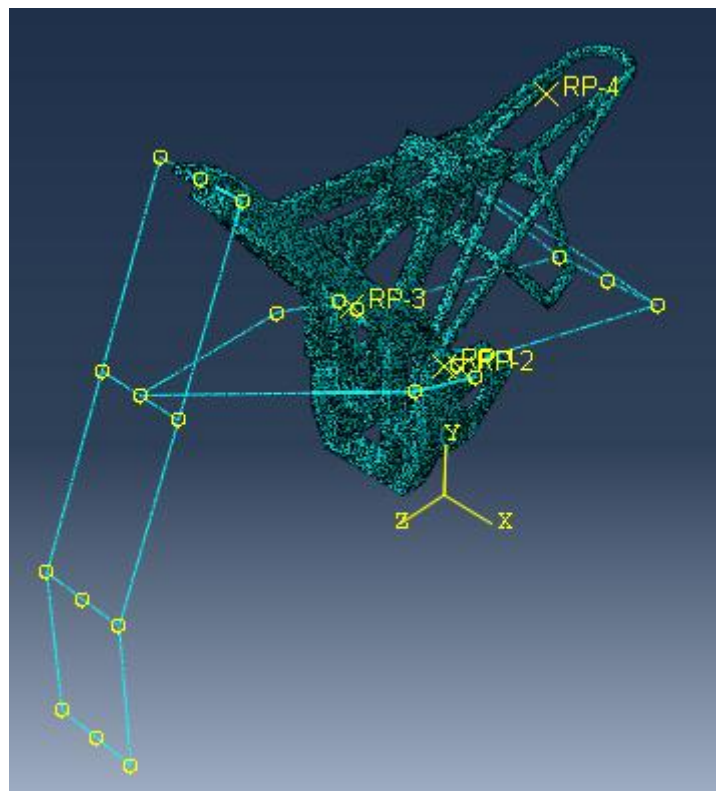


Figura 104.- Modelo mallado ¹¹⁰

- *JOB*

Este es el último paso. Cada vez que se quiere iniciar un análisis se crea un nuevo Job que recopila toda la información introducida anteriormente. En primer lugar hace una comprobación de todos los datos y si está correcto se puede empezar el análisis. En caso contrario mostrará un mensaje de error indicando los pasos a seguir para subsanarlos.

¹¹⁰ Creación propia en Abaqus® 6.14



10.2.1. Resultado Y Postprocesado

A continuación se muestran y evalúan los resultados obtenidos para los dos casos anteriores analizados sobre el chasis

Frenada máxima y paso por curva

Primeramente se evaluará la tensión equivalente de Von Mises:

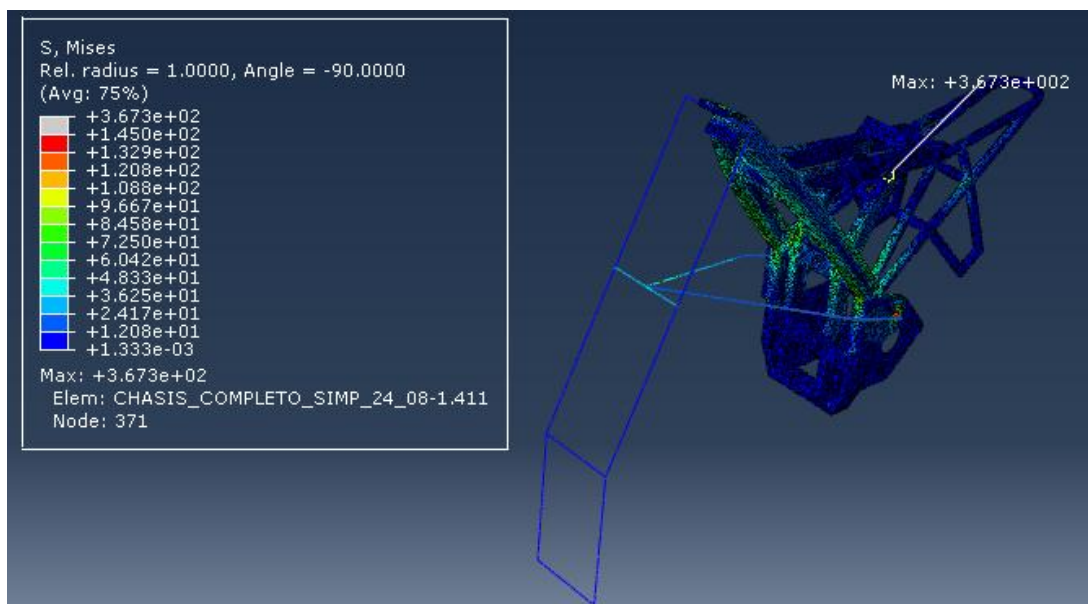


Figura 105.- Tensión equivalente de Von Mises en frenada máxima. Vista XYZ ¹¹¹

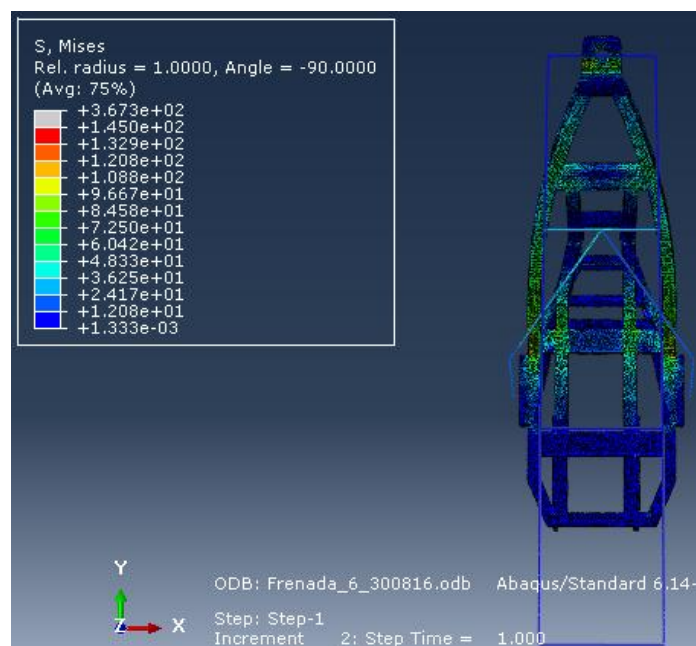


Figura 106.- Tensión equivalente de Von Mises en frenada máxima. Vista XY ¹¹²

¹¹¹ Creación propia en Abaqus® 6.14

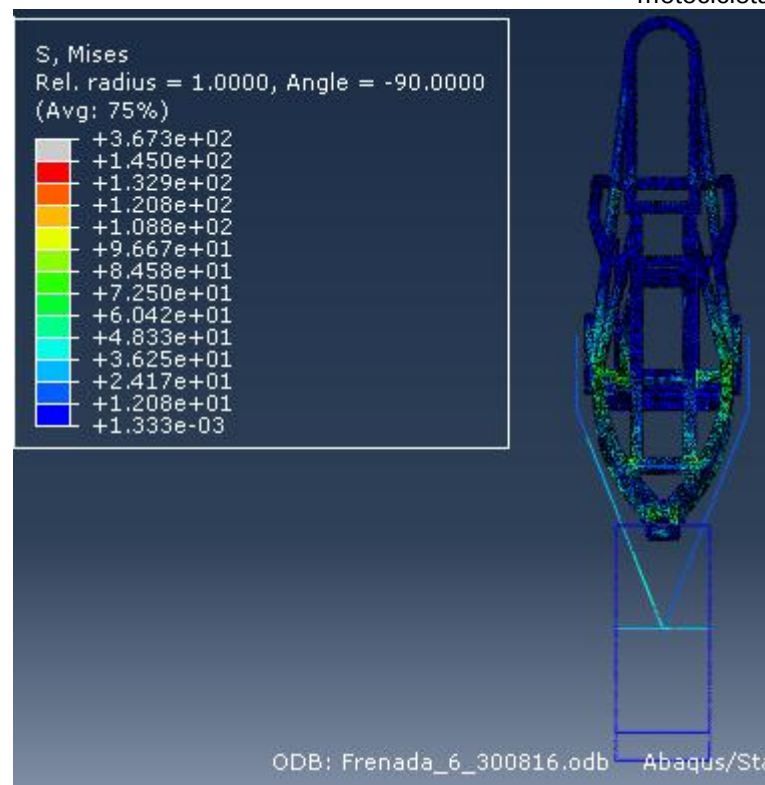


Figura 107.- Tensión equivalente de Von Misses en frenada máxima. Vista XZ ¹¹³

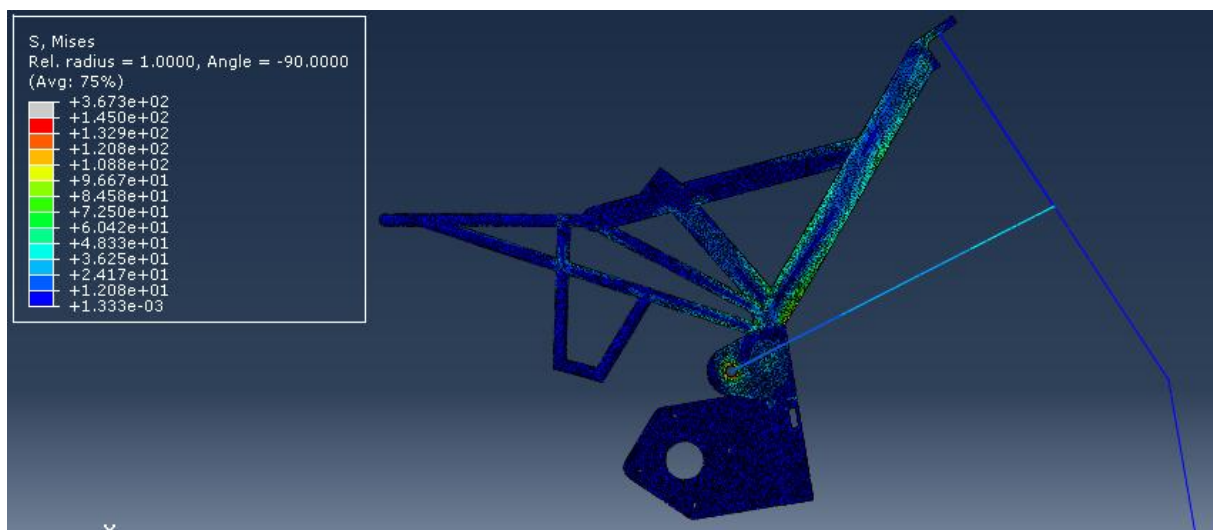


Figura 108.- Tensión equivalente de Von Misses en frenada máxima. Vista YZ ¹¹⁴

Como se puede observar hay un valor de tensión máxima de 367 MPa y se encuentra en un elemento situado en el chasis interior. Haciendo un estudio detallado de la zona, se observa que es una zona de unión de dos barras en un ángulo y donde la malla no está muy bien conectada, lo cual corresponde a una

¹¹² Creación propia en Abaqus® 6.14

¹¹³ Creación propia en Abaqus® 6.14

¹¹⁴ Creación propia en Abaqus® 6.14



zona de concentración de tensiones. Justo alrededor de ese punto la tensión cae hasta los 70 MPa por lo que no es muy representativo de la realidad. De igual manera, dichos elementos irán soldados, con lo que ese ángulo agudo quedará cubierto y las tensiones relajadas. Así pues este punto no se considera en la valoración de la aptitud del chasis para resistir la sollicitación objeto de estudio.

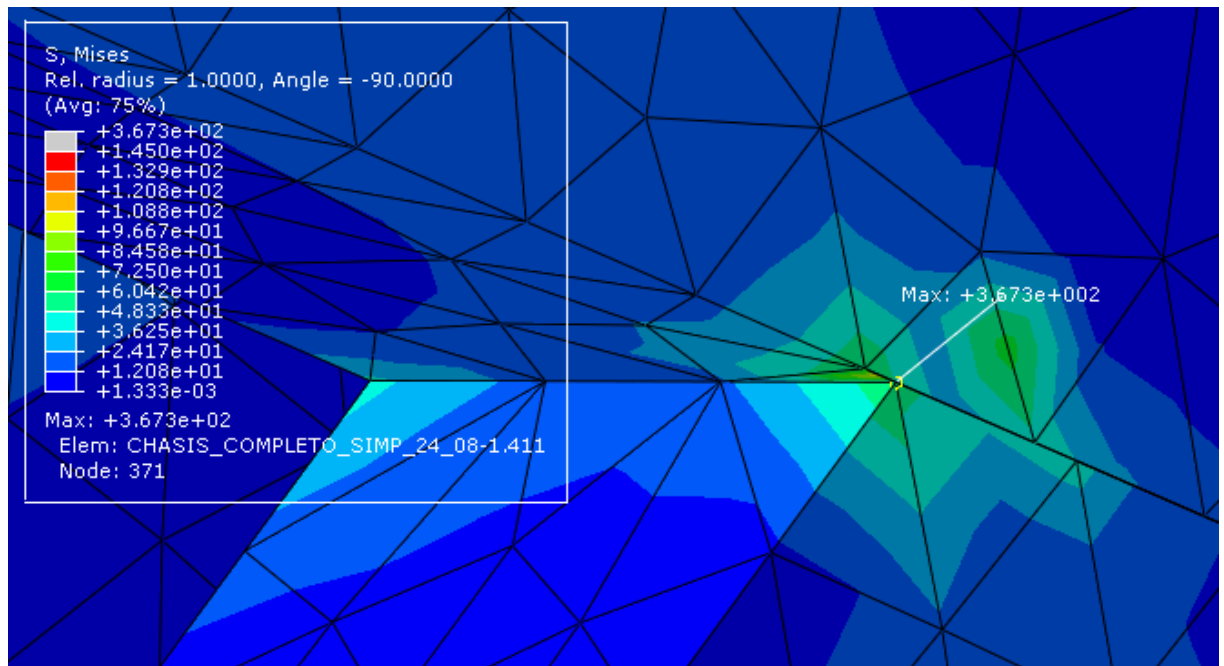


Figura 109.- Punto de concentración de tensiones en frenada máxima ¹¹⁵

A parte de ello, se puede hacer un estudio del resto de componentes del chasis.

El chasis externo está sometido a una tensión máxima en dos zonas especialmente, la unión de las barras que vienen del soporte de la rotula superior con las barras de la cuna inferior, y sobre las placas donde se ubica el eje intermedio y que recibe el esfuerzo del balancín de la suspensión delantera.

En el primer caso se tiene un máximo por encima del límite de 145 MPa por ser Aluminio 6063, por lo que podría pensarse en un primer momento que no es válido. No obstante es un punto muy localizado en ángulo, lo cual delata que es un concentrador de tensiones. El resto de la barra trabaja en tracción con una tensión que ronda los 115 MPa.

¹¹⁵ Creación propia en Abaqus® 6.14



Con respecto a a las placas, el límite elástico es de 250 MPa por ser de Aluminio 6082 T6, con lo cual no entraña ninguna amenaza a al integridad de la estructura, aún cuando su valor de la tensión es de 150 MPa.

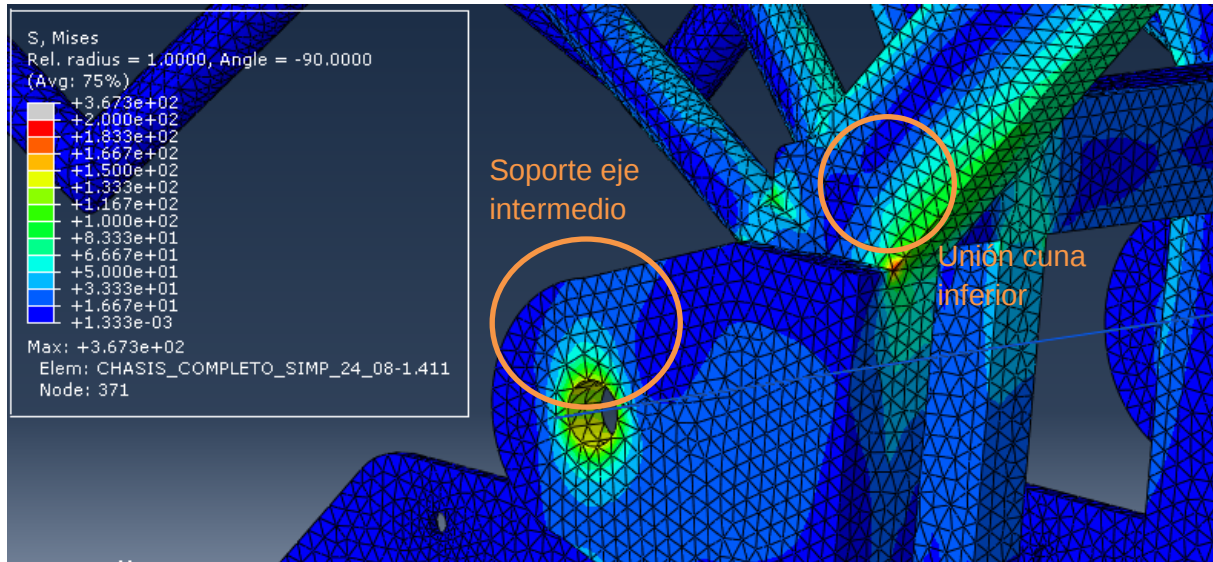


Figura 110.- Tensión máxima sobre chasis externo en frenada máxima ¹¹⁶

En cuanto al chasis interior, su punto de máxima tensión se encuentra en la unión de la barra que soporta verticalmente la cogida del amortiguador y los refuerzos donde se encuentran las uniones al motor. Su valor es de 120 MPa y tampoco representa amenaza alguna:

¹¹⁶ Creación propia en Abaqus® 6.14

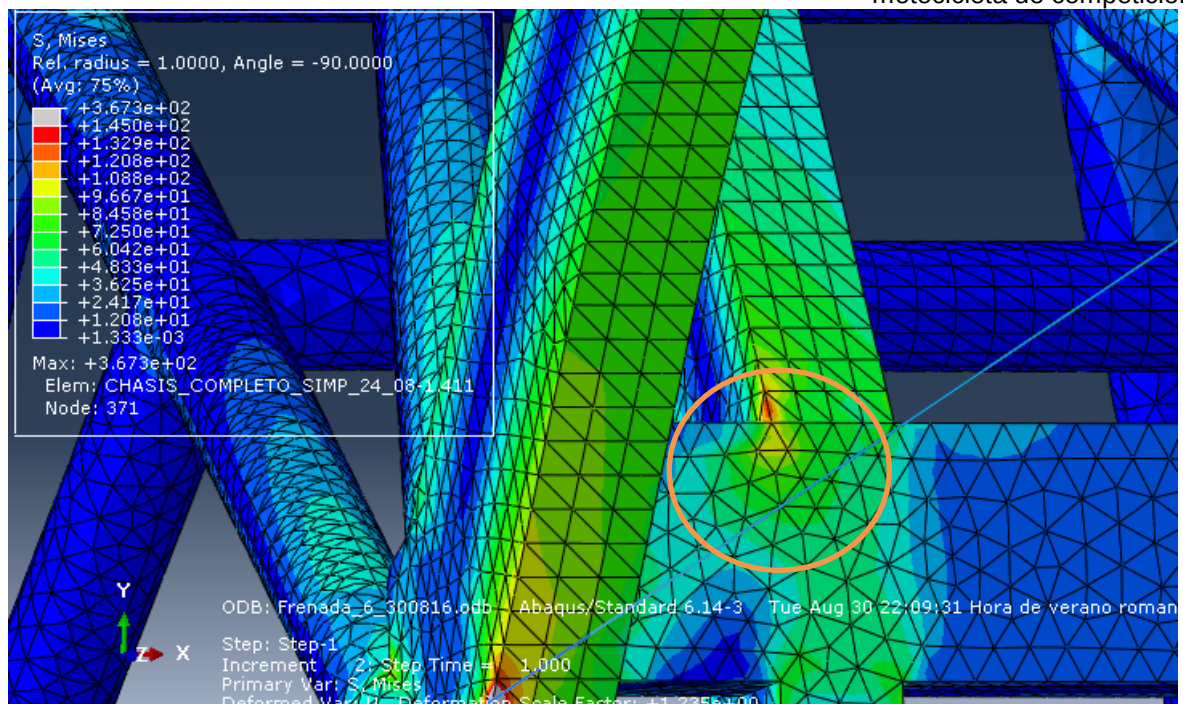


Figura 111.- Tensión máxima sobre chasis interior en frenada máxima¹¹⁷

Finalmente se observa el subchasis que trabaja a compresión, estando su tensión máxima de 72,5 MPa en la unión próxima al chasis principal.

Si pasamos a estudiar ahora los desplazamientos, se observan los siguientes valores:

¹¹⁷ Creación propia en Abaqus® 6.14

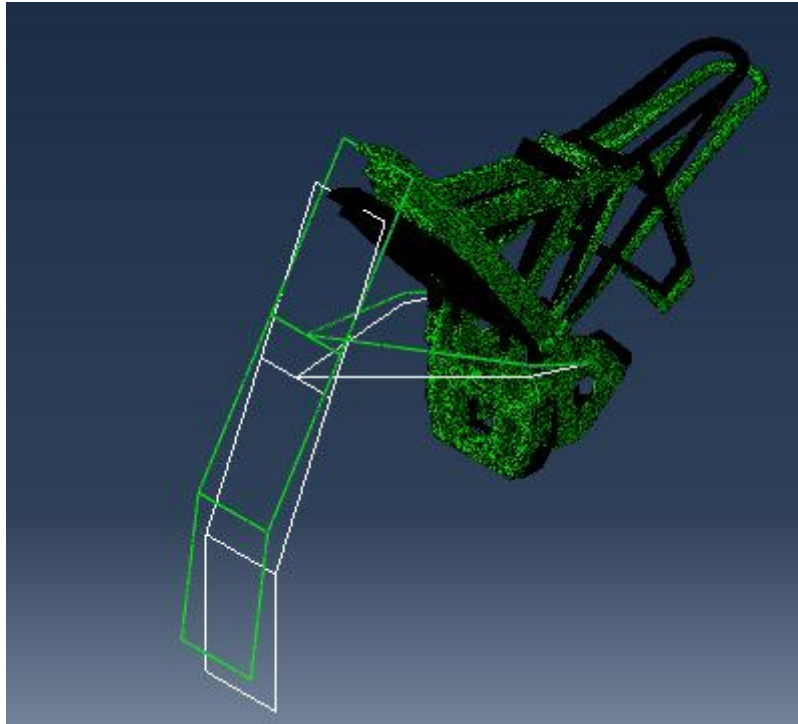


Figura 112.- Desplazamiento en frenada máxima (en gris indeformada, en verde deformada) ¹¹⁸

Si se presta atención a su magnitud, se ve que la máxima deformación se encuentra en la parte superior del chasis, siendo de 110 mm. Es un valor alto, pero se considera que hay una restricción de giro en el eje intermedio de chasis que permite que el chasis gire en torno a él un ángulo de $7,5^\circ$, coincidiendo este punto de máxima deformación con el soporte de la rótula donde, por hundimiento de la horquilla hay ya 80 mm de desplazamiento. Así pues la deformación real sería de 30mm en ese punto.

¹¹⁸ Creación propia en Abaqus® 6.14

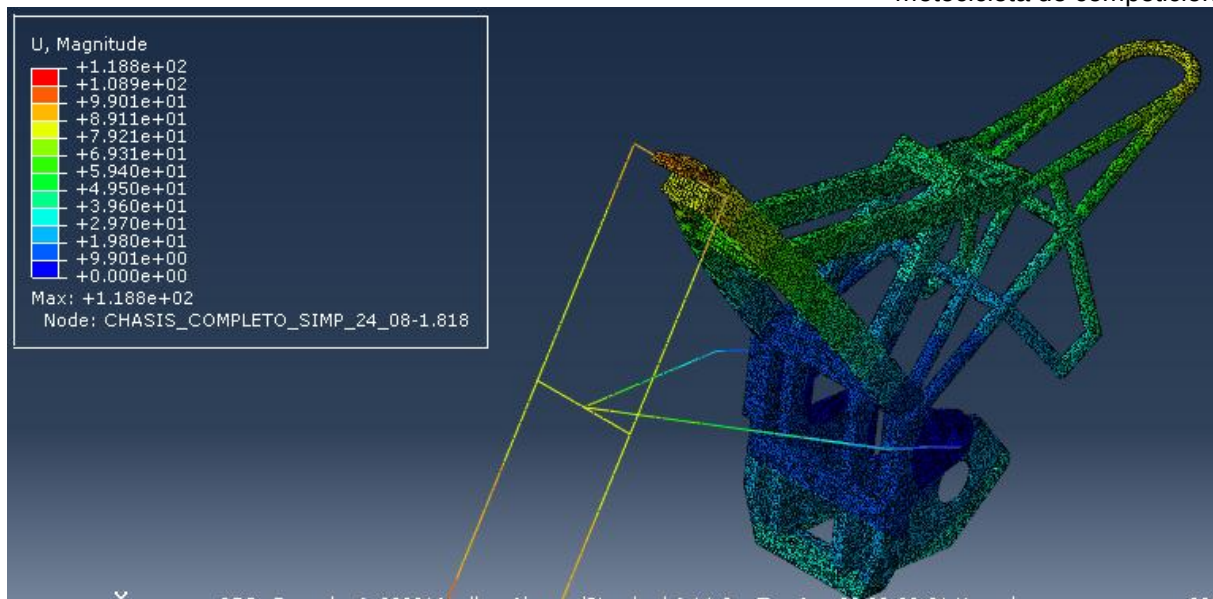


Figura 113.- Desplazamiento en frenada máxima. Vista XYZ ¹¹⁹

Haciendo un estudio detallado de los desplazamientos en los tres ejes:

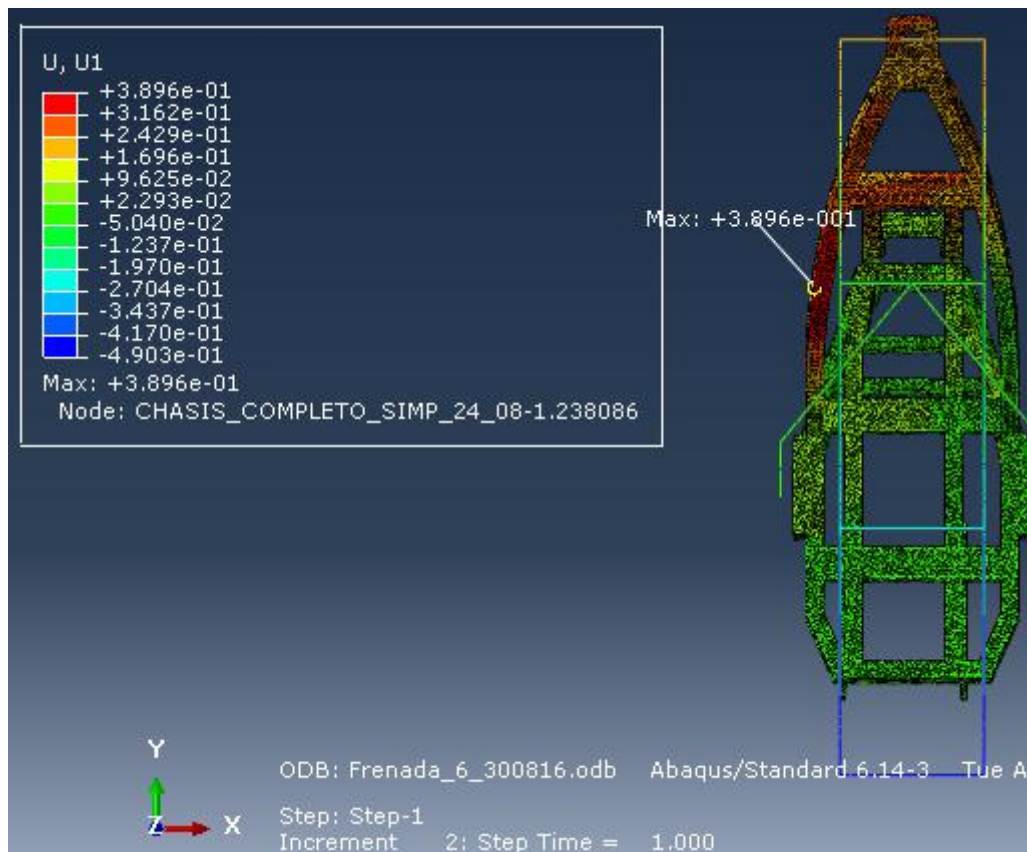


Figura 114.- Desplazamiento en frenada en el eje X. Vista XY ¹²⁰

¹¹⁹ Creación propia en Abaqus® 6.14

¹²⁰ Creación propia en Abaqus® 6.14



Con respecto al eje X hay un desplazamiento de 0.39 mm propiciado por la carga lateral sobre la barra lateral del chasis exterior.

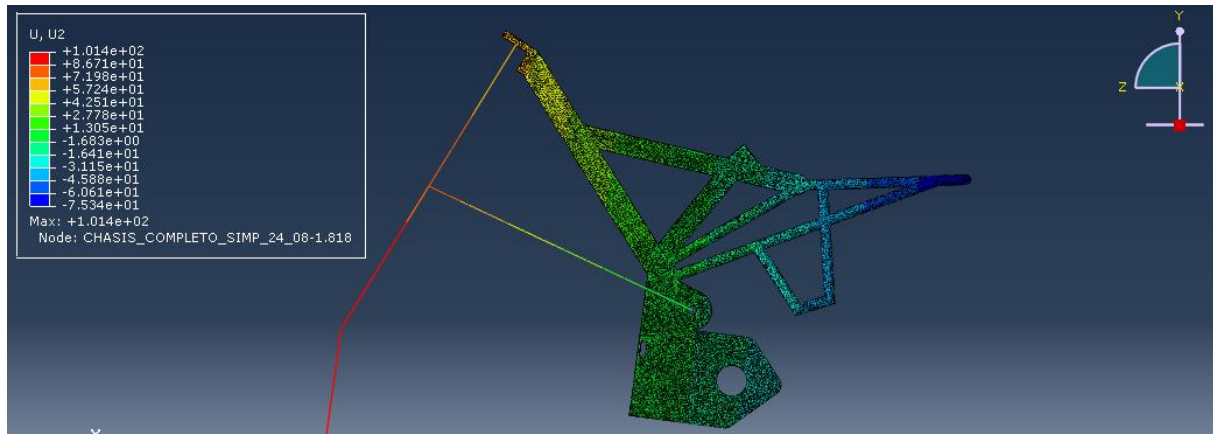


Figura 115.- Desplazamiento en frenada en el eje Y. Vista YZ ¹²¹

En el eje Y es, como ya se ha dicho, de 101 mm en el soporte de la rótula del chasis, mientras que en el subchasis se encuentra el mayor pero en sentido contrario, de -75,3 mm, que como se ha indicado para la zona del soporte de rótula hay que contar con un giro libre de 7,5° con lo cual la deformación real es menor.

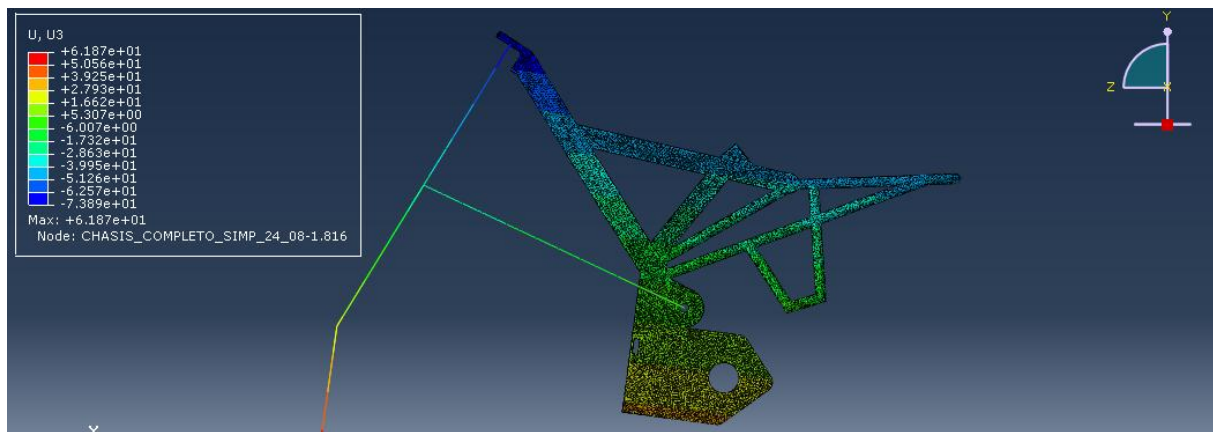


Figura 116.- Desplazamiento en frenada en el eje Z. Vista YZ ¹²²

En la misma zona que en el caso anterior se tiene el desplazamiento máximo en dirección Z, siendo esta de -73,8 mm. En la placa de motor se obtiene el máximo positivo siendo de 61,8 mm

Prueba estática en banco

Se evaluará para empezar la tensión equivalente de Von Mises:

¹²¹ Creación propia en Abaqus® 6.14

¹²² Creación propia en Abaqus® 6.14

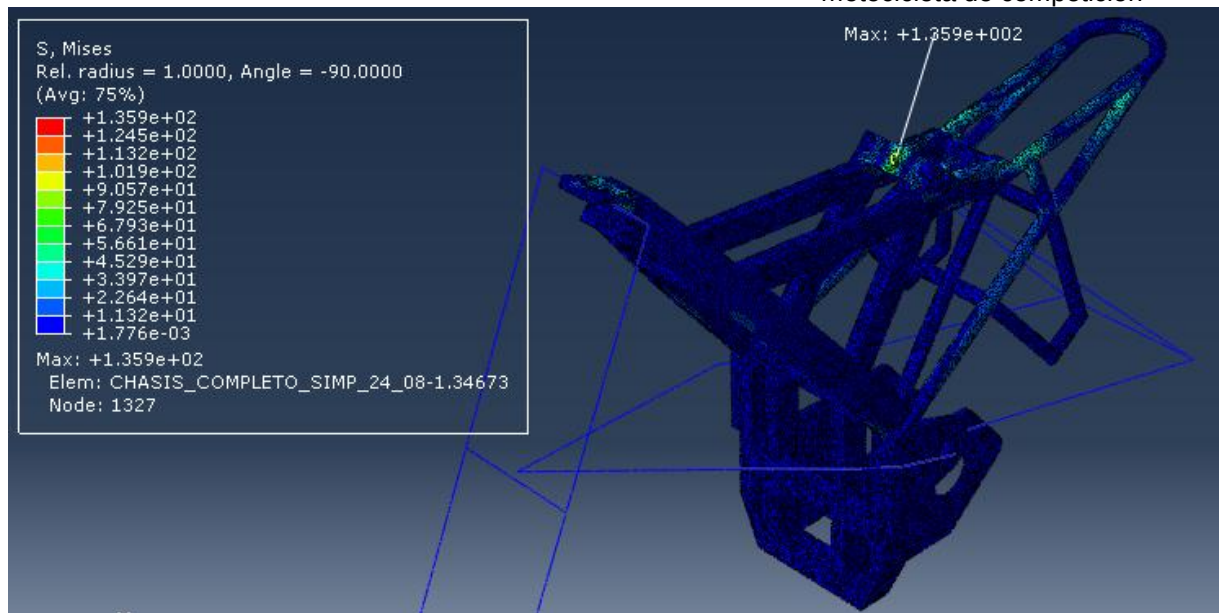


Figura 117.- Tensión equivalente de Von Misses en prueba estática. Vista XYZ ¹²³

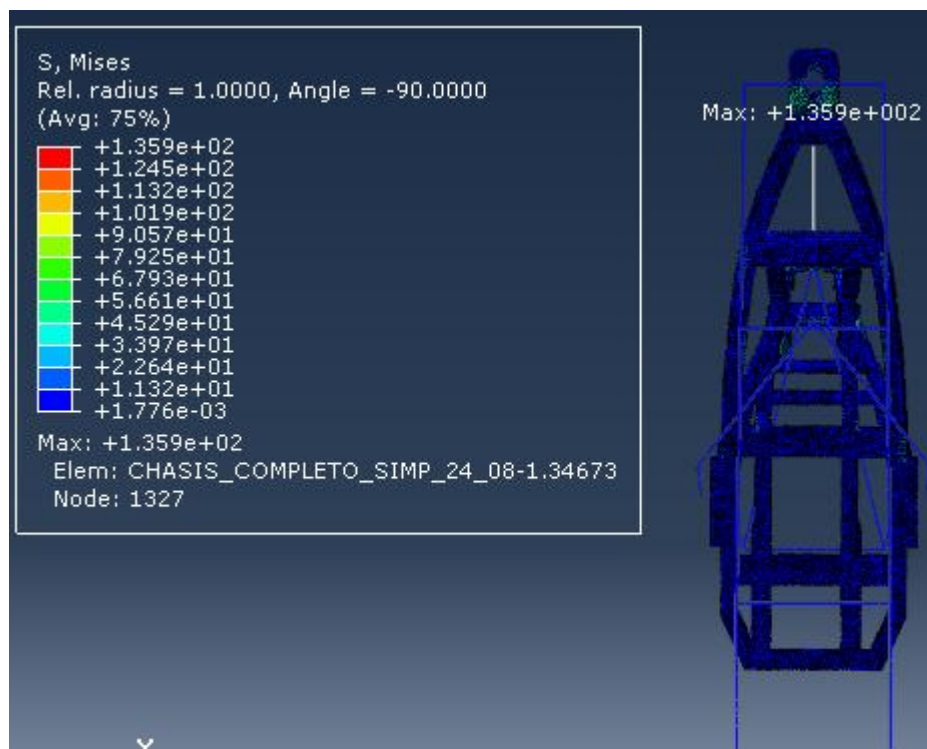


Figura 118.- Tensión equivalente de Von Misses en prueba estática. Vista XY ¹²⁴

¹²³ Creación propia en Abaqus® 6.14

¹²⁴ Creación propia en Abaqus® 6.14

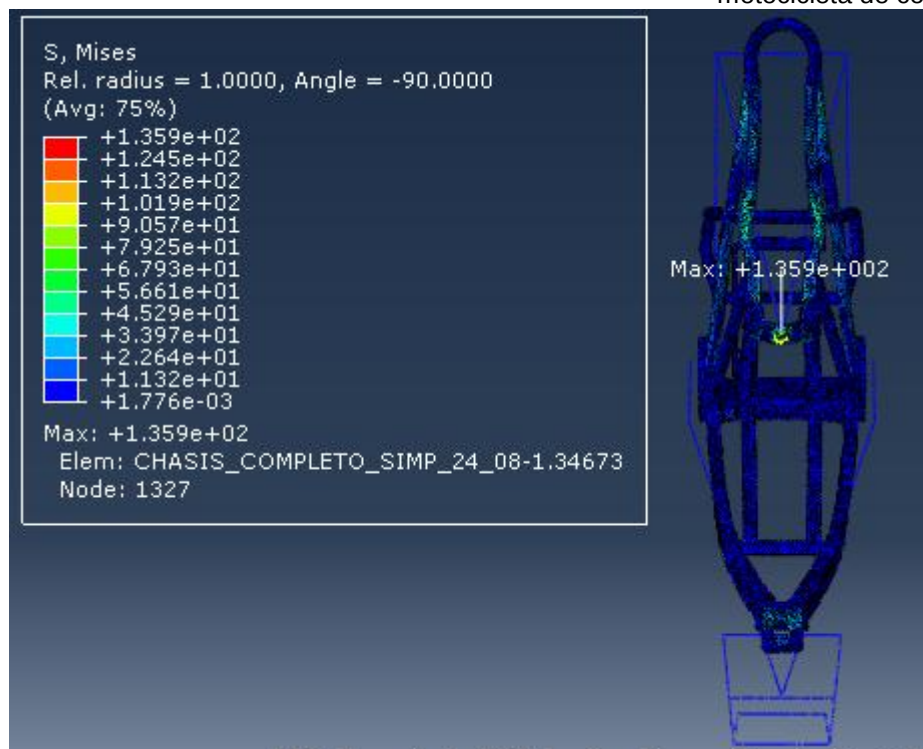


Figura 119.- Tensión equivalente de Von Misses en prueba estática. Vista XZ ¹²⁵

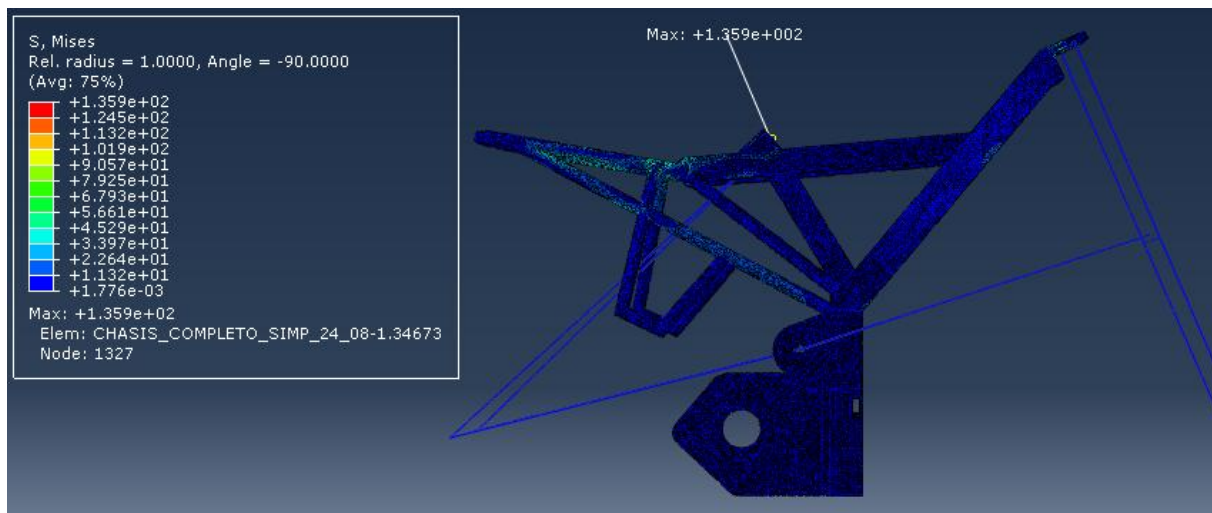


Figura 120.- Tensión equivalente de Von Misses en prueba estática. Vista YZ ¹²⁶

En este caso el valor de la tensión máxima es de 135.9 MPa y se encuentra en un elemento situado en el bastidor interior. Haciendo un estudio detallado, se observa que es el puente de unión del amortiguador trasero, que recibe la tensión del basculante al estar la rueda trasera limitada en su movimiento. No obstante aún

¹²⁵ Creación propia en Abaqus® 6.14

¹²⁶ Creación propia en Abaqus® 6.14



con todo, está dentro del límite de 250 MPa, ya que esta pieza es de Aluminio 6082

T6:

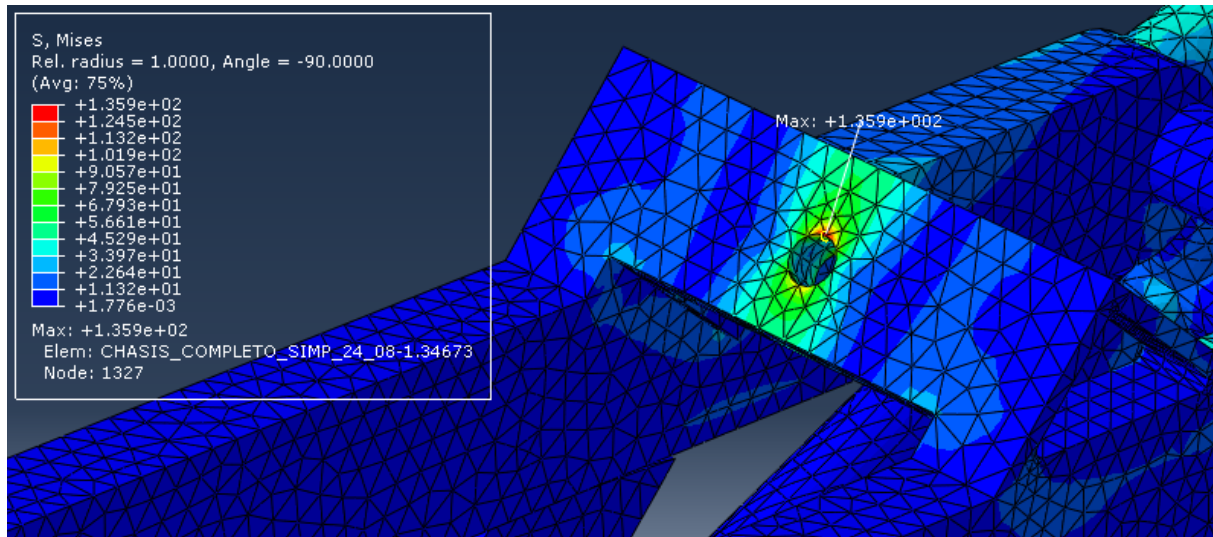
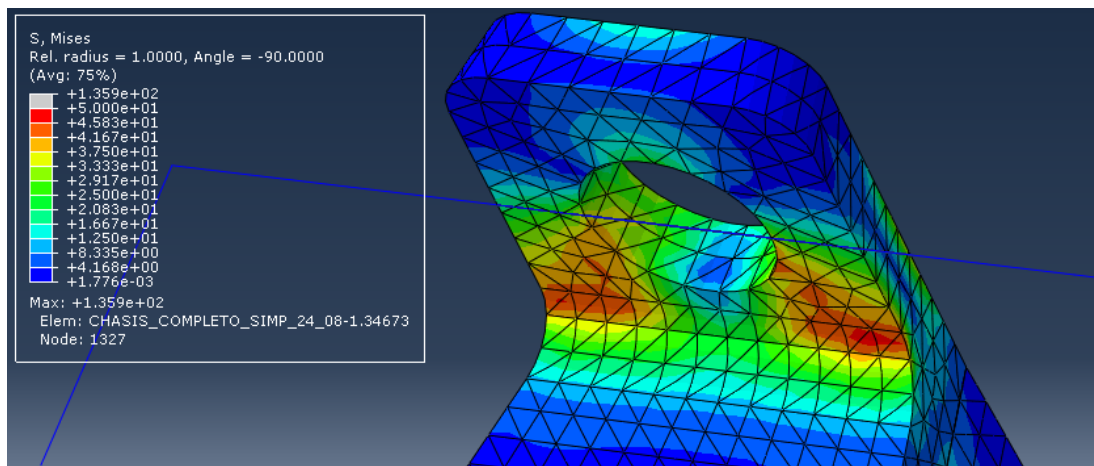


Figura 121.- Punto de máxima tensión en prueba estática¹²⁷

Así mismo se hace un estudio del resto de componentes del chasis.

El bastidor externo está sometido a una tensión máxima de en torno a 50 MPa en la zona del soporte de rótula superior de dirección, mientras que las barras que bajan desde ella hasta la unión con la cuna inferior trabajan a tracción con un valor de 25 MPa.



¹²⁷ Creación propia en Abaqus® 6.14

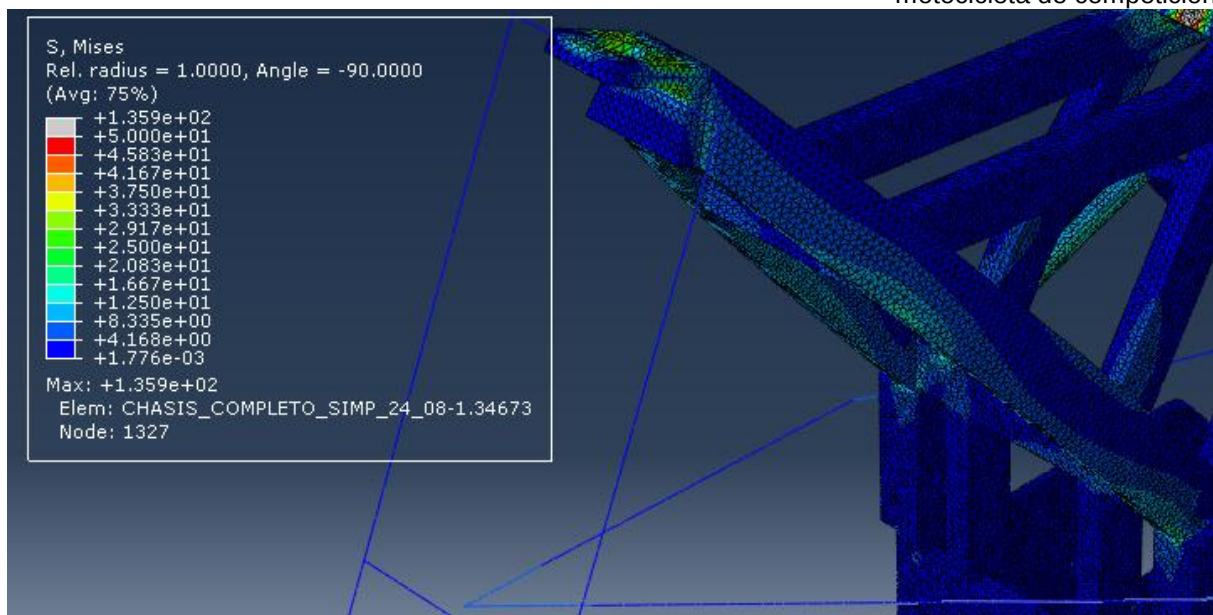
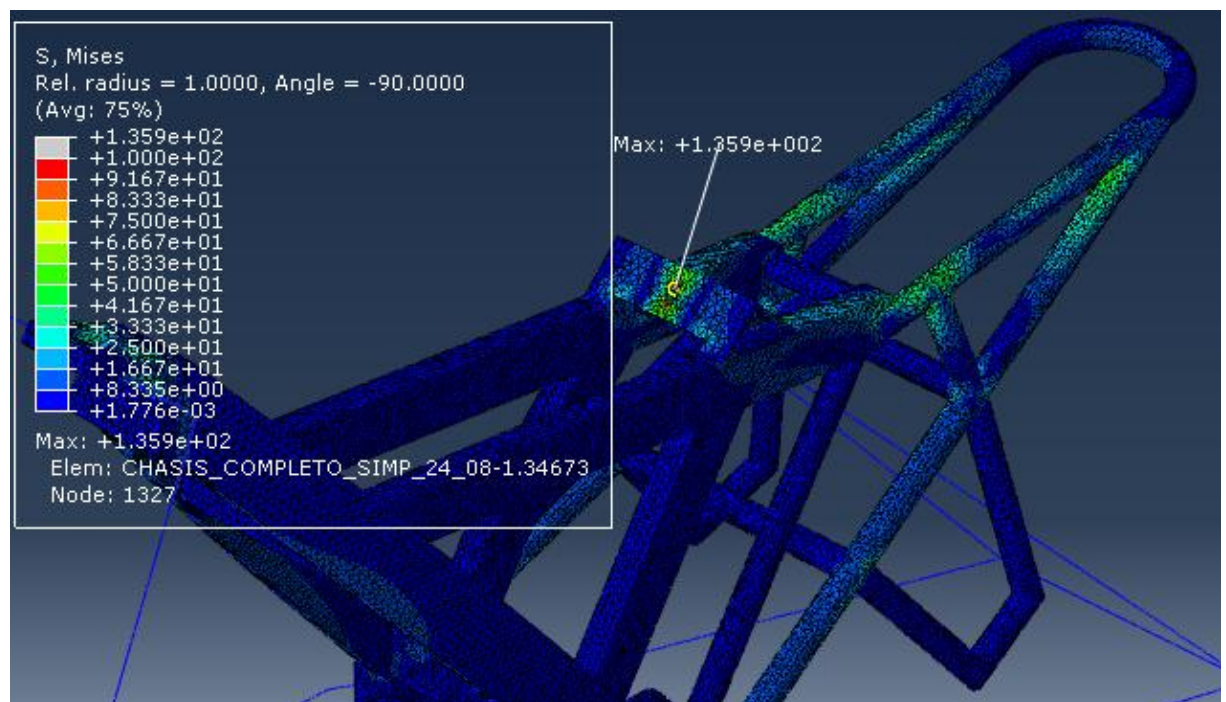


Figura 122.- Tensiones máxima sobre chasis externo en prueba estática. a) Soporte de rótula de chasis.
b) Unión cuna inferior¹²⁸

Con respecto al subchasis en esta ocasión se lleva gran parte del trabajo, donde las barras donde apolla el sillín están trabajando a tracción en su parte inferior con un valor de 65 MPa, así como en la zona próxima a su unión atornillada al chasis principal:



¹²⁸ Creación propia en Abaqus® 6.14

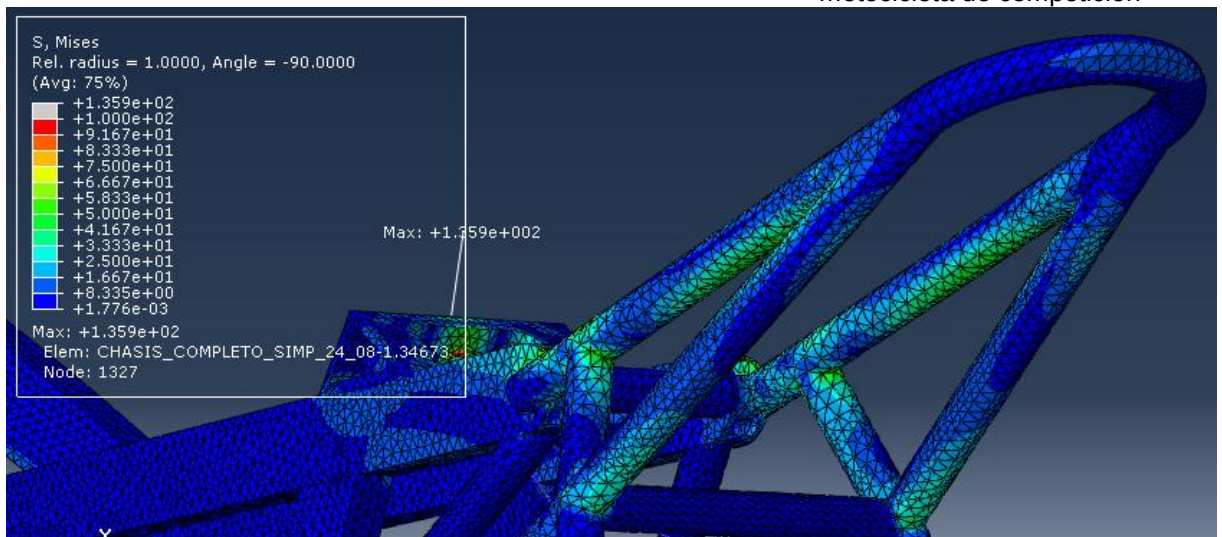


Figura 123.- Tensiones sobre subchasis en prueba estática ¹²⁹

Echando un vistazo a los desplazamientos, se observan los siguientes desplazamientos, ampliados en escala por un factor de 150:

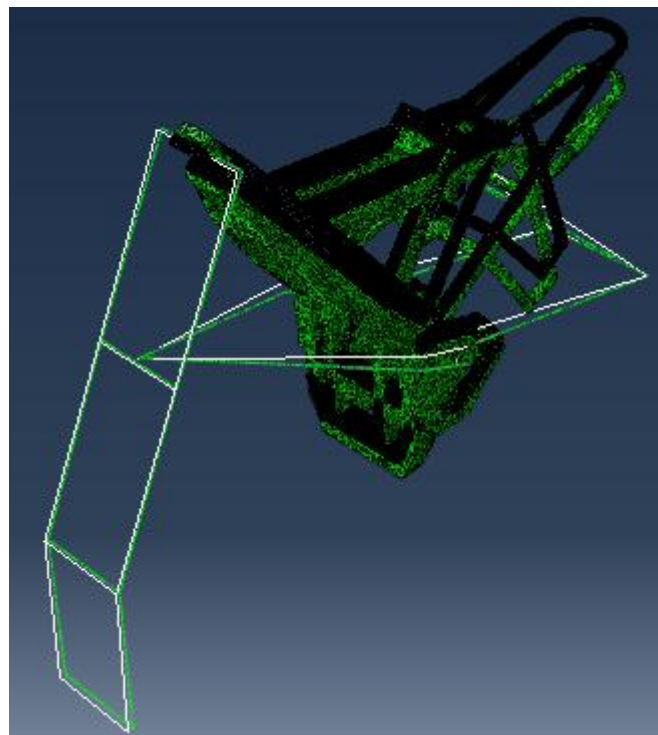


Figura 124.- Desplazamiento en prueba estática (en gris indeformada, en verde deformada) ¹³⁰

En este caso el gran dañado es el subchasis como era de esperar, con un desplazamiento global de 0.77 mm en la parte del sillín.

¹²⁹ Creación propia en Abaqus® 6.14

¹³⁰ Creación propia en Abaqus® 6.14

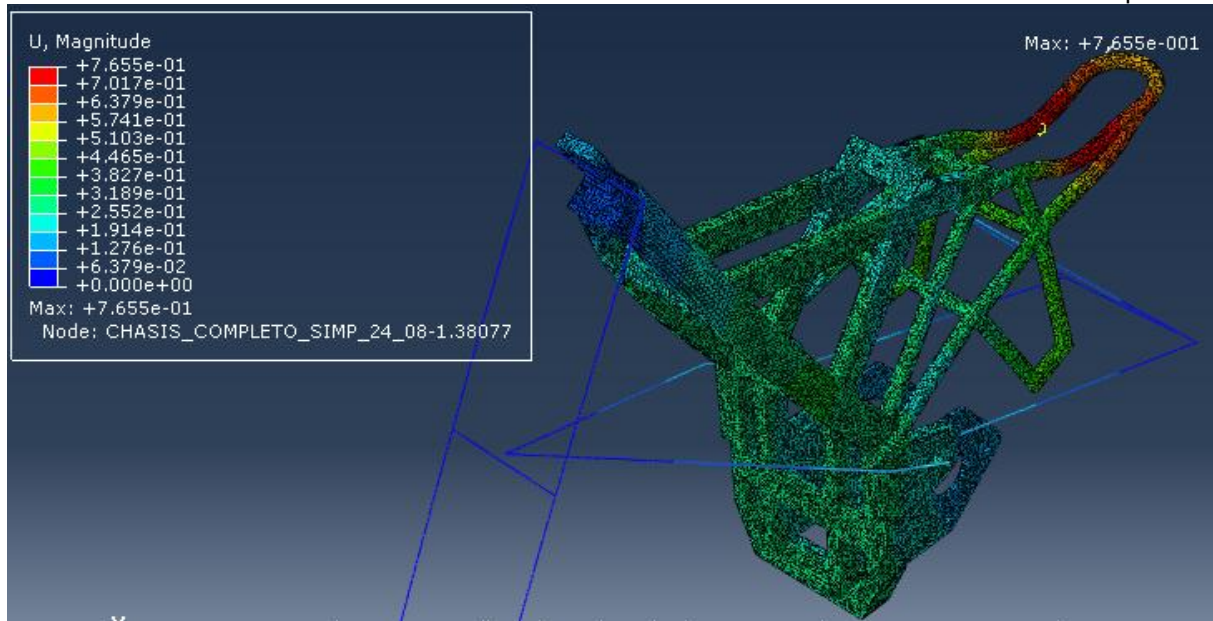


Figura 125.- Desplazamiento en prueba estática. Vista XYZ ¹³¹

Haciendo de nuevo un estudio detallado de los desplazamientos en los tres ejes:

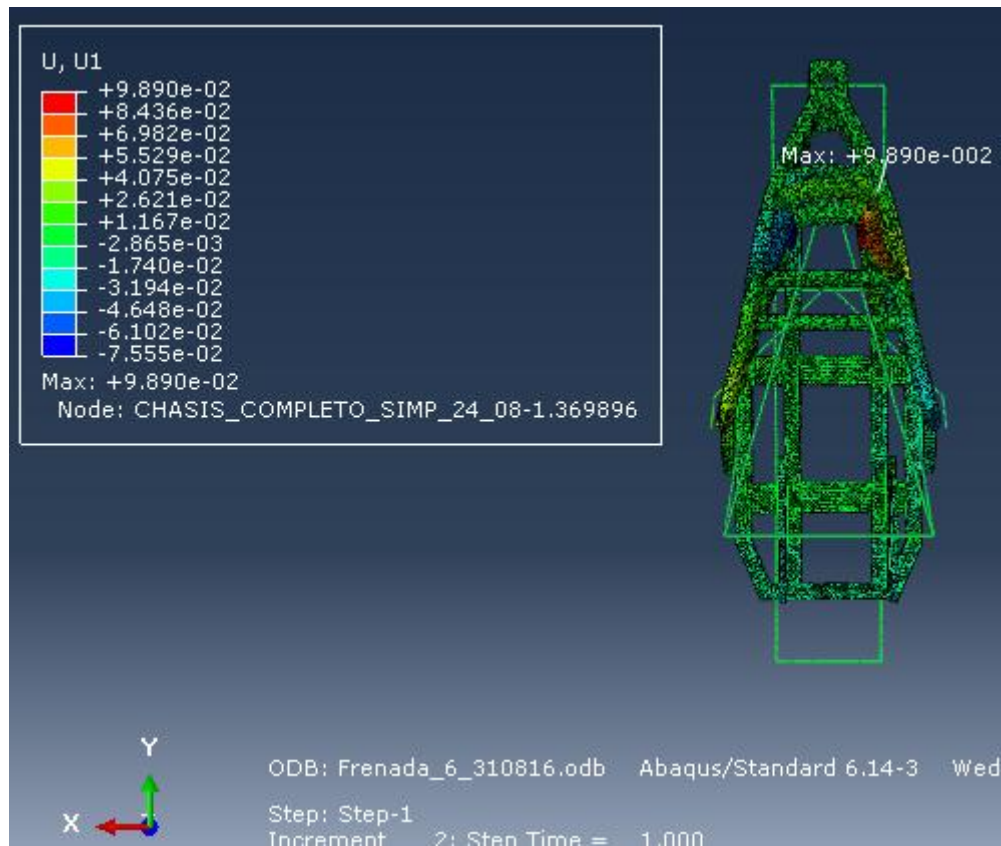


Figura 126.- Desplazamiento en prueba estática en el eje X. Vista XY ¹³²

¹³¹ Creación propia en Abaqus® 6.14



Con respecto al eje X hay un desplazamiento de 0.1 mm sobre la misma zona de subchasis hacia el interior.

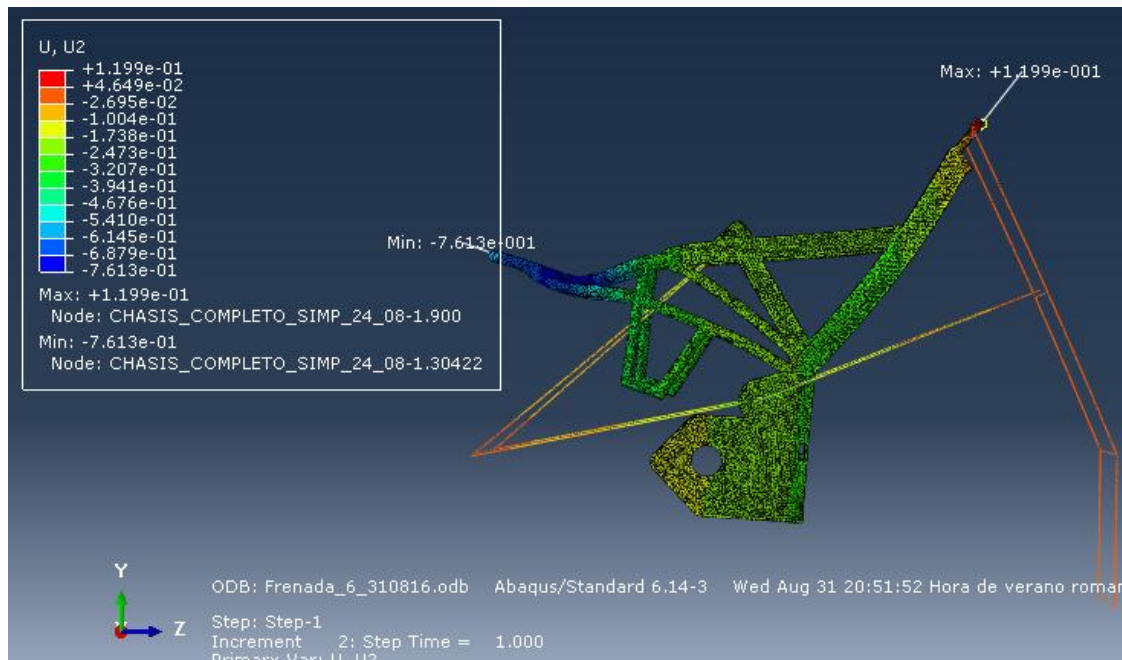


Figura 127.- Desplazamiento en prueba estática en el eje Y. Vista YZ ¹³³

En el eje Y es de -0.76 mm en la misma zona del subchasis, mientras que en el soporte de rótula superior se encuentra un máximo pero en sentido contrario, de 0.12 mm.

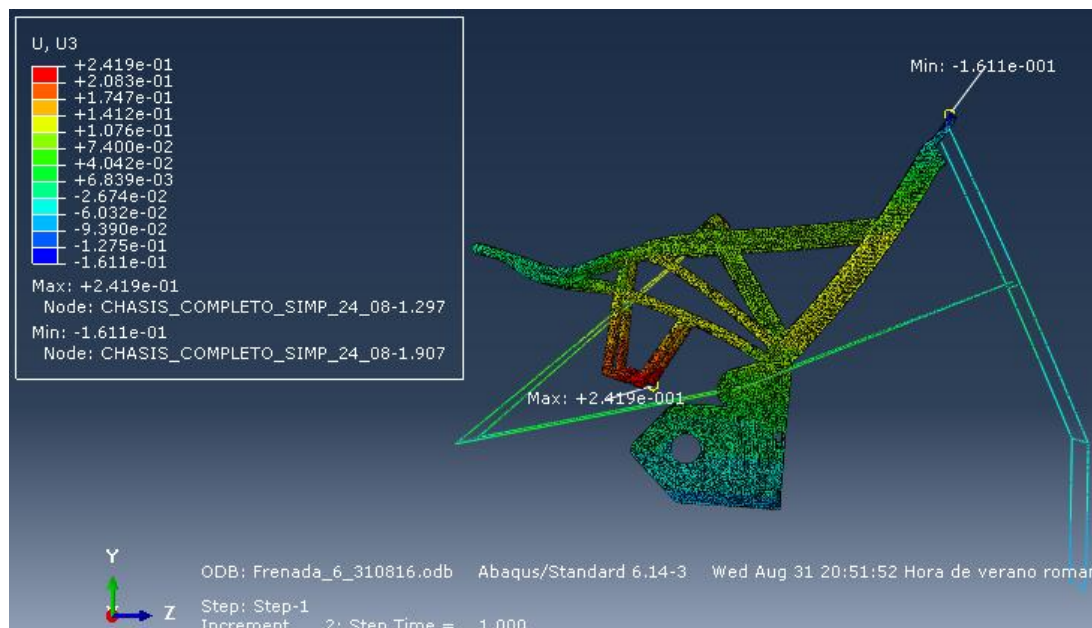


Figura 128.- Desplazamiento en prensa estática en el eje Z. Vista YZ ¹³⁴

¹³² Creación propia en Abaqus® 6.14

¹³³ Creación propia en Abaqus® 6.14



En este caso se encuentra un desplazamiento máximo de nuevo sobre el soporte de rótula superior, en dirección negativa de -0.17 mm, mientras que en el apoyo de la estriberas aparece un desplazamiento positivo de 0.24 mm.

10.3. Análisis del balancín

Por el especial papel que juega esta pieza en la estructura completa a la hora de transmitir fuerzas tanto en frenada como en la prueba estática se ha hecho un análisis aislado para asegurar su correcto dimensionado.

El proceso seguido de propiedades de material, condiciones de contorno... es el mismo que descrito anteriormente.

Como fuerzas se le han introducido una perpendicular a la horquilla F_h de 5500 N y otra F_l lateral de 900 N estimadas en una frenada máxima con inicio de viraje, empotrando los extremos que irían unidos al chasis al eje intermedio:

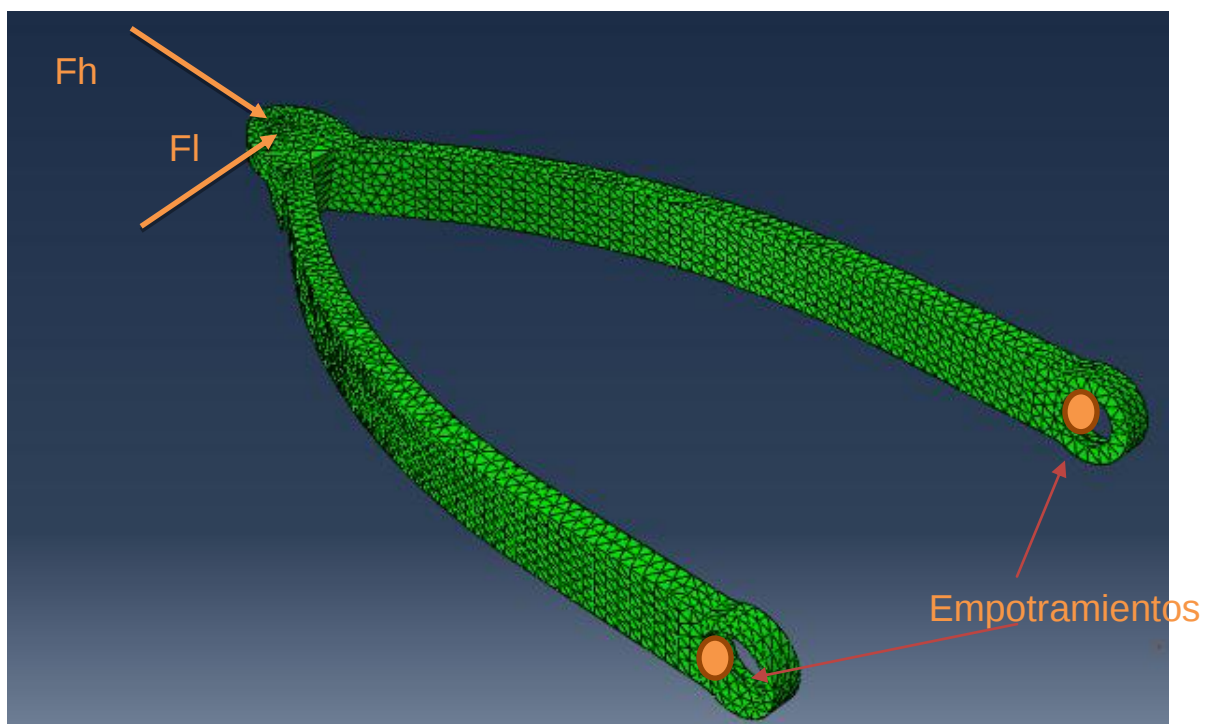


Figura 129.- Solicitación de balancín delantero¹³⁵

¹³⁴ Creación propia en Abaqus® 6.14

¹³⁵ Creación propia en Abaqus® 6.14



Procediendo al análisis, se obtienen las siguientes tensiones de Von Mises:

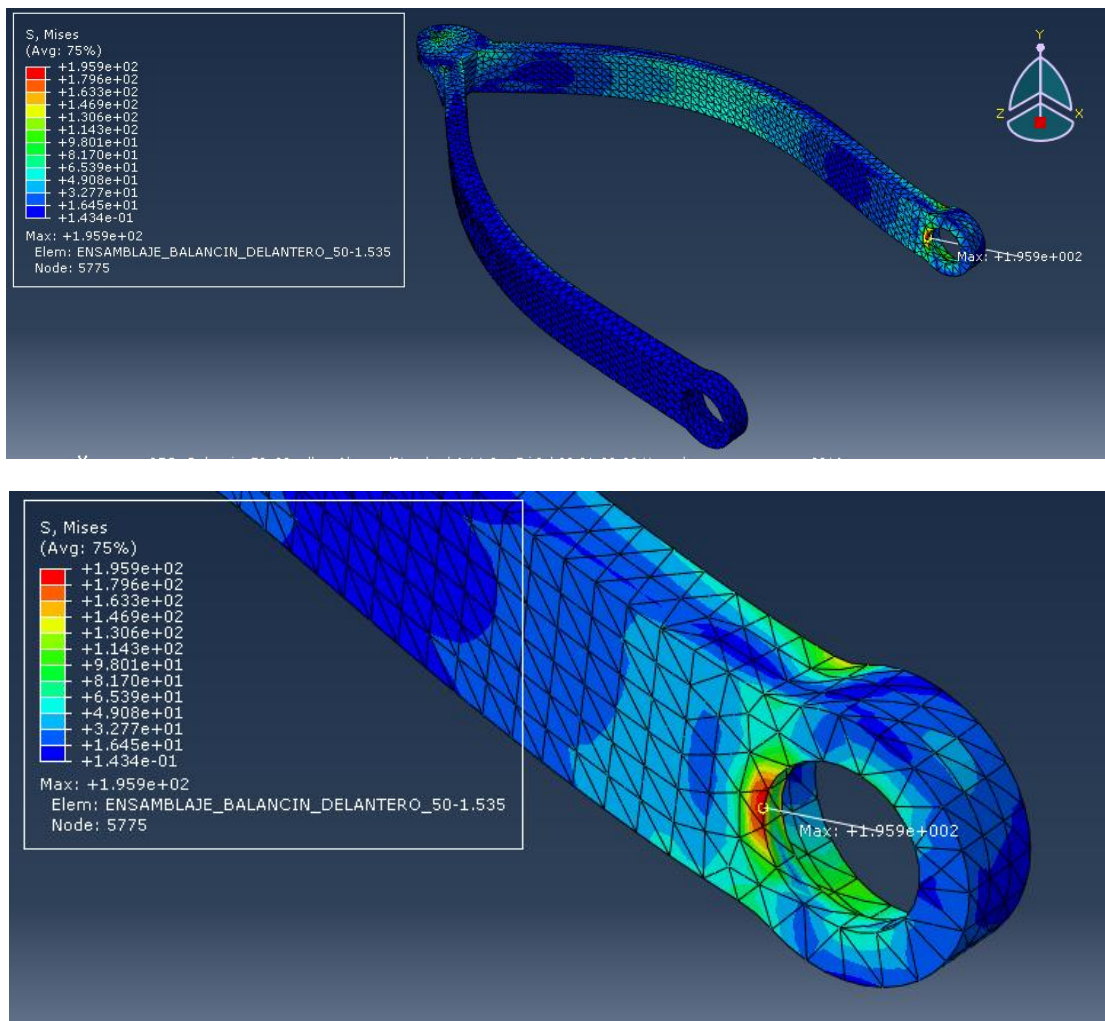


Figura 130.- a) Tensiones en balancín b) Detalle de máxima tensión ¹³⁶

La tensión máxima aparece en un punto de la cogida al eje intermedio del chasis. Esta puede venir provocada por la restricción de movimiento a que se ha sometido con el empotramiento. Igualmente este valor es de 195 MPa que está lejos del límite elástico de 250 MPa del aluminio 6082 T6 del que está fabricada a pieza. En cuanto a las barras su tensión máxima es de 65 MPa en compresión, que tampoco superan los 145 del Aluminio 6062 T5.

Si se estudian los desplazamientos, estos son los siguientes:

¹³⁶ Creación propia en Abaqus® 6.14

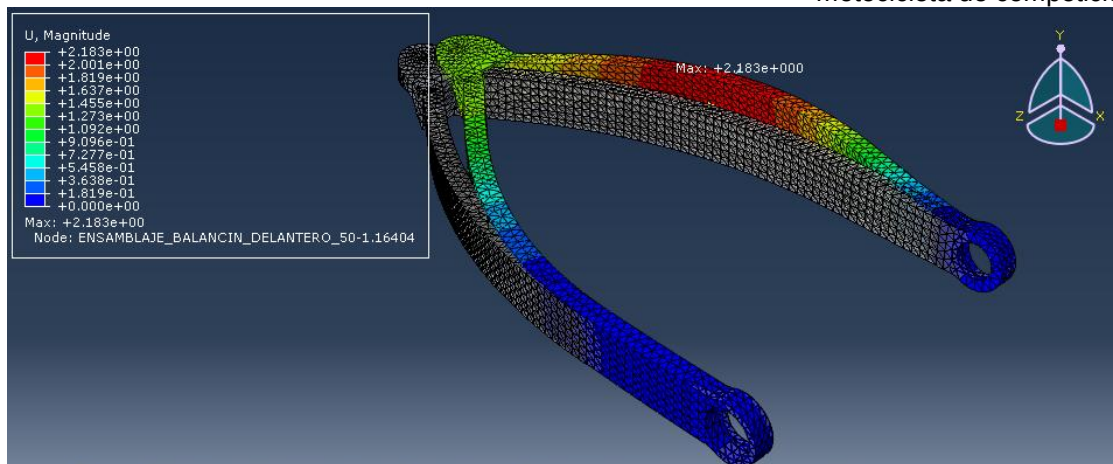


Figura 131.- Desplazamientos en balancín. Gris indeformada, en color deformada ¹³⁷

El máximo desplazamiento global están en la barra que recibe la compresión de la fuerza horizontal y la de la lateral, siendo su valor máximo de 2.18 mm. En el eje X la estructura completa se deforma 0.6 mm.

10.4. Análisis del subchasis

Otra estructura crítica que aún habiéndose estudiado en la estructura completa merece especial atención es el subchasis. Ya se vió que aguantaba correctamente bajo el esfuerzo de la prueba estática, pero esta subestructura tiene una especial dedicación en cuanto es la que soporta todos los esfuerzos que hace el piloto durante la carrera. Estos se aplican sobre todo en las estriberas, que van suspendidas de la estructura principal, por lo que pueden aplicar sobre estas unas cargas importantes que deben ser analizadas.

Así pues se aplican unos esfuerzos sobre la situación donde irán los apoyos del piloto en las estriberas de 1000N a una distancia de unos 90 mm de estas, con lo cual genera un momento sobre la estructura del subchasis. Aplicando las condiciones de contorno en los extremos donde iría atornillado al chasis principal:

¹³⁷ Creación propia en Abaqus® 6.14

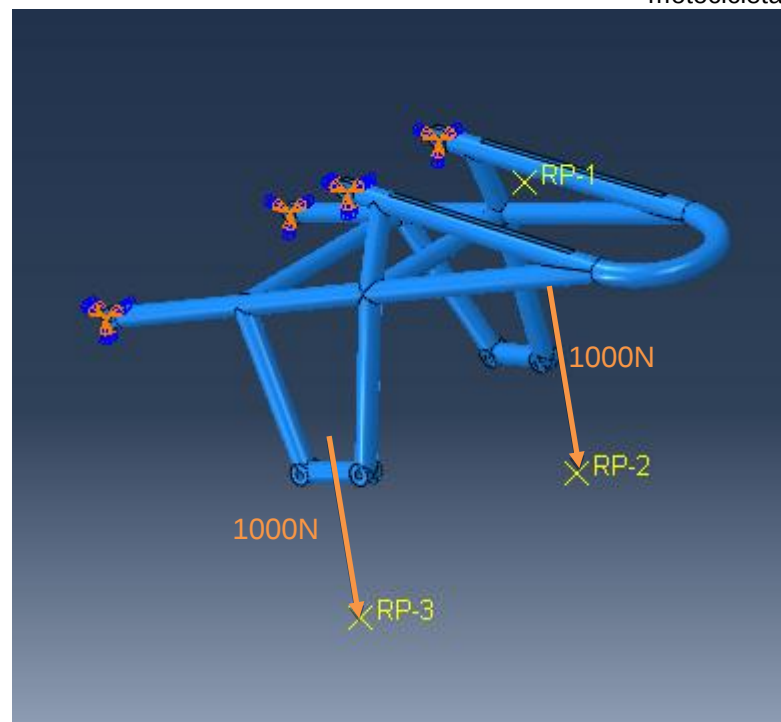


Figura 132.- Solicitación en subchasis por influencia del piloto ¹³⁸

Los resultados son los siguientes:

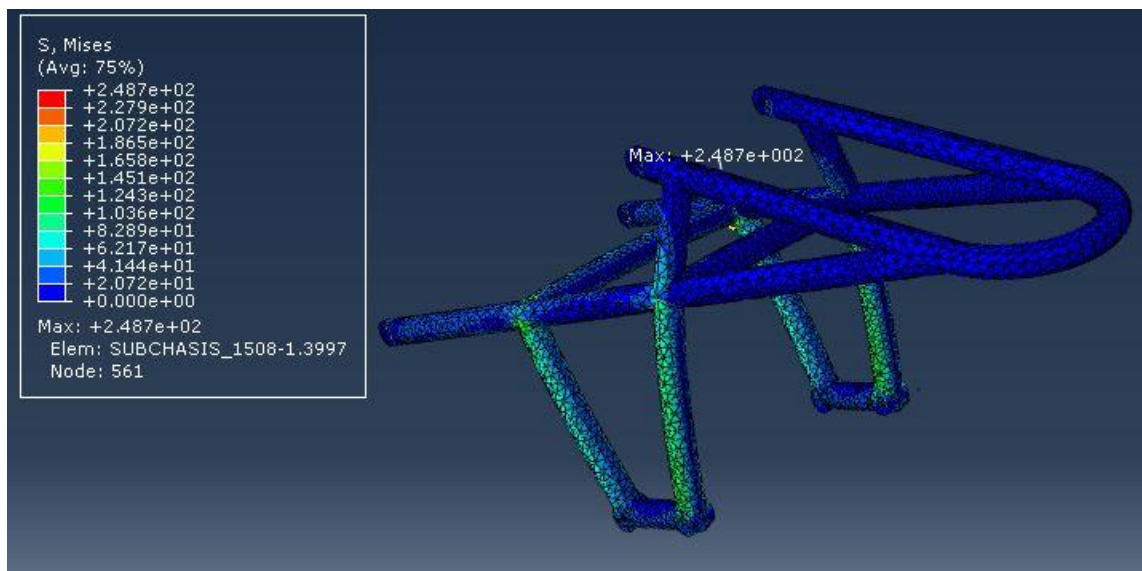


Figura 133.- Tensiones de Von Misses en subchasis debido a piloto ¹³⁹

¹³⁸ Creación propia en Abaqus® 6.14

¹³⁹ Creación propia en Abaqus® 6.14

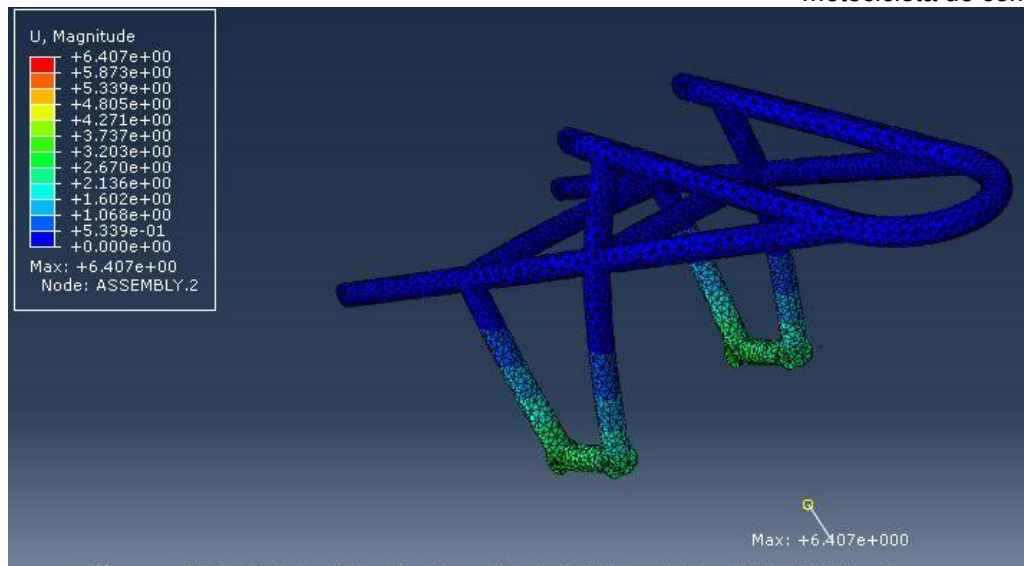


Figura 134.- Desplazamientos en subchasis debido a piloto¹⁴⁰

Como se desprende de lo anterior, la tensión máxima obviando concentradores de tensiones es de 150 MPa lo cual sobrepasa por poco el límite elástico del Aluminio 6063 T5. De igual manera el desplazamiento total global es de hasta 4mm, que teniendo en cuenta la longitud extra de la estribera se puede ir hasta los 5 mm e incluso más.

Debido a lo anterior se decidió añadir un refuerzo inferior atornillado que limite el desplazamiento y que obviamente también ayudará estructuralmente. El nuevo análisis con la misma sollicitación se presenta a continuación:

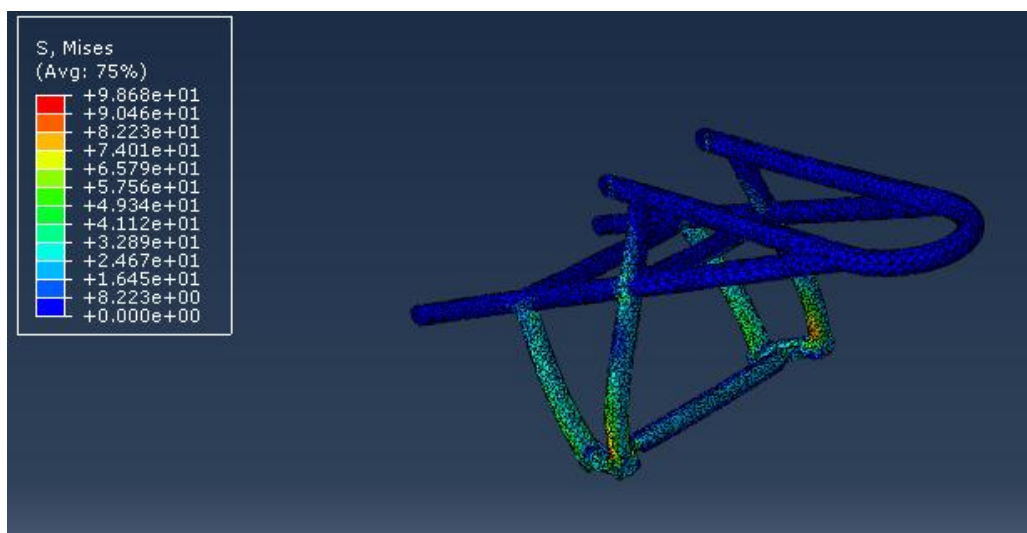


Figura 135.- Tensiones de Von Mises en subchasis con refuerzo debido a piloto¹⁴¹

¹⁴⁰ Creación propia en Abaqus® 6.14

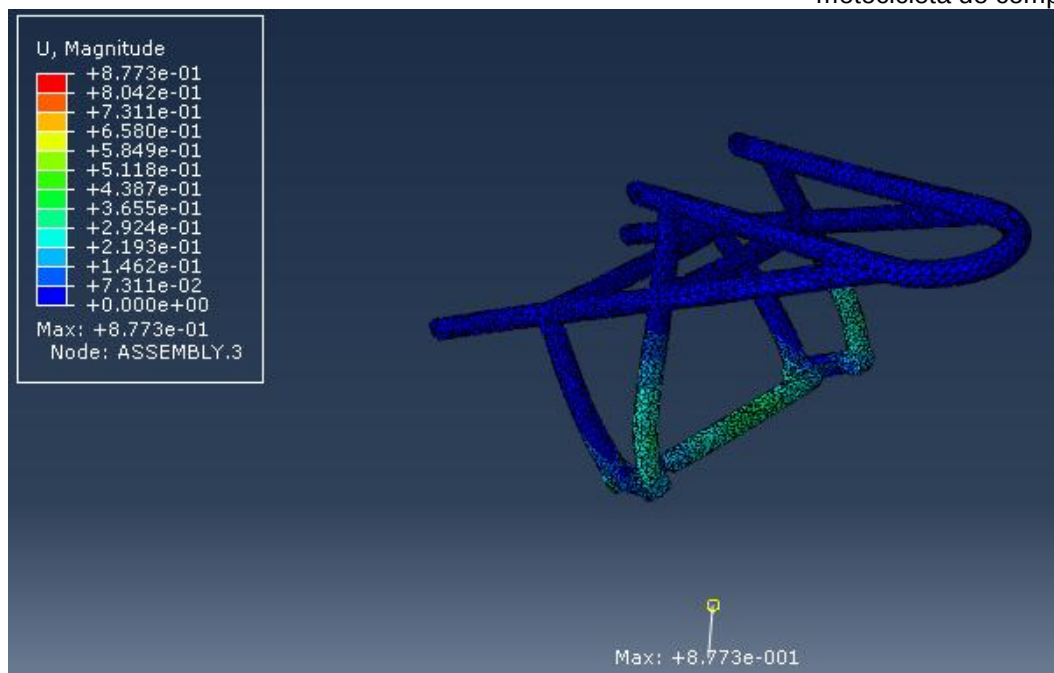


Figura 136- Desplazamientos en subchasis con refuerzo debido a piloto ¹⁴²

La mejora es más que evidente, ya que se pasa de una tensión máxima de 150 MPa a otra de 97 MPa. Igualmente el desplazamiento se consigue limitar hasta los 0.5 mm en la zona de unión de las estriberas.

10.5. Conclusiones De Los Análisis

Con todos los datos recogidos en las simulaciones anteriores se puede considerar que la estructura cumple sobradamente con las solicitaciones a las que se le va a exigir, puesto que no sobrepasa en ningún caso los límites elásticos de los materiales de fabricación. De esta manera se asegura que el chasis siempre se encuentre en régimen elástico y no se produzca ningún fallo estructural. Si bien en el caso de por ejemplo el subchasis ha sido necesario añadir un refuerzo, el resto de la estructura se puede considerar válida para fabricación.

A modo de resumen se incluyen en la siguiente tabla los valores máximos de tensión y desplazamiento encontrados en las diferentes solicitaciones:

¹⁴¹ Creación propia en Abaqus® 6.14

¹⁴² Creación propia en Abaqus® 6.14



	Tensión de Von Misses (MPa)	Desplazamiento global (mm)	Coeficiente de seguridad
<i>Frenada máxima e inicio de viraje</i>	150	110	1.67
<i>Prueba estática en banco</i>	136	0.77	1.84
<i>Balancín</i>	195	2.18	1.28
<i>Subchasis (carga de piloto)</i>	97	0.5	1.49

Tabla 8.- Tabla-resumen de análisis¹⁴³

En la tabla anterior se ha incluido el coeficiente de seguridad como el límite elástico del material dividido entre la tensión máximo aparecida en el elemento de tal material.

Evaluando estos se comprueba que la estructura cumple con holgura excepto en el caso de frenada máxima, donde hay algunos concentradores de tensión que pudieran ser puntos de debilidad de la estructura. Se debería poner especial atención a la hora de realizar la soldadura en estas zonas y en caso de duda poner un refuerzo o un redondeo que suavice los ángulos.

Igual caso se presenta en el balancín donde hay unos concentradores de tensiones fuertes debidos a las restricciones de movimiento que en la realidad no son tales.

En cuanto al resto no debería haber preocupaciones de que se pudieran alcanzar los límites elásticos. Esto es indicativo de que el chasis ha sido sobredimensionado en ciertas zonas, aunque el hecho de tener que acoplar tantas estructuras auxiliares para este prototipo de motocicleta eléctrico ha obligado a ello.

¹⁴³ Creación propia

11. Optimización estructural

La optimización estructural permite agilizar el desarrollo de un componente maximizando la relación rigidez-peso, economía... para lo cual es necesario saber qué se va optimizar, definiendo para ello la función objetivo. De igual manera se pueden fijar ciertos parámetros que serán las llamadas restricciones.

La optimización de componentes mecánicos en concreto trata de solucionar la forma que debe tener una pieza o estructura, lo cual implica maximizar o minimizar ciertas magnitudes físicas o función objetivo satisfaciendo las restricciones adoptadas.

11.1. Tipos de optimización estructural

Las más importantes para este análisis son:

- Optimización de tamaño o paramétrica. Se basa en variar la geometría de la sección de un elemento lineal. Se busca la distribución óptima del espesor conociendo y manteniendo fija el área de diseño durante el proceso de optimización.



Figura 137.- Optimización de tamaño¹⁴⁴

- Optimización de forma. En esta el área de diseño varía durante el proceso de optimización. Se persigue la forma óptima mediante la variación del perímetro de la geometría. Es un proceso sencillo pero tiene poco alcance debido a que depende de la topología que pudiera no ser la ideal.



Figura 138.- Optimización de forma¹⁴⁵

¹⁴⁴ TFG Optimización estructural de elementos mecánicos, Eduardo García 2014



- Optimización topológica: se basa en sustraer y añadir material a elementos del área de diseño para alcanzar el diseño óptimo. La principal ventaja radica en que no se requiere de un diseño previo acertado ni un conocimiento del comportamiento de la estructura, pudiéndose partir de una geometría “en bruto” que será afinada por el algoritmo de optimización.



Figura 139.- Optimización topológica ¹⁴⁶

Este tipo de optimización integrada con el MEF se empleará para el definir el diseño de ciertos elementos del presente trabajo, utilizando el programa Abaqus® y el método SIMP.

11.1.1.1. *Material sólido isotrópico con penalización (SIMP)*

El método SIMP (*Solid Isotropic Microstructure with Penalization*) es el método de máxima rigidez más extendido en la actualidad. En esta formulación existe una variable de diseño (densidad relativa) por elemento, cuyo valor adimensional puede presentar cualquier valor comprendido entre “0” y “1”, donde “0” significa la ausencia de material y “1” cuando es completamente sólido.

El objetivo del método SIMP es determinar los valores de las variables, es decir, la cantidad de material que hay que disponer por elemento de forma que, minimice la función objetivo (energía de deformación) con una sola restricción, la cantidad total de material está acotada superiormente por un porcentaje, denominado factor de llenado del volumen del dominio. Sin embargo, y a pesar de las aparentes ventajas, se producen de forma sistemática inestabilidades numéricas que dificultan la convergencia, produciendo configuraciones en forma de tablero de ajedrez (*checkerboard*). Por ello, es habitual imponer penalizaciones o restricciones adicionales, tanto para estabilizar la solución como, para impedir la existencia de valores intermedios de densidad relativa (carentes de una correlación física). Por

¹⁴⁵ TFG Optimización estructural de elementos mecánicos, Eduardo García 2014

¹⁴⁶ TFG Optimización estructural de elementos mecánicos, Eduardo García 2014



último, al resultado obtenido se le suele aplicar un filtro de imagen con el objeto de favorecer su interpretación.

Los diseños resultantes, tras todas estas correcciones, reproducen en muchas ocasiones modelos de estructuras de barras. Sin embargo, la bondad de las soluciones es por lo menos discutible, ya que dependen de numerosos parámetros (factor de llenado, discretización de la malla, penalizaciones, filtros de imagen, etc.).

11.2. Optimización del chasis

En este caso particular, partimos de un diseño de chasis basado en tubos y perfiles que se quiere mantener constante debido a que el proceso de fabricación empleado no deja margen a emplear otro tipo de estructuras.

Así pues el objetivo principal será optimizar ciertos elementos auxiliares como el soporte de rótula del chasis, en SolidWorks® e importados a Abaqus®.

El proceso seguido en Abaqus® es exactamente el mismo que para las simulaciones del chasis. La única diferencia estriba en que en vez de aplicar el módulo *Job* se aplica el *Optimization*.

Para ello basta crear el *task* correspondiente, que en este caso serán de tipo topológico. Dentro de este se puede elegir “congelar” ciertas geometrías que se conservarán intactas. Además, hay que elegir en este paso la técnica de interpolación, que como se ha explicado anteriormente será SIMP.

El siguiente paso es crear las *Design Response*. Como nos interesa buscar la geometría más rígida posible con el mínimo volumen utilizado, las variables serán la rigidez (relacionada inversamente con la energía de deformación) y el propio volumen.

Posteriormente se establece que la función objetivo sea minimizar el valor de la energía de deformación que asegure la máxima rigidez.



Par indicar al programa los límites, se le debe introducir unas restricciones, que pueden ser sobre el porcentaje de volumen eliminado, la fuerza de deformación máxima o mínima, restricciones geométricas... En este caso se aplicarán restricciones del primer tipo, es decir que no elimine más del 15% de volumen inicial.

Una vez introducidos estos parámetros que serán constantes para todos los análisis se lanza la simulación.

11.2.1. Soporte de rótula de chasis

Años anteriores se hizo el diseño de esta pieza poco estético y sobredimensionado. El objetivo este año era conseguir una versión optimizada.

Para ello se parte de un tocho que es fácil de trabajar en fresadora, para terminar proponiendo un diseño optimizado que se pueda elaborar en CNC.

El modelo inicial es el siguiente:

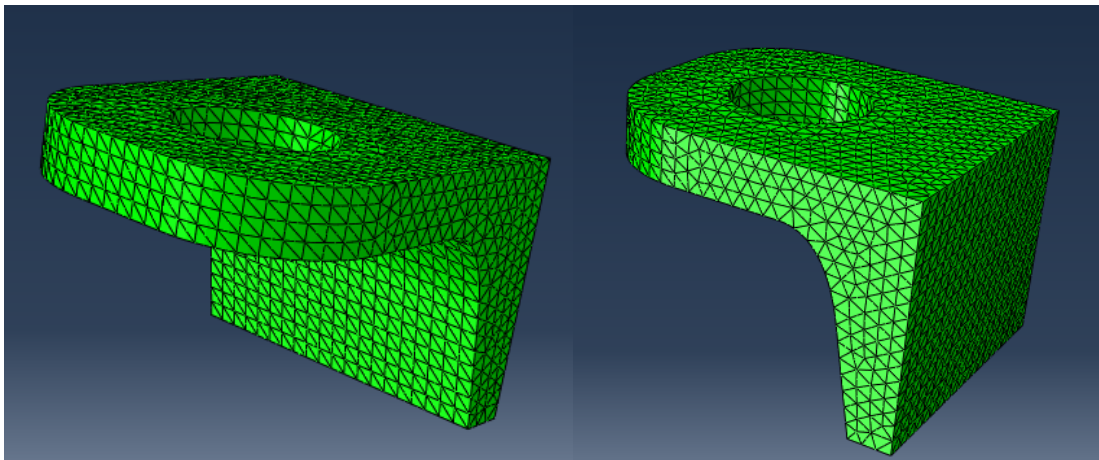


Figura 140.- Modelo inicial de soporte de rótula de chasis¹⁴⁷

Aplicando una fuerza horizontal de 10 kN y 1kN de lateral, tras un proceso de 30 ciclos, se obtiene la siguiente geometría:

¹⁴⁷ Creación propia en Abaqus® 6.14

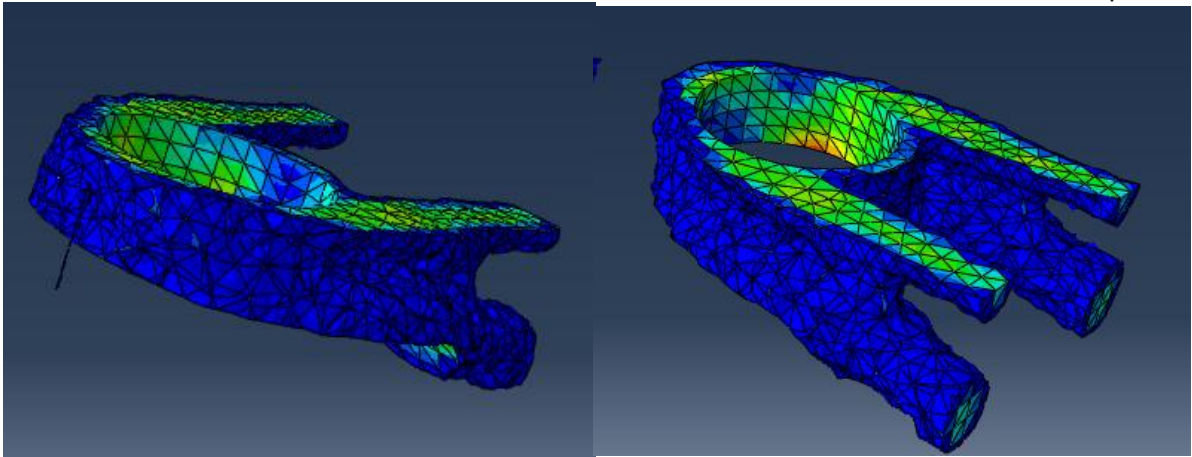


Figura 141.- Modelo optimizado de soporte de rótula de chasis ¹⁴⁸

Está claro que la cantidad de material quitado es significativo. La propuesta mantiene el alojamiento de la rótula intacto como restricción geométrica. No obstante en la cara posterior que se ancla al chasis se ha quitado demasiado material, ya que aunque mantiene puntos de apoyo, esta debe ser totalmente plana para facilitar su soldadura. Además esta pieza tiene como tensión máxima un valor de 246 MPa, que no sobrepasan los 250 del Aluminio 6082 T6 y por tanto aseguramos su cumplimiento bajo tensión

Con esto, se crea el diseño final optimizado en Solidworks:

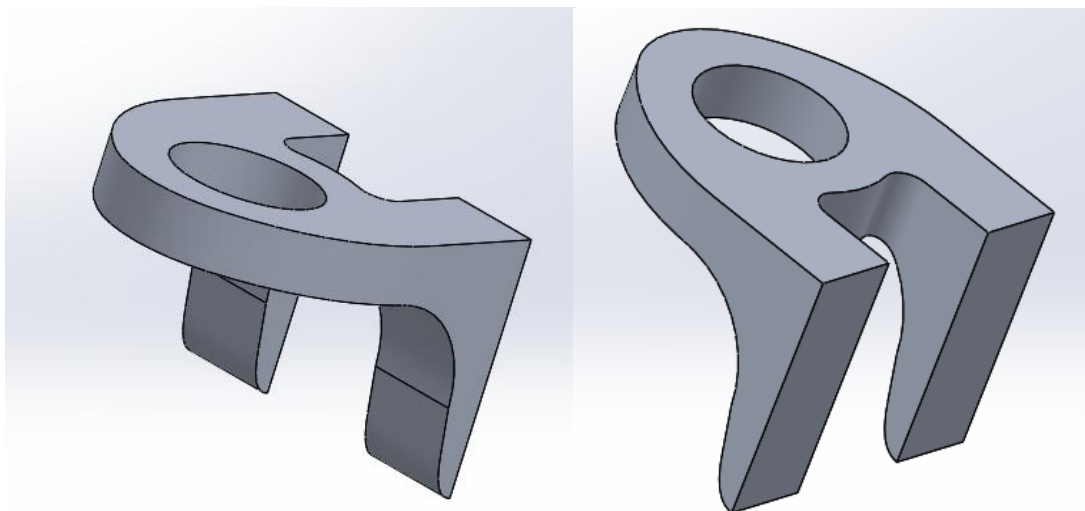


Figura 142.- Soporte de rótula de chasis optimizada modelada ¹⁴⁹

¹⁴⁸ Creación propia en Abaqus® 6.14

¹⁴⁹ Creación propia en Solidworks® 2015



11.2.2. *Portapinzas delantero*

Otro elemento que se va a optimizar es el portapinzas de freno delantero. Este es un elemento al que hay que prestar atención puesto que es de vital importancia que aguante toda la fuerza de frenado del disco, y a la misma vez sea ligero puesto que es una masa no suspendida.

El diseño original dado por las geometrías de botella de horquilla y pinza es el siguiente:

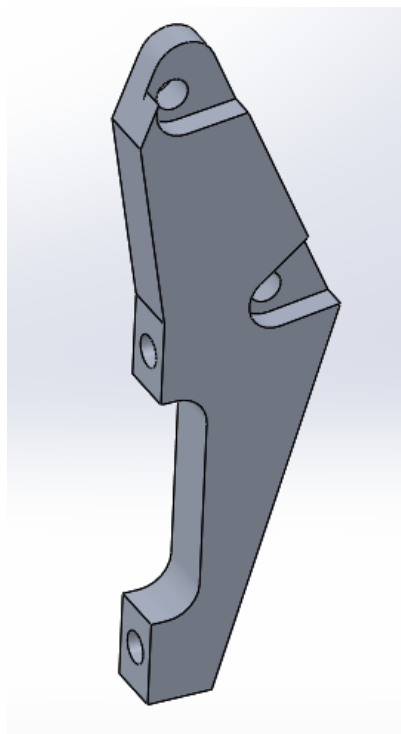


Figura 143.- Portapinzas inicial ¹⁵⁰

Aplicando una fuerza de 5000 N donde la pastilla friccionaría con el disco, y empotrando los apoyos:

¹⁵⁰ Creación propia en Solidworks® 2015

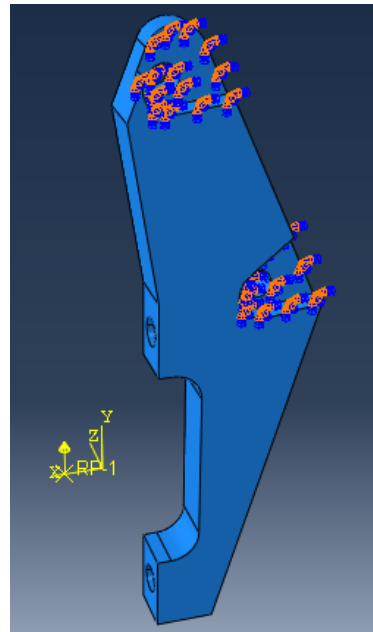


Figura 144.- Solicitación portapinzas ¹⁵¹

Y finalmente iniciando la optimización se obtiene el siguiente resultado:

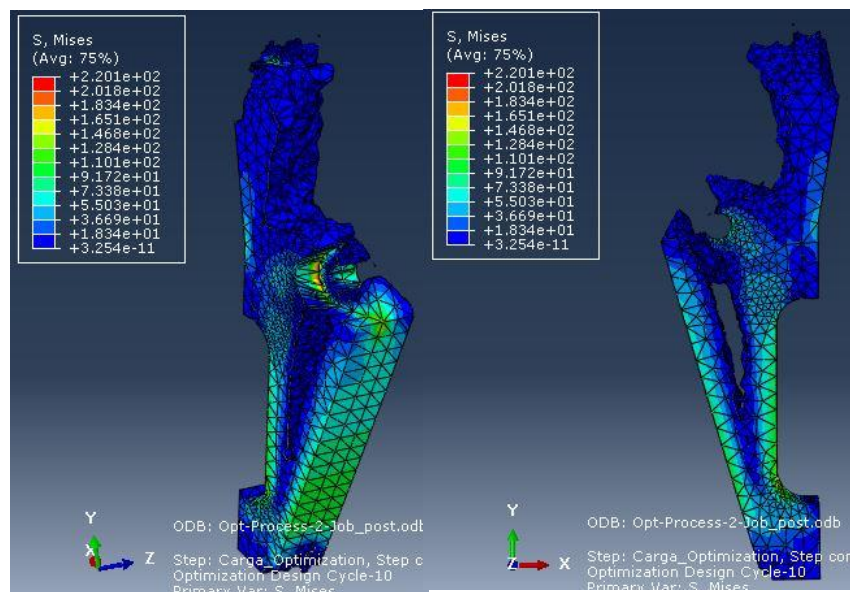


Figura 145.- Portapinzas optimizado ¹⁵²

Como se observa en las imágenes, mantiene constantes las uniones a la pinza, y hace un vaciado de material en la parte inferior y casi completo en la parte superior. Además vuelve a cumplir el valor de la tensión máxima.

¹⁵¹ Creación propia en Abaqus® 6.14

¹⁵² Creación propia en Abaqus® 6.14



Con estos resultados se puede extraer el siguiente diseño, que básicamente es un vaciado de la pieza:

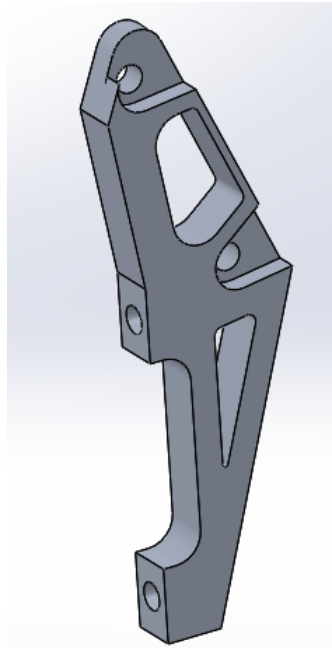


Figura 146.- Portapinzas optimizado modelado ¹⁵³

12. Conclusiones y comentarios

El desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado ha perseguido el objetivo de diseñar el chasis de una motocicleta que será único por su naturaleza casi artesanal. Además es un trabajo pionero al integrar una tecnología relativamente nueva como es el de la propulsión por motor eléctrico en el mundo de la competición y que sin duda abrirá la puerta a futuras innovaciones y mejoras. Esto ha supuesto un doble reto, ya que a parte del propio de diseñar una motocicleta casi desde cero se suma el poco o nulo desarrollo que tienen este tipo de motocicleta a día de hoy, en un mundo dominado por la combustión interna. No obstante el partir de la experiencia de haber fabricado este equipo ya dos prototipos anteriores ha facilitado el tener un punto de partida, y el empleo de cada vez más técnicas de diseño, simulación y fabricación asistidas por ordenador ha hecho que el resultado converja hacia una solución válida incluso antes de haber fabricado nada. Esto demuestra que hoy en

¹⁵³ Creación propia en Solidworks® 2015



día, tanto la experiencia como el saber utilizar herramientas informáticas son dos pilares fundamentales en cualquier proyecto de ingeniería.

Se ha hecho un repaso somero a los fundamentos del Método de los Elementos Finitos, finalizando con su aplicación a través de software Abaqus®, que es una herramienta que ofrece un abanico de posibilidades casi infinito, facilitando el llegar a una solución óptima en un corto periodo de tiempo y con un ahorro considerable en recursos.

En cuanto a la parte puramente de diseño, no ha sido un proceso aislado de prueba y error, si no que cada pieza ha sido modelada y pensada teniendo en cuenta su factibilidad de fabricación, peso y desempeño dentro de la estructura final, por lo que el intercambio de información entre otras áreas ha sido constante. Lo cual a veces obliga a repensar una y otra vez el diseño de una sola pieza, labor que sin un software como Solidworks® hubiera sido imposible de llevar a cabo en un periodo de tiempo corto.

No cabe duda de que el diseño final, si bien no ha sido el más ligero, va a asegurar un alto nivel de fiabilidad, sin duda necesaria por ser un primer prototipo de motocicleta eléctrica, que no sólo se realiza en la Escuela Politécnica de Jaén en primicia, sino que inaugura una competición a nivel internacional pionera en su campo. El objetivo es finalizar y por ello el tener un alto coeficiente de seguridad es importante. Seguramente con los años, este proyecto pueda evolucionar y converger hacia una optimización casi total.

13. Acciones futuras

Este proyecto abre todo un abanico de posibilidades a estudiar en siguientes aproximaciones: redistribución de componentes, empleos de diferentes materiales... No obstante para ello primero hay que terminar el proyecto vigente y comprobar que todo lo estudiado aquí se cumple en la realidad. Para ello el prototipo debe saltar del papel al metal. A ese propósito se deberán completar planos de conjunto y de despiece detallados y acotados para que el equipo encargado de tal labor pueda



fabricar cada pieza con el mayor rigor posible. No obstante los planos anexados en este trabajo se incluyen solo como referencia para aquel que lo consulte.

Aunque el objetivo final del trabajo es el análisis de la estructura propuesta y el corroborar que cumple bajo cualquier solicitud, no se puede perder de vista que cualquier otra estructura puede ser válida con métodos como los aquí desarrollados y con otros similares, como utilizando la optimización de forma y no topológica.

De igual manera, un conocimiento más profundo de Abaqus® puede permitir emplear diferentes algoritmos y restricciones, someter a la estructura a pruebas dinámicas, ensayos de fatiga... y en definitiva acercar mucho más el comportamiento real de la estructura al mundo informático.

Como siempre, la imaginación e ingenio del autor pueden llevar a cotas insospechadas el estudio de cualquier propuesta, empleando nuevos materiales, nuevas geometrías, suspensiones novedosas o configuraciones motrices totalmente diferentes de las establecidas. Sin duda el disponer de una nueva tecnología como es el caso de este proyecto puede ayudar a disparar las innovaciones y a cambiar el modo de transporte tal y como lo conocemos hoy.



Bibliografía

Moto Engineering Fundation (2015). Reglamento de la Competición, IV Competición Internacional MotoStudent 2015 – 2016, versión 08.2015

Datos de la Battery University: <http://batteryuniversity.com/>

Revista Popular Mechanics, Octubre 1911

Artículo sobre la Shinden Yon, blog Column: <http://columnm.com/team-mugen-confirms-2015-isle-of-man-tt-entry-4178/>

M. Arias-Paz (2003). Motocicletas, Editorial Dossat 2000

Tipos de chasis de motocicletas, web: Centro-Zaragoza": www.centro-zaragoza.com

Tony Foale (2002) Motorcycle handling and chassis design.

Catálogo de aluminios de Alacermas S.A.

Introduction to Finite Element Methods. Obtenido de <http://www.colorado.edu/engineering/cas/courses.d/IFEM.d/>

Eduardo García (2014). TFG Optimización estructural de elementos mecánicos,

Zeferino da Fonseca (2011). El método de los elementos finitos: una introducción.

Abaqus 6.14 Documentation. (2014).



Anexo I: Reglamento de la IV COMPETICIÓN INTERNACIONAL MOTOSTUDENT 2015 – 2016

SECCIÓN B: REGLAMENTO TÉCNICO GENERAL

Artículo 3: Chasis

B.3.1 Objetivo

No se permite el uso de un chasis comercial ni tan siquiera una unidad modificada. Deberá tratarse de un chasis prototipo novedoso de fabricación propia.

Se engloba en este artículo el chasis principal, el subchasis y el basculante.

B.3.1.1 No hay limitaciones en el tipo de diseño de chasis, basculante o subchasis, siempre y cuando el resultado cumpla con la normativa impuesta en el presente Reglamento.

B.3.2 Materiales

No está permitido fabricar el chasis en titanio ni aleaciones de titanio. Respecto al resto de materiales no se impone ningún tipo de restricción.

B.3.3 Soldaduras y uniones

Está permitida la soldadura de elementos estructurales por cualquier medio, pero deberá resultar una estructura consistente.

B.3.3.1 En las estructuras de tipo celosía se deberá buscar la correcta triangulación en los nodos de la estructura.

B.3.4 Topes anticaída

B.3.4.1 Es obligatorio el uso de topes de Nylon, fibra o materiales de dureza similar para proteger el chasis y el motor lateralmente en caso de caída.

B.3.4.2 Los topes anticaída podrán situarse tanto en el interior como en el exterior del carenado.

SECCIÓN E: VERIFICACIONES TÉCNICAS

Artículo 1: Objetivo Y Metodología

E.1.1 Objetivo

El objetivo de las verificaciones previas es comprobar que las motos presentadas por los equipos participantes en la Competición cumplen con las especificaciones de prestaciones y seguridad reflejadas en el Reglamento Técnico (Secciones B, C y D).

E.1.1.1 Las verificaciones técnicas previas no son puntuables para la Competición MotoStudent, pero pueden ser excluyentes si se detecta un incumplimiento de la



normativa impuesta, o si la moto no es considerada como segura para participar en las pruebas.

E.1.1.2 Las verificaciones técnicas previas se llevarán a cabo por comisarios técnicos licenciados y personal cualificado del Cuerpo Técnico de la Organización.

E.1.1.3 En caso de disputa sobre el cumplimiento de la normativa reflejada en el Reglamento Técnico, o sobre la seguridad que ofrezca la moto en pista, la decisión del Cuerpo Técnico de la Organización será inapelable.

E.1.2 Responsabilidad de los equipos

Es responsabilidad de cada equipo asegurarse de que la moto cumpla con todas las normas reflejadas en el Reglamento Técnico General.

E.1.2.1 Al presentar la moto a las verificaciones técnicas, el equipo acepta haberse asegurado de que la moto cumple con la normativa impuesta por la Organización.

E.1.3 Procedimiento

Las verificaciones previas se dividen en 3 fases:

- Verificación estática de seguridad.
- Verificación de seguridad en banco.
- Verificación dinámica de seguridad en pista.

Artículo 2: Verificación Estática De Seguridad

E.2.1 Aplicación

Las verificaciones técnicas estáticas descritas en el presente artículo afectan a las motos presentadas tanto para la categoría “MotoStudent Petrol” como para la Categoría “MotoStudent Electric”.

E.2.2 Procedimiento

La moto será examinada por los comisarios técnicos siguiendo todas normas en el orden en que aparecen en el Reglamento Técnico de la Competición.

E.2.2.1 Los equipos pueden disponer de los elementos de recambio (cualquier componente o parte de la moto) que consideren oportunos. Estos recambios deberán ser presentados a la Organización simultáneamente con el prototipo para su verificación.

E.2.2.2 Las verificaciones estáticas se llevarán a cabo en el Box Técnico, situado bajo la torre de control, próximo al PGO.

E.2.2.3 La moto deberá presentarse en condiciones apropiadas para participar en las pruebas MS2, es decir, cumpliendo estrictamente toda la normativa reflejada en el Reglamento Técnico de la Competición.

E.2.2.4 La utilización de componentes no verificados por la Organización significará la expulsión inmediata de la Competición.

E.2.2.5 Para las verificaciones estáticas deberán asistir al Box Técnico únicamente 2 integrantes del equipo, que serán los encargados de transportar la moto y algún tipo de sujeción o soporte que permita presentarla en posición estática para su examen.



E.2.2.6 Se exigirá la presentación del Pasaporte Técnico entregado junto al correspondiente Kit MotoStudent de cada equipo, definido en el Art. A.4.4.8 del Presente Reglamento.

Artículo 3: Verificación De Seguridad En Banco

E.3.1 Aplicación

Las verificaciones técnicas en banco descritas en el presente artículo afectan a las motos presentadas tanto para la categoría “MotoStudent Petrol” como para la Categoría “MotoStudent Electric”.

E.3.2 Procedimiento

La moto se someterá a un proceso de verificaciones en banco mediante una serie de pruebas detalladas a continuación.

E.3.2.1 Las verificaciones de seguridad en banco se llevarán a cabo en el Box Técnico, situado bajo la torre de control, próximo al PGO.

E.3.2.2 Las verificaciones de seguridad en banco se realizarán seguidamente de la verificación estática de seguridad.

E.3.3 Banco de ensayo

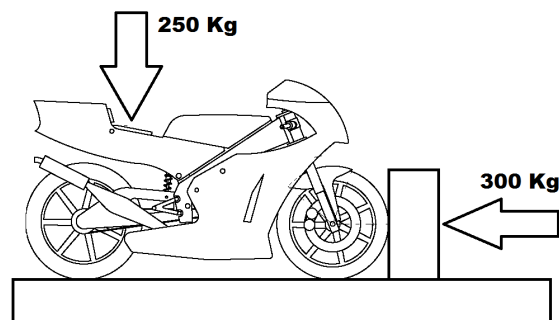
Si el Cuerpo Técnico de la Organización lo estimara necesario, se podrá someter a la moto a una serie de fuerzas horizontales y verticales en un banco de ensayos para comprobar rigidez del chasis, correcto ensamblaje, geometrías y trabajo de suspensiones.

E.3.3.1 Se aplicarán sobre la moto las siguientes fuerzas:

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

E.3.3.2 Estas cargas se aplicarán sucesivamente 2 veces consecutivas y se verificará que la medida es repetitiva en cuanto a deformación con un error entre medidas inferior a un 10% y que no aparece ningún tipo de fallo o fisura en los componentes estructurales o elementos de unión.

E.3.3.3 Descripción gráfica de la prueba:



Artículo 6: Verificación Dinámica De Seguridad En Pista



E.6.1 Aplicación

Las verificaciones dinámicas descritas en el presente artículo afectan a las motos presentadas tanto para la categoría “MotoStudent Petrol” como para la Categoría “MotoStudent Electric”.

E.6.2 Procedimiento

Un piloto probador designado por la Organización realizará una serie de pruebas dinámicas en pista para verificar el correcto funcionamiento de la moto.

Para que la moto se considere como apta para la participación en MotoStudent deberá cumplir:

E.6.2.1 La moto deberá iniciar la marcha y avanzar por sus propios medios.

E.6.2.2 La moto deberá frenar correctamente tanto en conducción suave como agresiva.

E.6.2.3 La moto deberá poder realizar una serie de giros a diferentes velocidades.

E.6.2.4 El piloto probador determinará si la moto cumple los requisitos básicos de seguridad para tomar parte en la Competición.

E.6.3 Vuelta a circuito

Una vez verificados los diferentes aspectos, el piloto probador de la Organización dará una vuelta completa al Circuito de Velocidad.

E.6.4 Validación

E.6.4.1 Si la moto se considera como apta tras la verificación dinámica, será marcada con el correspondiente adhesivo, y el equipo podrá pasar a participar en la fase MS1.



Anexo II. Planos

En este anexo se presentan una serie de planos de las distintas partes que componen el chasis modelado. Dichos planos contienen sólo las dimensiones generales del diseño y su objetivo es meramente ilustrativo para un mayor detalle de cualquier dimensión específica del modelo se pueden consultar los ficheros CAD adjuntos a la memoria de este trabajo.

De mismo modo, en la etapa previa a la fabricación del chasis se deberán elaborar de los planos de conjunto y despiece del chasis completamente detallados y acotados según normas UNE e ISO.