

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ  
Escuela Politécnica Superior

**GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
AUTOMÁTICA INDUSTRIAL**

Trabajo Fin de Grado

Diseño y análisis de un elemento de suspensión por Finite

Element Method (FEM)

**Autor:** D. Rubén Magro Checa

**Director/es:** D<sup>a</sup>. Cristina Alén Cordero

**TRIBUNAL:**

**Presidente:** D. Saturnino Maldonado Bascón

**Vocal 1º:** D. José Bienvenido Sáez Landete

**Vocal 2º:** D<sup>a</sup>. Cristina Alén Cordero

**CALIFICACIÓN:** .....

**FECHA:** .....



## AGRADECIMIENTOS

---

A Paula, por ser única, maravillosa y especial, por estar cada segundo a mi lado, animándome y apoyándome, por todo su cariño, por ser la fuerza que me empuja a la felicidad y a continuar cumpliendo sueños con ilusión, por su gran ayuda para poder finalizar con éxito otra etapa de la vida. Gracias.

A mis padres, a mi hermano y hermana, por todo su apoyo cada día. Por enseñarme que con esfuerzo, disciplina y humildad, no hay nada imposible y, que a pesar de momentos complicados que planteen la vida, siempre hay una sonrisa para seguir avanzando y ser felices.

A mis abuelos y tíos, por su gran ayuda y cariño, porque sin ellos no habría sido posible llegar a escribir estas líneas.

A mi profesora y tutora, Cristina, por su ayuda y sus consejos cuando los he necesitado, por la invitación al curso, el esfuerzo dedicado y la confianza depositada en mí desde el primer día para la realización de este trabajo.

A mis amigos y compañeros, por el aprendizaje recibido de cada uno de ellos y por los buenos momentos pasados estos años de universidad.

A todas esas personas que, de una manera u otra, se han interesado por mi progreso académico.

GRACIAS.



# Índice General

---

<b>I.</b>	<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
	<b>Palabras clave</b> .....	<b>1</b>
<b>II.</b>	<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
	<b>Keywords</b> .....	<b>2</b>
<b>III.</b>	<b>RESUMEN EXTENDIDO</b> .....	<b>3</b>
<b>IV.</b>	<b>MEMORIA</b> .....	<b>7</b>
<b>1.</b>	<b>Planteamiento del trabajo</b> .....	<b>9</b>
1.1.	Objetivos .....	11
1.1.1.	Objetivos específicos .....	11
1.1.2.	Objetivo general .....	11
1.1.2.1.	¿Qué es la Formula Student? .....	11
1.1.2.2.	Estructura de la competición .....	13
1.1.2.2.1.	Pruebas estáticas .....	13
1.1.2.2.2.	Pruebas dinámicas.....	14
1.2.	Campo de aplicación.....	14
1.3.	Alcance .....	14
1.4.	Limitaciones.....	15
<b>2.</b>	<b>Base teórica</b> .....	<b>17</b>
2.1.	La suspensión en el automóvil.....	19
2.1.1.	Historia y evolución de los sistemas de suspensión .....	19
2.1.2.	El sistema de suspensión .....	19
2.1.2.1.	Masa suspendida y masa no suspendida.....	20
2.1.2.2.	Empuje, cabeceo y balanceo.....	20
2.1.3.	Elementos y características del sistema de suspensión .....	21
2.1.3.1.	Elementos elásticos.....	21
2.1.3.1.1.	Resortes o muelles .....	21
2.1.3.1.2.	Barras estabilizadoras .....	25
2.1.3.1.3.	Neumáticos .....	27
2.1.3.2.	Elementos de amortiguación .....	27

2.1.3.2.1. Amortiguadores .....	27
2.1.3.3. Elementos estructurales .....	32
2.1.3.3.1. Trapecios.....	32
2.1.3.3.2. Mangueta .....	33
2.1.3.3.3. Buje.....	34
2.1.3.3.4. Rótula.....	34
2.1.3.3.5. Silentblocks.....	35
2.1.4. Clasificación y tipos de suspensión.....	35
2.1.4.1. Según la geometría .....	35
2.1.4.1.1. Suspensión rígida.....	35
2.1.4.1.2. Suspensión semirrígida .....	36
2.1.4.1.3. Suspensión independiente.....	37
2.1.4.2. Según el sistema de control .....	42
2.1.4.2.1. Suspensión pasiva .....	42
2.1.4.2.2. Suspensión activa.....	43
2.1.4.2.3. Suspensión semi-activa.....	44
2.1.4.3. En competición .....	45
2.1.4.3.1. Push-rod.....	45
2.1.4.3.2. Pull-rod .....	45
2.1.5. Suspensión independiente .....	46
2.1.5.1. Geometría de la suspensión y parámetros cinemáticos dependientes de la dirección .....	46
2.1.5.1.1. Vía.....	46
2.1.5.1.2. Batalla .....	47
2.1.5.1.3. Ángulo de caída .....	48
2.1.5.1.4. Ángulo de salida .....	49
2.1.5.1.5. Ángulo de avance.....	50
2.1.5.1.6. Convergencia y divergencia.....	50
2.1.5.2. Centro de gravedad.....	51
2.1.5.3. Centro instantáneo.....	52
2.1.5.4. Centro de balanceo .....	52
2.1.5.5. Geometría anti-levantamiento y anti-hundimiento .....	54
2.1.5.6. Geometría de Ackermann.....	55

2.2. La rueda en el automóvil .....	58
2.2.1. El neumático.....	58
2.2.1.1. Partes .....	58
2.2.1.2. Tipos.....	59
2.2.1.3. Dimensiones .....	59
2.2.1.4. Designación .....	61
2.2.1.5. Tablas de carga y velocidad .....	62
2.2.2. La llanta .....	63
2.2.2.1. Partes .....	63
2.2.2.2. Tipos.....	64
2.2.2.3. Dimensiones .....	64
2.2.2.4. Designación .....	65
2.2.2.5. Estructura .....	65
<b>3. Diseño del sistema de suspensión.....</b>	<b>67</b>
3.1. Chasis de partida.....	69
3.2. Requerimientos según la normativa SAE .....	69
3.2.1. Batalla y configuración del vehículo.....	69
3.2.2. Vía .....	70
3.2.3. Protección de las piernas del conductor .....	70
3.2.4. Elementos estructurales .....	71
3.2.5. Recorrido de la suspensión.....	71
3.2.6. Ruedas .....	71
3.2.7. Elementos de sujeción y seguridad .....	71
3.3. Diseño del sistema de suspensión.....	73
3.3.1. Introducción a los sistemas CAD .....	73
3.3.2. Software de aplicación .....	73
3.3.2.1. Autodesk Inventor .....	73
3.3.2.2. Formatos de archivo .....	74
3.3.2.3. Creación de piezas sólidas.....	75
3.3.3. Diseño de las piezas del sistema de suspensión .....	76
3.3.3.1. Esquema y material de las piezas del sistema de suspensión.....	76
3.3.3.2. Procedimiento del diseño detallado del trapecio inferior.....	77

3.3.3.3. Diseño del resto de elementos .....	86
3.3.4. Diseño de la llanta y el neumático.....	98
3.3.5. Ensamblaje del sistema de suspensión .....	99
3.3.5.1. Ensamblaje de la rueda.....	99
3.3.5.2. Ensamblaje de los trapecios, mangueta y amortiguador .....	99
3.3.5.3. Ensamblaje de la mangueta con el buje .....	100
3.3.5.4. Ensamblaje de la rueda, el buje y los elementos de suspensión.....	100
3.3.5.5. Ensamblaje de los anclajes con el chasis .....	100
3.3.5.6. Ensamblaje del sistema de suspensión con el chasis.....	101
3.3.6. Resultado del sistema de suspensión delantero acoplado al chasis.....	101
3.4. Análisis cinemático del sistema de suspensión mediante elementos finitos .....	102
3.4.1. Introducción a los elementos finitos.....	102
3.4.2. Análisis de tensión.....	104
3.4.2.1. Punto de partida.....	104
3.4.2.2. Análisis estático.....	104
3.4.2.3. Resultados obtenidos .....	106
3.4.2.4. Interpretación de los resultados .....	108
<b>4. Conclusiones y trabajos futuros.....</b>	<b>109</b>
4.1. Conclusiones .....	111
4.2. Trabajos futuros .....	112
<b>V. PRESUPUESTO .....</b>	<b>113</b>
<b>Presupuesto detallado .....</b>	<b>115</b>
<b>Presupuesto total del trabajo .....</b>	<b>116</b>
<b>VI. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>117</b>
<b>ANEXO I. PLANOS.....</b>	<b>127</b>
<b>ANEXO II. PLIEGO DE CONDICIONES.....</b>	<b>129</b>
<b>ANEXO III. NORMATIVA FORMULA STUDENT.....</b>	<b>131</b>
<b>VII. CONTENIDO DEL CD-ROM .....</b>	<b>133</b>

# Índice de figuras

---

Figura a. Monoplaza <i>DUT Racing Team</i> . Delft —Países Bajos— .....	3
Figura b. Buggy con los elementos de suspensión.....	4
Figura 1.1. Monoplaza <i>BME Formula Racing Team</i> —Budapest— .....	12
Figura 2.1. Movimientos de balanceo, cabeceo y guiñada en un vehículo .....	20
Figura 2.2. Muelle en estado de reposo.....	21
Figura 2.3. Muelle cónico y muelle con paso variable.....	22
Figura 2.4. Muelle con carga.....	22
Figura 2.5. Ballesta.....	23
Figura 2.6. Hoja maestra y “ojo” de la ballesta.....	23
Figura 2.7. Fijación de la ballesta en el chasis .....	23
Figura 2.8. Ballesta fijada longitudinalmente en un vehículo industrial.....	24
Figura 2.9. Barra de torsión.....	24
Figura 2.10. Fijación de la barra de torsión entre el trapecio y el chasis .....	25
Figura 2.11. Barra estabilizadora .....	25
Figura 2.12. Balanceo del vehículo sin barra estabilizadora.....	26
Figura 2.13. Balanceo del vehículo con barra estabilizadora.....	26
Figura 2.14. Neumático .....	27
Figura 2.15. Partes del amortiguador .....	28
Figura 2.16. Amortiguador de fricción.....	28
Figura 2.17. Amortiguador giratorio (izda.) y de pistón (drcha.).....	29
Figura 2.18. Amortiguador hidráulico telescópico Bi-Tubo .....	30
Figura 2.19. Amortiguador hidráulico telescópico Mono-Tubo .....	30
Figura 2.20. Amortiguador hidráulico telescópico de gas .....	31
Figura 2.21. Brazo de suspensión.....	32
Figura 2.22. Forma de los trapecios en competición.....	32
Figura 2.23. Eje (izda.) y cuerpo (drcha.) de la mangueta .....	33
Figura 2.24. Rótulas esféricas de la mangueta .....	33
Figura 2.25. Buje .....	34
Figura 2.26. Rótula.....	35
Figura 2.27. Silentblock (izda.) y silentblock interno al trapecio anclado al chasis (drcha.)...	35
Figura 2.28. Esquema de suspensión rígida .....	36
Figura 2.29. Suspensión rígida en el eje trasero.....	36
Figura 2.30. Suspensión semirrígida .....	37
Figura 2.31. Esquema de suspensión de eje oscilante.....	38
Figura 2.32. Suspensión de brazos tirados en el eje trasero .....	38
Figura 2.33. Composición del sistema de suspensión de brazos tirados.....	39
Figura 2.34. Suspensión MacPherson .....	39
Figura 2.35. Suspensión MacPherson aplicada al eje delantero .....	40
Figura 2.36. Suspensión de paralelogramo deformable .....	40
Figura 2.37. Partes que componen la suspensión multibrazo o multilink.....	41
Figura 2.38. Suspensión multibrazo o multilink .....	41

Figura 2.39. Suspensión multibrazo con elementos guía transversales u oblicuos.....	42
Figura 2.40. Suspensión multibrazo con brazos de guía longitudinal.....	42
Figura 2.41. Suspensión pasiva.....	42
Figura 2.42. Suspensión activa rígida.....	43
Figura 2.43. Suspensión activa suave.....	44
Figura 2.44. Suspensión semi-activa.....	44
Figura 2.45. Suspensión Push-rod.....	45
Figura 2.46. Suspensión Pull-rod.....	45
Figura 2.47. Vía del vehículo.....	47
Figura 2.48. Batalla del vehículo.....	47
Figura 2.49. Ángulo de caída.....	48
Figura 2.50. Ángulo de caída positivo y negativo.....	48
Figura 2.51. Ángulo de salida.....	49
Figura 2.52. Ángulo de salida positivo, negativo y nulo.....	49
Figura 2.53. Ángulo de avance.....	50
Figura 2.54. Ángulo de avance positivo, negativo y nulo.....	50
Figura 2.55. Convergencia y divergencia en el vehículo.....	51
Figura 2.56. Suspensión en estado de reposo para el cálculo de la geometría.....	53
Figura 2.57. Suspensión en funcionamiento para el cálculo de la geometría.....	53
Figura 2.58. Suspensión de doble brazo cuyos ejes no son paralelos.....	54
Figura 2.59. Centro de transferencia en la geometría anti-hundimiento.....	54
Figura 2.60. Geometría de Ackermann.....	56
Figura 2.61. Análisis de Jeantaud.....	56
Figura 2.62. Ángulos máximos de giro en las ruedas izq. (arriba) y der. (abajo).....	57
Figura 2.63. Partes que componen el neumático.....	59
Figura 2.64. Dimensiones del neumático.....	59
Figura 2.65. Indicadores de desgaste del neumático.....	60
Figura 2.66. Designación del neumático.....	61
Figura 2.67. Neumático AT 21x7-10 Scorcher para el diseño.....	61
Figura 2.68. Dimensiones para el diseño del neumático.....	62
Figura 2.69. Partes de la llanta.....	63
Figura 2.70. Dimensiones de la llanta.....	64
Figura 2.71. Estructura de la llanta.....	65
Figura 3.1. Chasis de partida.....	69
Figura 3.2. Batalla del monoplaza.....	70
Figura 3.3. Vía del monoplaza.....	70
Figura 3.4. Despiece de las piezas del sistema de suspensión.....	76
Figura 3.5. Trapecio inferior.....	77
Figura 3.6. Boceto del trapecio inferior.....	77
Figura 3.7. Segundo boceto para crear el brazo del trapecio.....	78
Figura 3.8. Operación <i>Barrido</i> en el brazo izquierdo.....	78
Figura 3.9. Operación <i>Revolución</i> .....	78
Figura 3.10. Operación <i>Barrido</i> en el brazo derecho.....	79
Figura 3.11. Operación <i>Revolución</i> para la barra vertical.....	79

Figura 3.12. Operación <i>Revolución</i> para la barra horizontal.....	80
Figura 3.13. Operación <i>Extrusión</i> .....	80
Figura 3.14. Boceto para la creación del anclaje del amortiguador .....	80
Figura 3.15. Operación <i>Extrusión</i> .....	81
Figura 3.16. Operación <i>Simetría</i> .....	81
Figura 3.17. Forma del trapecio inferior .....	81
Figura 3.18. Vista lateral del apoyo de la rótula .....	82
Figura 3.19. Inicio del entorno <i>Soldadura</i> .....	82
Figura 3.20. Uso de la operación <i>Soldadura para ranuras</i> .....	82
Figura 3.21. Uso de la operación <i>Soldadura de empalme</i> .....	83
Figura 3.22. Uso de la operación <i>Soldadura para ranuras</i> en el apoyo al chasis.....	83
Figura 3.23. Uso de la operación <i>Soldadura de empalme</i> en el anclaje.....	84
Figura 3.24. Conjunto soldado .....	84
Figura 3.25. Inicio del ensamblaje del trapecio con los elementos de unión.....	84
Figura 3.26. Uso de la operación <i>Restringir</i> por “Coincidencia” .....	85
Figura 3.27. Uso de la operación <i>Restringir</i> por “Nivelación” .....	85
Figura 3.28. Restricción por “Nivelación” del casquillo con el silentblock .....	85
Figura 3.29. Restricción por “Coincidencia” de la rótula con el apoyo del trapecio .....	86
Figura 3.30. Diseño final del trapecio de suspensión inferior.....	86
Figura 3.31. Amortiguador.....	86
Figura 3.32. Parte inferior (izda.) y superior (drcha.) del amortiguador.....	87
Figura 3.33. Diseño del muelle .....	87
Figura 3.34. Diseño completo del amortiguador.....	87
Figura 3.35. Vista frontal (izda.) y posterior (drcha.) del trapecio superior .....	88
Figura 3.36. Diseño completo del trapecio superior .....	88
Figura 3.37. Alzado (izda.), perfil (centro) y planta (drcha.) del buje .....	88
Figura 3.38. Vista frontal (izda.) y posterior (drcha.) del diseño del buje .....	89
Figura 3.39. Alzado (izda.) y perfil (drcha.) de la mangueta .....	89
Figura 3.40. Vista frontal (izda.) e isométrica (drcha.) del diseño de la mangueta .....	89
Figura 3.41. Vista frontal (izda.) y posterior del disco de freno .....	90
Figura 3.42. Diseño del disco de freno.....	90
Figura 3.43. Representación de la colocación de los anclajes .....	91
Figura 3.44. Bocetos con las medidas de los anclajes.....	91
Figura 3.45. Diseño de los anclajes del chasis .....	91
Figura 3.46. Boceto del anclaje del chasis para el amortiguador.....	92
Figura 3.47. Diseño del anclaje del chasis para la parte superior del amortiguador.....	92
Figura 3.48. Tuerca almenada de la mangueta (izda.) y perno amortiguador (drcha.) .....	93
Figura 3.49. Casquillos de los trapecios superior e inferior (izda.) y elementos internos del buje (drcha.) .....	93
Figura 3.50. Anillo interior (izda.) y tope de sujeción (drcha.) del buje.....	93
Figura 3.51. Rodamiento rígido de bolas FAG 6004-C-2Z (izda.) y 6005-2ZR (drcha.) del buje.....	93
Figura 3.52. Pernos de sujeción del buje con la llanta .....	94
Figura 3.53. Diseño del tope de goma del amortiguador .....	94

Figura 3.54. Diseño de la copela de la parte superior del amortiguador .....	94
Figura 3.55. Diseño de la arandela de la parte superior del amortiguador .....	94
Figura 3.56. Diseño de la tuerca que sujeta el tope de goma .....	95
Figura 3.57. Diseño de la tuerca reguladora de la compresión del muelle .....	95
Figura 3.58. Diseño de la tuerca almenada de las rótulas de fijación .....	95
Figura 3.59. Diseño del perno M10 y tuerca de sujeción amortiguador-trapecio-chasis .....	95
Figura 3.60. Diseño del casquillo de los trapecios superior e inferior de una rueda.....	96
Figura 3.61. Diseño del silentblock de los trapecios superior e inferior .....	96
Figura 3.62. Diseño de los elementos internos del buje.....	96
Figura 3.63. Diseño del anillo interior del buje.....	96
Figura 3.64. Diseño del tope de sujeción del buje con la mangueta .....	97
Figura 3.65. Diseño rodamiento bolas FAG 6004-C-2Z (izda.) y FAG 6005-2ZR (drcha.) ...	97
Figura 3.66. Perno M11 que fija el buje con la llanta (x4 en cada rueda) (izda.) y M6 que fija el disco de freno con el buje (x6 en cada rueda) (drcha.).....	97
Figura 3.67. Perno M11 y tuerca de los anclajes del chasis (x4 en cada rueda) .....	97
Figura 3.68. Llanta de 10” .....	98
Figura 3.69. Vista posterior (izda.) y frontal (drcha.) del diseño de la llanta de 10” .....	98
Figura 3.70. Neumáticos 175/80-R10 .....	98
Figura 3.71. Diseño del neumático 175/80-R10 .....	99
Figura 3.72. Vista frontal de la rueda.....	99
Figura 3.73. Fijación de los trapecios con la mangueta y el amortiguador.....	99
Figura 3.74. Ensamblaje de los trapecios con la mangueta y el amortiguador .....	99
Figura 3.75. Ensamblaje de los rodamientos internos del buje (izda.) y el buje (drcha.) con la mangueta .....	100
Figura 3.76. Ensamblaje de la rueda y los elementos de suspensión .....	100
Figura 3.77. Ensamblaje de los anclajes con el chasis .....	100
Figura 3.78. El sistema de suspensión ensamblado con el chasis .....	101
Figura 3.79. Alzado del ensamblaje completo .....	101
Figura 3.80. Planta del ensamblaje completo.....	101
Figura 3.81. Vista en isométrico del ensamblaje completo.....	102
Figura 3.82. Mallado por el “Método de Elementos Finitos” .....	102
Figura 3.83. Nodos que definen el elemento.....	103
Figura 3.84. Mangueta .....	103
Figura 3.85. Punto de partida del análisis de tensión .....	104
Figura 3.86. Tensión de Von Mises del muelle en marcha normal.....	106
Figura 3.87. Desplazamiento del muelle en marcha normal .....	106
Figura 3.88. Tensión de Von Mises del muelle en condición de frenada .....	107
Figura 3.89. Desplazamiento del muelle en condición de frenada.....	107

# Índice de tablas

---

Tabla 1.1. Pruebas estáticas y dinámicas de la competición.....	13
Tabla 2.1. Rangos de carga máxima del neumático .....	62
Tabla 2.2. Rangos de velocidad máxima del neumático .....	63
Tabla 3.1. Material de las piezas compradas del sistema de suspensión .....	76
Tabla 3.2. Peso total del monoplaza.....	104
Tabla V.1. Coste del material del sistema de suspensión.....	115
Tabla V.2. Coste del material informático y formación.....	115
Tabla V.3. Costes adicionales del proyecto .....	116
Tabla V.4. Presupuesto total .....	116
Tabla ANEXO II. Características y dimensiones de los elementos de suspensión.....	129



---

## I. RESUMEN

---

Este Trabajo Fin de Grado consiste en el diseño y análisis del sistema de suspensión delantera de un monoplaça de competición perteneciente al proyecto Formula Student; utilizando software CAD y de cálculo por el método de los elementos finitos.

Inicialmente se realizará un estudio teórico riguroso del funcionamiento del sistema de suspensión de un automóvil y las distintas partes que lo componen.

Seguidamente, con el software Autodesk Inventor Professional 2011 se crearán los elementos mecánicos que componen la suspensión y finalmente, se estudiará el comportamiento estático del muelle helicoidal usando el módulo de análisis de Autodesk Inventor.

### **Palabras clave**

Diseño, suspensión, competición, Formula Student, software.

---

## II. ABSTRACT

---

The objective of this dissertation is to design and analyze a front suspension system of a Formula student car. For achieving this aim, we will use Computer Aided Design (CAD) software and finite element analysis software based on finite element methodology.

First of all, we will perform a rigorous theoretical study of functions of the suspension system of a car and all its components.

Afterwards, all the components of the suspension system are created by using Autodesk Inventor Professional 2011 software.

Furthermore, the static behavior of our coil spring will be analyzed using the module of analysis of Autodesk Inventor.

### **Keywords**

Design, suspension system, competition, Formula Student, design software.

### III. RESUMEN EXTENDIDO

El sistema de suspensión es una de las partes fundamentales de los vehículos, el cual se encarga de absorber cualquier obstáculo que se oponga en el camino —ya sean desigualdades en el terreno o giros— para proporcionar al vehículo la mayor adherencia con el suelo y estabilidad posible, y ser capaz de solventarlo para continuar su marcha con las mejores prestaciones.

Su estudio requiere especial atención en los vehículos de competición con la finalidad de mejorar la aerodinámica para trabajar a velocidades elevadas, siendo capaz de hacer frente a las reacciones que actúan en movimiento. Debido a la influencia de los monoplazas de tipo Fórmula 1 en automoción, se está mejorando la investigación de estos sistemas en la actualidad, cogiendo ejemplo otras categorías en este ámbito, como puede ser el monoplaza de tipo Formula Student.



Figura a. Monoplaza *Formula Student DUT Racing Team*. Delft —Países Bajos—.

El diseño y puesta en marcha de este tipo de vehículos está pensado para competir entre universidades a nivel internacional. Los equipos participantes trabajan en las distintas partes del monoplaza durante un curso académico con el objetivo de ponerlo en funcionamiento los días que se lleve a cabo la competición.

Para el diseño del monoplaza es estrictamente necesario cumplir una serie de reglas específicas pertenecientes a la normativa del organismo Formula SAE para poder hacer frente a las pruebas y ensayos que imponen la organización satisfactoriamente, además de estudiar y diseñar cada parte del monoplaza paralelamente por parte de los integrantes del equipo, lo que lleva a reducir el tiempo para facilitar su diseño.

Debido a que es el primer año que la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá participa en esta competición, la inexperiencia en conocimientos de mecánica es un factor a tener en cuenta, por lo que se ha contado con la ayuda de personal de dicho

departamento, buscando de una manera sencilla y fiable la realización del diseño del monoplaza con el objetivo de ser admitidos en la primera convocatoria.

Dentro del diseño del sistema de suspensión que se trata en este trabajo, previamente se van a estudiar las distintas partes y los tipos de suspensión que existen, llegando a la conclusión por parte de los miembros del equipo “Santander UAH Racing” que el tipo de suspensión que mejor se adapta a un monoplaza tipo Formula Student, es la suspensión independiente de paralelogramo deformable.

Esta suspensión es la más utilizada en los vehículos de competición. Consiste en dos trapecios superpuestos en cada rueda—independiente una rueda de otra— los cuales unen la mangueta con el chasis permitiendo el movimiento de la rueda por el paso de desigualdades en el terreno sin afectar a la estructura del chasis, gracias a la acción del conjunto muelle-amortiguador.

Para su diseño, se proponen dos opciones al inicio del trabajo; la primera fue diseñar los elementos que componen este tipo de suspensión para posteriormente fabricarlos, con la finalidad de adaptarlos en el chasis diseñado por otro miembro del equipo, y la segunda fue comprar las piezas y tomar las medidas de cada elemento para realizar su diseño. Finalmente, por limitaciones temporales, se optó por la segunda opción, comprando las piezas que componen el sistema de suspensión perteneciente al buggy de la figura b.



**Figura b. Buggy con los elementos de suspensión.**

Al ser piezas de una estructura diferente a la del monoplaza Formula Student, se realiza un estudio para valorar la posibilidad de adaptarlo directamente sin necesidad de modificar las medidas de alguna de estas piezas en el diseño, observando que se debe reducir la distancia del eje delantero para cumplir la normativa de la SAE, acortando los trapecios de suspensión de la medida real.

El estudio y el diseño del sistema de suspensión se hacen mediante el software de diseño Autodesk Inventor Professional 2011. Es un software para trabajar tanto en 2D como en 3D, el cual permite diseñar los elementos que componen el sistema y tener una visión de la realidad del conjunto ensamblado.

### ***III. Resumen extendido***

---

Posteriormente y para finalizar el diseño del sistema de suspensión se va a realizar, mediante el módulo de cálculo de elementos finitos —concretamente el módulo de análisis de tensión del software Autodesk Inventor— la simulación a uno de sus elementos, el muelle helicoidal, para estudiar el comportamiento que presenta en dos casos: en el primero se supone conducción en marcha normal y en línea recta aplicando una carga de  $500 \text{ N}^1$  y en el segundo, se supone una acción de frenada aplicando una carga de  $800 \text{ N}^2$ , comprobando el coeficiente de seguridad del diseño frente a deformación permanente y a rotura del material.

Con este trabajo, se va a tener una primera aproximación del diseño del sistema de suspensión del eje delantero perteneciente al proyecto Formula Student, teniendo la opción de optimizarlo en trabajos futuros para mejorar la evolución del monoplaza en las próximas convocatorias de la competición.

---

<sup>1</sup> Sabiendo que la masa total del monoplaza son  $2000 \text{ N}$ , se supone que el peso se reparte equitativamente entre las cuatro ruedas, por lo tanto se aplica al muelle una carga de  $500 \text{ N}$ .

<sup>2</sup> Sabiendo que la masa total del monoplaza son  $2000 \text{ N}$  y suponiendo que se transfiere el  $80 \%$  de la masa al eje delantero — $1600 \text{ N}$ —, a cada muelle de la suspensión delantera le corresponde una carga de  $800 \text{ N}$ .



## IV. MEMORIA

---



# 1. Planteamiento del trabajo

---



### 1.1 **OBJETIVOS.**

#### 1.1.1 **Objetivos específicos.**

El objetivo principal del trabajo es el diseño y el cálculo teórico de la resistencia mecánica del sistema de suspensión delantero de un vehículo de competición.

El diseño se realizará a partir de la creación de piezas, mediante software específico 3D. La herramienta utilizada será Autodesk Inventor Professional 2011, la cual es capaz de diseñar y simular un elemento real o un prototipo diseñado previamente.

El cálculo teórico se realizará mediante pruebas de simulación utilizando herramientas FEM —Finite Element Method o método de los elementos finitos, MEF— tanto para análisis estático como para análisis de comportamiento dinámico, con el fin de que dicho elemento, una vez fabricado, pueda soportar los esfuerzos para los que ha sido diseñado.

#### 1.1.2 **Objetivo general.**

El objetivo que se propone con el desarrollo del trabajo es, diseñar el sistema de suspensión con los ensayos y realizar los análisis necesarios para comprobar que cumple la normativa impuesta por la SAE y que el funcionamiento sea el óptimo, y con ello poder adaptarlo al eje delantero del monoplaza de tipo Formula Student que se va a realizar por primera vez en la Universidad de Alcalá.

El equipo de la universidad, con nombre “Santander UAH Racing”, está formado por miembros de diferentes departamentos de la Escuela Politécnica Superior y, en este primer año de participación<sup>3</sup> se plantea como objetivo viajar al circuito de Montmeló para exponer al jurado de la competición los elementos creados y la documentación necesaria para tener una primera toma de contacto con la competición SAE, y poder progresar y mejorar el monoplaza con el transcurso de los años.

##### *1.1.2.1. ¿Qué es la Formula Student?*

La Formula Student —o Formula SAE (Society of Automotive Engineering) — es una competición que se realiza cada año entre universidades a nivel internacional, con el objetivo de promover la formación de los estudiantes en el mundo ingenieril a través del diseño, fabricación y construcción de un monoplaza unido al marketing y costes que supone.

---

<sup>3</sup> En los días 28-31 de agosto: la experiencia para el equipo ha resultado positiva ya que, tanto la organización como otros equipos más expertos, han aportado consejos sobre posibles modificaciones y configuraciones para el diseño del monoplaza. Los dos primeros días se presentaron las pruebas estáticas, siendo aconsejados sobre cómo rellenar la documentación técnica. En lo relativo a la suspensión que se ha presentado, se confirma que es viable aunque se pueden realizar muchas mejoras, por ello será necesario un trabajo posterior de optimización a partir del diseño de las piezas de este trabajo.

## 1. Planteamiento del trabajo

---

Con ella se pretende que los estudiantes desarrollen el trabajo como un verdadero equipo de ingeniería enfrentándose a unos plazos y a unas limitaciones, tanto técnicas como de coste, y se formen de manera cualificada. Durante el evento, los equipos se exponen ante la valoración del jurado de la organización, debiendo superar diversas pruebas que demuestren la estabilidad y la seguridad en la conducción del monoplaza.

La competición se distribuye en tres clases para poder dividir los equipos dependiendo la experiencia que tengan en el sector. La distribución se realiza de menor a mayor importancia y es la siguiente: [74]

En la *clase 3* se encuentran los equipos que inician por primera vez su andadura en una competición de estas características, participando únicamente en las pruebas de diseño y validación del modelo.

En la *clase 2* se encuentran los equipos que consiguen fabricar el vehículo por completo, pasando las pruebas del proceso inicial con éxito, con la opción de ser puntuados en las pruebas de diseño, presentación y coste. El requisito que se exige para entrar en esta clase es disponer del chasis completo y funcional.

En la *clase 1* se encuentran los equipos que tienen el monoplaza construido con la capacidad de desplazarse teniendo la opción de participar y puntuar en todas las pruebas disponibles. Existe el inconveniente de diseñar cada año un chasis nuevo pudiendo aprovechar el resto de componentes si se desea.

El monoplaza Formula Student puede competir en tres categorías dependiendo el tipo de combustible que utilicen pudiendo ser de gasolina, eléctrico o híbrido.

La forma que se asemeja a un monoplaza de este tipo es la que se observa en la figura 1.1, independientemente del combustible que utilice, rigiéndose cada equipo a la normativa para su diseño y construcción.



Figura 1.1. Monoplaza *BME Formula Racing Team* —Budapest—.

## 1. Planteamiento del trabajo

### 1.1.2.2. Estructura de la competición.

La competición Formula Student se estructura en dos pruebas generales, estáticas y dinámicas, para que los miembros del jurado de la organización puedan valorar con la puntuación adecuada, de acuerdo al trabajo realizado por parte de los equipos.

El diseño del vehículo se ha de realizar por cada equipo atendiendo a las pruebas que se llevarán a cabo para ser valorado. Si los resultados son satisfactorios se situarán en la tabla de clasificación junto a los demás participantes.

La puntuación máxima que se puede obtener es de 1000 puntos, distribuyéndose de la siguiente forma:

<i>Pruebas estáticas</i>		<i>Pruebas dinámicas</i>	
<b>Tipo de prueba</b>	<b>Puntuación</b>	<b>Tipo de prueba</b>	<b>Puntuación</b>
Inspección técnica	-	Aceleración	75 puntos
Coste y fabricación	100 puntos	Skid Pad <sup>4</sup>	75 puntos
Presentación	75 puntos	Autocross	100 puntos
Diseño	150 puntos	Eficiencia	100 puntos
		Resistencia	325 puntos
<b>Total:</b>	<b>325 puntos</b>	<b>Total:</b>	<b>675 puntos</b>

Tabla 1.1. Pruebas estáticas y dinámicas de la competición.

#### 1.1.2.2.1. Pruebas estáticas.

En las pruebas estáticas, el objetivo que tiene el equipo es el de tratar que el vehículo cumpla con la normativa impuesta por la organización, es decir, que el prototipo que se va a diseñar —para su futura fabricación y puesta en marcha— se ajusta a las restricciones y los requerimientos técnicos, de material y dimensionales exigidos.

En estas pruebas, se tiene en cuenta por un lado, la documentación que debe entregar cada equipo, la cual corresponde al coste del vehículo, el diseño realizado de cada componente para una posible inclusión en el mercado, así como la fabricación y ensamblaje de los componentes.

Por otro lado, se valora la presentación que se realice el día del evento, exponiendo al jurado del mismo el proceso seguido para el diseño del monoplaza.

Se debe destacar la importancia de cumplir los plazos marcados por la organización desde que da comienzo la competición. De no ser así, se pierde puntuación cuanto más se demore, hecho que no es conveniente para un equipo sin experiencia, ya que la entrega de la documentación es el punto fuerte de cara a competir los primeros años hasta que se realice el monoplaza definitivo.

<sup>4</sup> **Skid Pad.** En esta prueba se mide la capacidad del vehículo para realizar giros en forma de “ocho” examinando la máxima adherencia lateral.

## **1. Planteamiento del trabajo**

---

### 1.1.2.2.2. Pruebas dinámicas.

En las pruebas dinámicas, se valora el vehículo ya fabricado en su totalidad. Se realizan pruebas de conducción y manejo, para que la organización juzgue si se ha cumplido la normativa y si es así, es apto para competir junto a los participantes que superen estas pruebas.

Se realizan pruebas de aceleración, giros, frenada, así como de resistencia durante un periodo de tiempo determinado, valorando la capacidad de soportar esfuerzos y cargas sin complejidad. Si al realizar estas pruebas surgen fallos en los sistemas del vehículo o no se cumplen los requerimientos establecidos, el equipo podría ser descalificado de la competición.

Para que no ocurra esto, previamente se deben realizar ensayos rigurosos de cada elemento que compone el monoplaza hasta su puesta a punto, para comprobar que no hay error en los sistemas y se pueda competir con seguridad.

## **1.2. CAMPO DE APLICACIÓN.**

Debido a que el sistema de suspensión es una de las partes más importantes de un coche de competición, se debe tener en cuenta el diseño y estudio minucioso de los elementos que componen dicho sistema, ante posibles ensayos de torsión, para detectar y mejorar las irregularidades que pudiese tener el muelle helicoidal aplicando fuerzas en diferentes sentidos, así como ensayos de vibración para ver la resistencia que tiene el material y determinar sus modos naturales de vibración.

Para ello se requiere conocer de forma específica el programa con el que se va a trabajar durante el desarrollo del Trabajo Fin de Grado que es Autodesk Inventor.

Teniendo realizado el diseño y la simulación del sistema de suspensión final, la aplicación directa del diseño realizado es la de acoplarlo al chasis del proyecto Formula Student para participar en la competición.

## **1.3. ALCANCE.**

El alcance de este trabajo es el diseño del primer modelo del sistema de suspensión perteneciente al eje delantero del monoplaza Formula Student, realizando un análisis estático de uno de sus elementos para estudiar el comportamiento del mismo ante la aplicación de una fuerza determinada.

Fruto de este análisis y las simulaciones que se van hacer, se indicarán las conclusiones así como las recomendaciones de cara a realizar alguna modificación posterior, dejando la optimización y el análisis del sistema de suspensión completo para futuros trabajos.

#### **1.4. LIMITACIONES.**

El sistema de suspensión que se va a diseñar está condicionado por el material adquirido por parte del equipo, perteneciente a un vehículo tipo buggy. Este tipo de vehículos presenta una estructura de chasis diferente, con barras a diferente altura, lo que requiere un estudio previo al diseño, para la correcta localización de los elementos que componen la suspensión y su adaptación al chasis del monoplaza.

Esta limitación se debe a que la estructura del chasis se ha diseñado antes que la suspensión, lo que dificulta el trabajo de adaptar unas piezas de buggy a un chasis que no acepta modificaciones —ya que los ensayos a los que ha sido sometido han sido satisfactorios— siendo lo lógico diseñar el chasis y la suspensión a la vez para salvar las restricciones que impone la normativa.

Por ello, en el diseño del primer prototipo del sistema de suspensión que se realiza en este trabajo, no se define la forma de los trapecios como sería más correcto, puesto que se ha modificado su longitud con el objetivo de cumplir la distancia máxima entre ruedas impuesta por las reglas de la normativa y se ha tenido que diseñar una estructura de anclajes adicional para adaptar los elementos de la manera más óptima.



## 2. Base teórica

---



## 2.1. LA SUSPENSIÓN EN EL AUTOMÓVIL.

La suspensión en el automóvil tiene como función mantener las ruedas en contacto con el terreno dando la mayor adherencia posible, así como mantener la posición de su dirección y geometría; absorber las vibraciones que se generan por el paso de irregularidades que halla en la pista, resistiendo el balanceo del vehículo y evitando que esas vibraciones se transmitan en exceso al chasis —haciendo fiable la conducción del piloto y proporcionando seguridad y confort a los ocupantes del vehículo—.

### 2.1.1. Historia y evolución de los sistemas de suspensión.

En la época de los carruajes tirados por animales, las ruedas que se utilizaban eran de grandes dimensiones comparadas con las del habitáculo, unidas directamente a los ejes sin existir un sistema de suspensión, lo que hacía que el mínimo obstáculo se transmitiese a los ocupantes. El concepto de suspensión nació de la idea de colgar el habitáculo a unas correas de cuero desde unos soportes de metal de los ejes, de modo que este quedaba suspendido por cuatro correas con sus respectivos soportes. Esto seguía siendo incómodo e inestable pero asimilaba las desigualdades del terreno.

Según evolucionaba el automóvil con el desarrollo del motor y a la par la mejora de las suspensiones, las ruedas disminuían su tamaño considerablemente respecto a los carruajes y mejoraron sus características físicas —entrando en juego las llantas y neumáticos— viendo que existe una sintonía importante entre las ruedas y el sistema de suspensión. Aun así, no dejaban de ser sistemas de eje rígido acompañados de ballestas, las cuales proporcionaban un cierto amortiguamiento, pero seguían siendo algo inestables al no mantener constantemente las ruedas en contacto con la calzada.

En la actualidad, el uso de la combinación del amortiguador con el muelle helicoidal, junto a las distintas configuraciones de suspensión existentes, se ha conseguido que las cuatro ruedas del vehículo permanezcan adherentes al terreno a lo largo de la marcha, haciéndola cómoda, segura y estable [3].

### 2.1.2. El sistema de suspensión.

El sistema de suspensión es una de las partes más importantes que componen un automóvil. Para entender su funcionamiento, hay que comenzar hablando por la masa no suspendida y masa suspendida.

## 2. Base teórica

### 2.1.2.1. Masa suspendida y masa no suspendida.

La *masa no suspendida* comprende los elementos que se utilizan para absorber las irregularidades del terreno por donde se desplaza el vehículo, es decir, lo que es externo al chasis y va anclado a él, como son las ruedas, los brazos de suspensión, la barra estabilizadora, el muelle y el amortiguador.

La *masa suspendida* comprende todos los componentes que soporta el chasis, como son el motor, los ocupantes del vehículo, el sistema de transmisión o la carga añadida.

### 2.1.2.2. Empuje, cabeceo y balanceo.

El paso de una o varias ruedas por las desigualdades del terreno o una conducción inapropiada provoca la transmisión de vibraciones al sistema de suspensión, siendo este el que reduce la frecuencia de las oscilaciones que se transmitirán al chasis, además de generar movimientos en el centro de gravedad del vehículo.

Estos movimientos se traducen en oscilaciones de tres tipos:

- El balanceo o “roll” se produce al pasar por curvas a una velocidad elevada, siendo equivalente al giro del vehículo en el eje X.
- El cabeceo o “pitch” se produce al realizar aceleraciones o frenadas bruscas y equivale al giro del vehículo en el eje Y.
- La guiñada o “yaw” es la rotación que se produce del vehículo sobre el eje Z —eje vertical—, es decir, los virajes que se producen al cambiar de dirección.

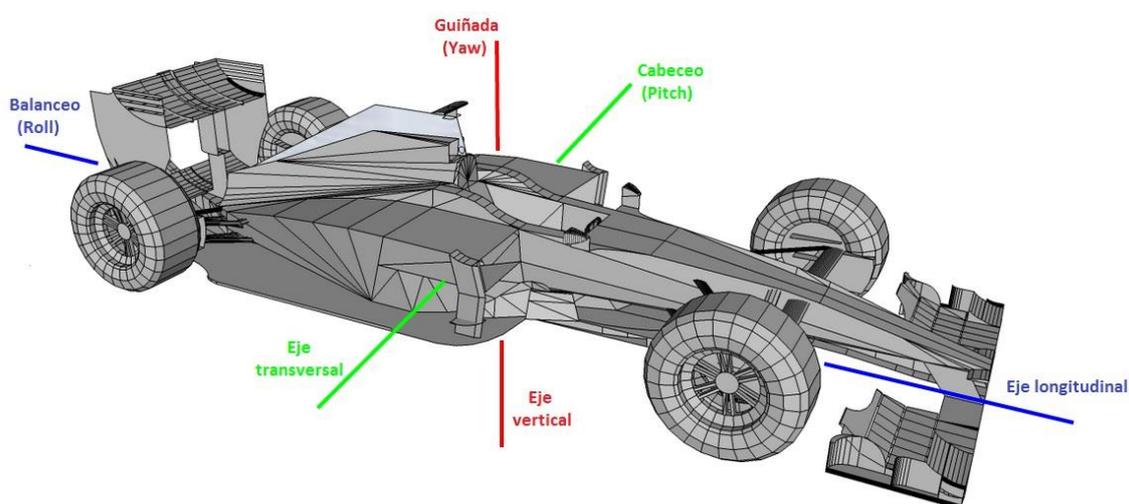


Figura 2.1. Movimientos de balanceo, cabeceo y guiñada en un vehículo.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> <http://f1framework.blogspot.com.es/2012/08/f1-aero-glossary.html>

## 2. Base teórica

### 2.1.3. Elementos y características del sistema de suspensión.

#### 2.1.3.1. Elementos elásticos.

##### 2.1.3.1.1. Resortes o muelles.

Son uno de los principales elementos del sistema de suspensión. Están situados entre las ruedas y el chasis y se utilizan para absorber la energía mecánica que se produce al transitar por un terreno con irregularidades, evitando que se transmita al chasis del vehículo.

Al ser elementos elásticos, tienen un movimiento oscilante deformándose en forma de compresión, extensión o flexión al paso por un terreno con obstáculos. Son capaces de recuperar su estado de reposo sin sufrir deformaciones permanentes en su forma.

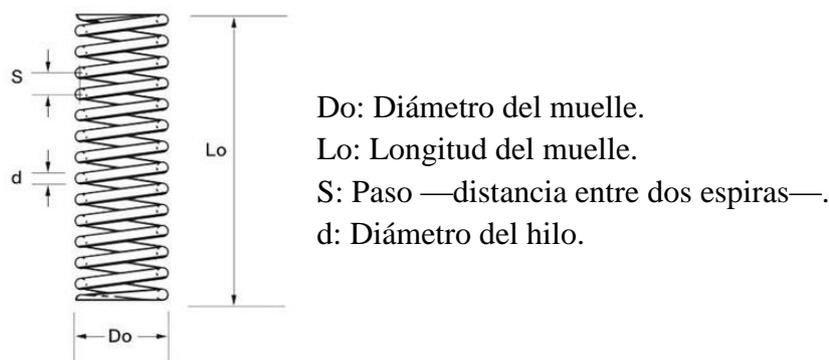
Existen diferentes tipos de resortes o muelles, entre los cuales destacan:

#### El muelle helicoidal:

Es el elemento elástico más utilizado como acumulador de energía [8] ya que no tiene fricción interna y ocupan poco espacio, a diferencia de las ballestas que tienen mayor dimensión. Está formado por un hilo de acero de sección circular enrollado sobre un eje imaginario. Normalmente, el muelle va en conjunto con el amortiguador para que, cuando absorba los impactos y se deforme, el amortiguador actúe regulando estas oscilaciones tratando de que el impacto sobre el chasis sea menor, asegurando un mayor confort a los ocupantes del vehículo.

La flexibilidad del muelle depende del diámetro del muelle, del diámetro del hilo, del número de espiras, del ángulo de inclinación de las mismas y de las características mecánicas del material [2].

Ambos extremos del muelle se diseñan planos para poder lograr un mejor asentamiento en sus bases de apoyo. El diámetro del muelle es variable dependiendo la carga que deba soportar, siendo directamente proporcional la carga al diámetro.



**Figura 2.2. Muelle en estado de reposo.**

También existen muelles con una flexibilidad progresiva. Esto se consigue con muelles helicoidales cónicos o muelles con paso variable entre espiras.



Figura 2.3. Muelle cónico y muelle con paso variable.

Para un buen control del vehículo, se debe evitar que el muelle llegue a su longitud de bloque, es decir, a un aplastamiento total. El muelle debe trabajar a la mitad de su longitud respecto el amortiguador para dejar un margen de recorrido que proporcione seguridad y estabilidad, que haga la función de absorción de impactos.

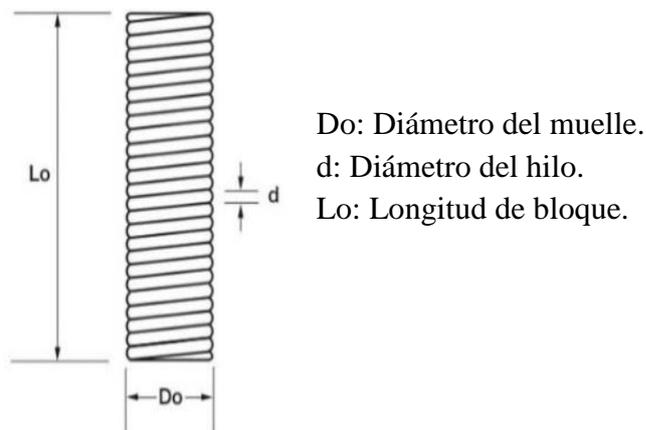


Figura 2.4. Muelle con carga.

### La ballesta:

La ballesta está compuesta por un conjunto de láminas de diferente longitud fabricadas con acero especial para muelles con gran resistencia a la rotura. Las láminas están unidas por el centro mediante un tornillo con tuerca conocido como “perno-capuchino” y por los extremos por unas abrazaderas que permiten el deslizamiento entre las láminas cuando éstas se deforman por el peso que soportan en el punto medio [2].



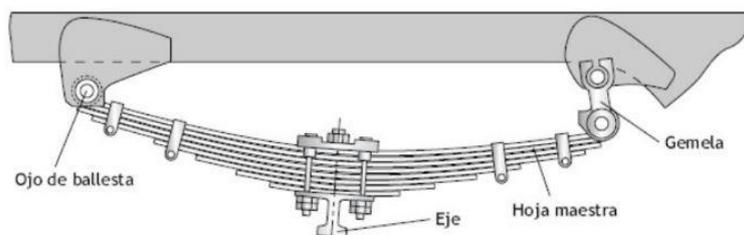
**Figura 2.5. Ballesta.**

La lámina más larga se denomina “hoja maestra”, y une el conjunto de láminas con sus extremos a los puntos de fijación del chasis. Sus extremos están doblados de forma que se pueda montar en ellos silentblocks para fijarse al chasis mediante pernos.



**Figura 2.6. Hoja maestra y “ojo” de la ballesta.**

Uno de sus extremos va fijo al chasis y en el otro se coloca una pieza de fijación al chasis, conocida como “gemela” la cual permite aumentar o disminuir la longitud favoreciendo los movimientos de flexión.



**Figura 2.7. Fijación de la ballesta en el chasis.**

Las ballestas suelen emplearse en sistemas de suspensión en los que los ejes, tanto traseros como delanteros, son rígidos. Pueden colocarse en sentido longitudinal o transversal. Normalmente, para vehículos convencionales se sitúa en sentido transversal y para vehículos industriales en sentido longitudinal como se observa en la figura 2.8.



**Figura 2.8. Ballesta fijada longitudinalmente en un vehículo industrial.**

### La barra de torsión:

La barra de torsión es un elemento elástico del sistema de suspensión que se utiliza tanto para el eje delantero como para el eje trasero.

Debido a su bajo peso, es uno de los resortes más utilizados en la suspensión de un vehículo, y respecto a las ballestas, posee mayor capacidad de absorción de energía ya que no tienen pérdidas de energía por fricción.



**Figura 2.9. Barra de torsión.**

Está fabricada con acero reforzado de elevado límite de elasticidad y sometida durante la fabricación a un proceso de resistencia contra fatiga, para que al someterse a esfuerzos de torsión —al paso de desigualdades en el terreno—, se retuerza y una vez finalizado el esfuerzo recupere su estado de equilibrio. Si sobrepasase el límite de elasticidad del material, la deformación que sufriría sería permanente [2] y no sería útil para realizar su comportamiento natural, que es absorber la energía trabajando a torsión ante los movimientos que realice la rueda respecto a la posición del chasis.

Para su colocación en el vehículo hay que tener en cuenta el peso del vehículo, el cual aplica una fuerza de torsión inicial a la barra, lo que proporciona la altura necesaria al chasis, sustituyendo de esta manera la función del muelle.

Se puede situar, tanto longitudinal como transversalmente, fijando un extremo al chasis y el otro al trapecio de suspensión actuando como palanca, de manera que la barra se oponga a cualquier movimiento vertical de la rueda.



**Figura 2.10. Fijación de la barra de torsión entre el trapecio y el chasis.**

#### 2.1.3.1.2. Barras estabilizadoras.

La barra estabilizadora, también conocida como barra anti-balanceo, es una barra — maciza o hueca— de acero elástico en forma de U que une los trapecios inferiores de la suspensión del mismo eje por sus extremos. Por el centro se fija al chasis mediante unos puntos de apoyo sobre los que puede girar. Se puede situar tanto en el eje delantero como en el trasero, siendo siempre transversal al eje longitudinal del vehículo.



**Figura 2.11. Barra estabilizadora.<sup>6</sup>**

Es un elemento que trabaja a torsión y se encarga de compensar las fuerzas que realiza una rueda sobre la opuesta del mismo eje cuando el vehículo entra en una curva —ya que tiende a inclinarse por efecto de la fuerza centrífuga— o cuando alguna de las ruedas se encuentra con desigualdades en el terreno.

Cuando el vehículo circule en línea recta, sin encontrarse obstáculos, la barra estabilizadora no realiza trabajo alguno.

<sup>6</sup> <http://www.bbsport.es/Shop/es/suspensiones-series-5-e60-e61-04-09/14725-kit-barras-estabilizadoras-eibach-bmw-5-e60.html>

Su funcionamiento consiste en generar una fuerza que contrarreste, por un lado el par de torsión producido cuando, en el mismo eje, una rueda sube y la otra baja —para mantener ambas ruedas a la misma distancia del chasis, es decir, manteniendo el chasis horizontal respecto al plano del suelo—, y por otro lado el balanceo producido por el paso por curvas.

Para comprender mejor el funcionamiento de la barra estabilizadora se van a explicar dos casos antes y después de utilizar la barra:

- Antes de poner la barra: se observa que al realizar un giro a derechas, el vehículo balancea en gran medida cargando el peso sobre la rueda izquierda.

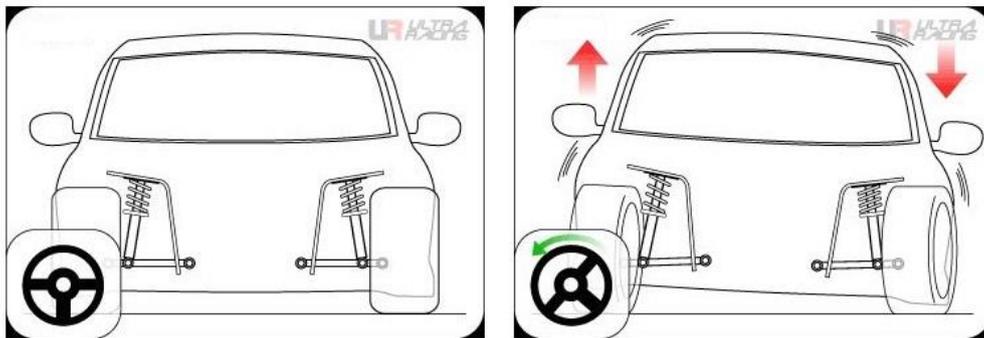


Figura 2.12. Balanceo del vehículo sin barra estabilizadora.<sup>7</sup>

- Después de poner la barra: se observa que al realizar un giro a derechas, el vehículo balancea en menor medida teniendo la barra que sin tenerla puesta, ya que se compensa la fuerza centrífuga con el par de torsión que ejerce la barra, manteniendo prácticamente estable y horizontal el chasis.

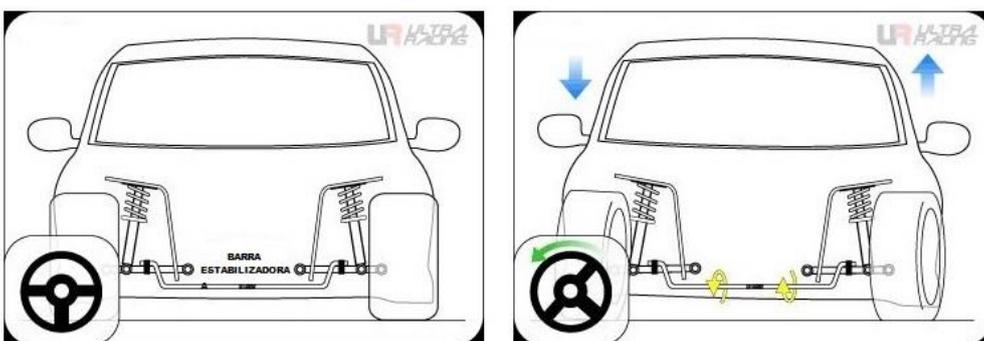


Figura 2.13. Balanceo del vehículo con barra estabilizadora.<sup>8</sup>

<sup>7</sup> <http://www.ultraracing.my/home/knowledge-base/how-it-works/>

<sup>8</sup> <http://www.ultraracing.my/home/knowledge-base/how-it-works/>

## 2. Base teórica

### 2.1.3.1.3. Neumáticos.

El neumático es el primer elemento de la suspensión y el único que tiene rozamiento con el suelo, por lo tanto debe ser capaz de absorber las desigualdades del terreno para proporcionar la adherencia necesaria del vehículo con el terreno [6].

Las funciones que tiene son: [82]

- Soportar y transmitir al terreno las cargas verticales originadas por el peso del vehículo.
- Amortiguar las acciones dinámicas originadas por las desigualdades del terreno, giro en curvas y frenado.
- Transmitir los esfuerzos longitudinales de tracción que influyen directamente en el neumático.
- Soportar los esfuerzos laterales al realizar giros facilitando la conducción y haciéndola segura.



Figura 2.14. Neumático.

### 2.1.3.2. Elementos de amortiguación.

#### 2.1.3.2.1. Amortiguadores.

#### **Descripción.**

El amortiguador es el elemento que se deforma al transformar las fuerzas que transmite el sistema de suspensión, además de devolver al resorte a su posición inicial en el mínimo tiempo posible, una vez haya realizado una serie de oscilaciones de amplitud que se transmiten al chasis, evitando que el material del resorte se fatigue para su posible rotura.

Sin el amortiguador, estas oscilaciones no se controlarían y persistirían indefinidamente en el chasis del vehículo.

### Función.

Al producirse el paso por un obstáculo, se flexiona el resorte bajando el chasis y con ello el vástago del amortiguador, deslizándose el pistón por el cilindro interior. De esta manera, se transforma la energía cinética producida en energía calorífica calentando el fluido que lleva en su parte inferior. Este fluido, normalmente aceite, se comprime obligándole a pasar por los orificios calibrados o válvulas de paso del émbolo a la cámara superior.

Este paso del aceite de una cámara a otra, frena el movimiento oscilante del chasis producido por los resortes, en el que el pistón sigue los movimientos de la rueda resultando una amortiguación más dura cuanto más difícil sea el paso del aceite por las válvulas [8].

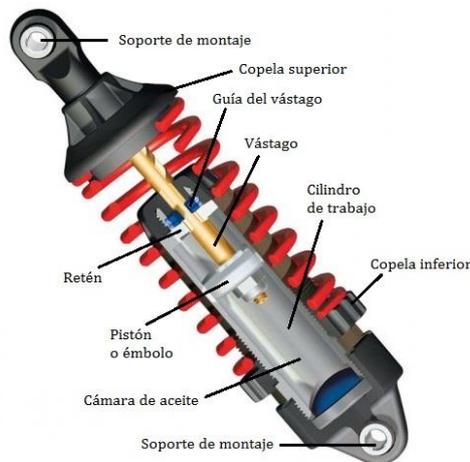


Figura 2.15. Partes del amortiguador.

### Tipos.

Los amortiguadores pueden ser de fricción o hidráulicos.

**-De fricción o rozamiento:** Uno de los primeros amortiguadores que se diseñaron. Consiste en la unión de dos brazos mediante un tornillo y un disco de fricción entre ellos. Su resistencia depende del ajuste que se realice sobre el tornillo —apretando o aflojándose—. Este amortiguador no es muy eficiente, su rendimiento no es bueno, por lo que está hoy en día prácticamente en desuso.

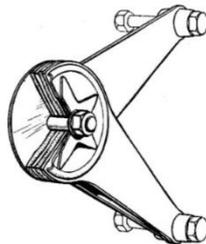


Figura 2.16. Amortiguador de fricción.

### -Hidráulicos:

- Giratorio: el amortiguador giratorio o tipo Houdaille es un clásico en el sistema de amortiguación. Estaba formado por un cuerpo cilíndrico, el cual tenía un pistón que se unía rígidamente al resorte del vehículo. Al moverse este, provocaba la rotación del pistón sumergido en aceite [60].
- De pistón: se considera el sucesor del hidráulico giratorio, hoy en día ambos inexistentes. Consistía en un cuerpo cilíndrico conteniendo aceite en su interior y un pistón que se movía a partir de un balancín con el eje en el resorte del vehículo [60].



Figura 2.17. Amortiguador giratorio (izda.) y de pistón (drcha.).<sup>9</sup>

- Telescópicos: son los amortiguadores más utilizados actualmente en automoción. Consiste en la circulación de un fluido, normalmente aceite, entre los dispositivos internos, por medio de un conjunto de válvulas que generan una resistencia al paso del mismo entre las cámaras del amortiguador.

### **Tipos de amortiguadores hidráulicos telescópicos**

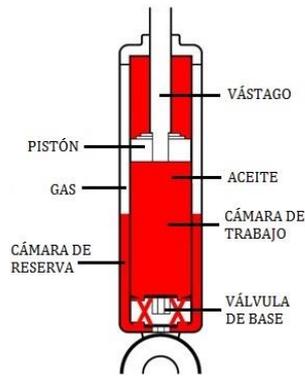
#### -Bi-Tubo:

El amortiguador hidráulico Bi-Tubo contiene dos cámaras —una interior y otra de reserva— y un pistón de doble efecto que se desplaza por la acción del vástago unido en la parte superior del amortiguador. El pistón tiene una serie de válvulas calibradas que permiten el paso del fluido.

Cuando se comprime el amortiguador se produce un exceso de fluido en la parte inferior, por lo que parte de él va a la cámara de reserva a la que accede por medio de la válvula de base.

Los amortiguadores Bi-Tubo pueden ser presurizados —conteniendo en su interior aceite y gas— o no presurizados, los cuales solo cuentan en su interior con aceite. El problema de cavitación por formación de burbujas en el aceite cuando se trabajaba a alta velocidad —que se daba en los primeros modelos—, se solucionó añadiendo gas a presión, normalmente nitrógeno a una presión de entre 2.5 y 5 bar y así se consigue mejorar el rendimiento de este tipo de amortiguadores [61].

<sup>9</sup> <http://archivodeautos.blogspot.com.es/2013/10/los-viejos-amortiguadores.html>



**Figura 2.18. Amortiguador hidráulico telescópico Bi-Tubo.**

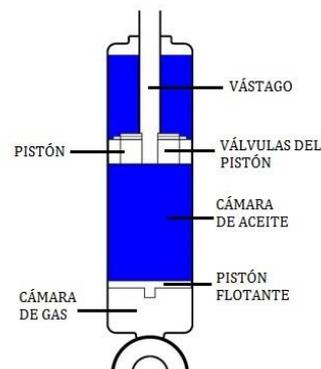
### -Mono-Tubo:

El amortiguador hidráulico Mono-Tubo está compuesto por el cuerpo central en forma de tubo —en el que hay dos cámaras, una de aceite y otra de gas a presión— y un pistón con válvulas calibradas que se desplaza por la acción del vástago a lo largo de su interior en la cámara de aceite.

Respecto al amortiguador Bi-Tubo, el Mono-Tubo dispone de un pistón flotante —sin válvulas ni orificios—, el cual divide la cámara de aceite respecto a la cámara de gas en su parte inferior. Este se coloca para dividir ambos fluidos debido a que las válvulas no trabajan de igual forma a compresión que a tracción.

Las ventajas que tiene este amortiguador respecto al Bi-Tubo son: [61]

- un funcionamiento más silencioso debido a que la presión permanente del gas garantiza un trabajo óptimo de las válvulas.
- respuesta inmediata ante variaciones de compresión-extensión.
- la presión permanente del gas evita el problema de la cavitación y que se forme espuma en el aceite cuando se trabaja a velocidades altas.
- mejora la refrigeración ya que no dispone de cámara de reserva y por ello el tubo de trabajo, ya sea la cámara de aceite o de gas, están en contacto con el aire exterior.



**Figura 2.19. Amortiguador hidráulico telescópico Mono-Tubo.**

### Amortiguadores en vehículos de competición.

La función más importante en el sistema de amortiguación en los vehículos de competición, es mantener las ruedas en contacto con el terreno para proporcionar la máxima adherencia y tracción posible. Esto se consigue con amortiguadores de **dureza muy elevada** comparada con los vehículos convencionales y **regulables** para controlar la compresión y la extensión con mayor facilidad y así poder asegurar un buen control y comportamiento del vehículo. Esta regulación repercute a las fuerzas de amortiguación que actúan en alta y baja velocidad. Para los resaltos o pianos de la pista se deben tener en cuenta las fuerzas de alta velocidad mientras que para la acción de acelerar, frenar y curvas se deben tener en cuenta las fuerzas de baja velocidad [7].

Como los muelles van unidos por cada uno de sus extremos a dos copelas del amortiguador, hay una relación directamente proporcional de la dureza del conjunto muelle-amortiguador. Cuanto más duro sea el muelle, la resistencia del amortiguador deberá ser mayor para poder soportar las vibraciones que produce el muelle. Esta resistencia será aproximadamente dos veces menor a compresión que a extensión [7].

Los amortiguadores más utilizados en los vehículos de competición son los amortiguadores de gas.



Figura 2.20. Amortiguador hidráulico telescópico de gas.

Las *ventajas* que tienen este tipo de amortiguadores para un mejor control del vehículo son: [7]

- mayor rendimiento ya que como el gas del interior se encuentra a una presión determinada permanentemente, el aceite de la cámara de trabajo no produce espuma a altas velocidades ni calentándose.
- sensibilidad muy elevada ante pequeños desplazamientos del conjunto y velocidades altas, que es lo que se busca para el diseño de los vehículos de competición.
- después de un obstáculo, disminuye el tiempo necesario para que la rueda vuelva a estar en contacto con el terreno con la máxima adherencia.

## 2. Base teórica

### 2.1.3.3. Elementos estructurales.

#### 2.1.3.3.1. Trapecios.

El término trapecio o “wishbone” hace referencia al elemento que une la mangueta con el chasis, y define la geometría de la suspensión según la posición que adopte el vehículo, restringiendo el movimiento de las ruedas y trabajando a compresión-tracción y no a flexión [6].

Los trapecios están compuestos por tubos o barras fabricadas en acero o en fundición de aluminio para dar sujeción al sistema de suspensión y poder soportar esfuerzos notables tanto transversales como longitudinales.

Uno de los extremos del trapecio está compuesto por una rótula esférica que se une a la mangueta —dejando las rotaciones libres— y el otro tiene dos puntos de unión que se fijan a los anclajes del chasis, en los que suele haber silentblocks o algún elemento elástico que absorba los impactos del movimiento de la rueda.

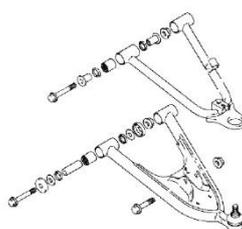
En la suspensión delantera de los vehículos convencionales, normalmente se utiliza un trapecio o brazo de suspensión inferior en el que va alojado el amortiguador, como se observa en la figura 2.21. Dispone de dos puntos de unión con el chasis en un extremo y en el otro con una rótula esférica.



**Figura 2.21. Brazo de suspensión.**

En la suspensión delantera de los vehículos de competición, hay dos trapecios por cada rueda, superior e inferior, con diferente forma cada uno de ellos dependiendo del diseño y de la geometría que adopte el sistema de suspensión en el vehículo.

Una vez unidos los dos puntos de apoyo del trapecio a los anclajes del chasis, la función que tiene es realizar movimientos en vertical hacia arriba y abajo, mientras que en el extremo de la rótula se permite que la rueda pivote en la dirección adecuada.



**Figura 2.22. Forma de los trapecios en competición.**

### 2.1.3.3.2. Mangueta.

La mangueta es el elemento del sistema de suspensión delantero que se utiliza para apoyar la rueda mediante la unión de los trapecios, dirigirla mediante el sistema de dirección y girarla a partir del giro del buje.

Normalmente, está fabricada con acero para soportar grandes esfuerzos pero para vehículos de competición será de aleaciones ligeras, ya que interesa que el peso sea menor para ganar aceleración y velocidad.

Las partes que componen la mangueta son el eje y el cuerpo, y van unidas entre sí mediante soldadura o ajuste por interferencia eje-agujero.

El *eje* tiene forma cónica y es donde se va a colocar el buje y dos rodamientos de diferente diámetro para hacer girar la rueda. En su extremo se ubica un tramo roscado para regular el correcto ajuste de los rodamientos que van interiores al buje.

El *cuerpo* de la mangueta tiene dos extremos, superior e inferior —en los que van a situarse los trapecios de suspensión—, el elemento de unión con la dirección y las fijaciones para anclar la pinza de freno con la mangueta.



Figura 2.23. Eje (izda.) y cuerpo (drcha.) de la mangueta.

En cada extremo hay una rótula esférica que permite oscilar a los trapecios además de pivotar para realizar el giro de la rueda, como se observa en la figura 2.24. Dependiendo del modelo, la rótula esférica se sitúa al contrario, en los trapecios, y van acopladas a la mangueta por los orificios que dispone para ello.



Figura 2.24. Rótulas esféricas de la mangueta.

### 2.1.3.3.3. Buje.

El buje es el elemento principal del sistema de giro de una rueda, y está localizado en el eje de la mangueta permitiendo el movimiento entre una parte giratoria respecto a una parte fija.

Se encarga de hacer girar la rueda mediante dos rodamientos de diferente diámetro situados en su interior y montados con ajuste por interferencia

Es un elemento que soporta por un extremo al disco de freno, mediante pernos de sujeción, y por el otro a la llanta, mediante las fijaciones que se le han proporcionado en el diseño, siempre estando fijo con la mangueta por su eje dejando libre el movimiento giratorio.



**Figura 2.25. Bujes.**

### 2.1.3.3.4. Rótula.

Es el elemento de unión que permite combinar el movimiento vertical del sistema de suspensión con la rueda, con el movimiento de la dirección del vehículo en todos los ángulos disponibles de la rótula, manteniendo la misma geometría de la suspensión en cada giro que se realice u obstáculo que se encuentre por el terreno, evitando con la flexión que se produce que otros elementos conectados se dañen.

Se utilizan rótulas para la suspensión y para la dirección. Las rótulas de suspensión fija los trapecios de suspensión en cada extremo superior e inferior de la mangueta, y las rótulas de dirección unen la mangueta con la barra de dirección.

Está compuesto por un perno —núcleo de la rótula que está formado por un vástago roscado y una esfera normalmente de acero—, una tuerca almenada para mantener la rótula en el punto de fijación, una cubierta llamada “guardapolvo” —para evitar que el agua o el polvo del exterior dañe la esfera— sujeta con un par de arandelas a cada extremo, una carcasa que recubre la rótula, un casquillo que evita el desgaste entre el perno y la carcasa, y la tapa situada en la base de la rótula que actúa como cierre [62].



Figura 2.26. Rótula.<sup>10</sup>

### 2.1.3.3.5. Silentblocks.

Son los elementos encargados de amortiguar la vibración y el ruido que se produzca en los apoyos del sistema de suspensión, así como en las rótulas, aislando la reacción producida para que la suspensión haga su función correctamente.

Normalmente, se sitúa en la base de los trapecios de la suspensión y se utiliza para unir estos con los anclajes del chasis, para que ante cualquier obstáculo, la reacción sea absorbida por el material elástico que lo compone.

Este material suele ser en su interior de tipo elastómero, como por ejemplo goma vulcanizada o caucho y en su exterior está formado por acero.



Figura 2.27. Silentblock (izda.) y silentblock interno al trapecio anclado al chasis (drcha.).

## 2.1.4. Clasificación y tipos de suspensión.

### 2.1.4.1. *Según la geometría.*

#### 2.1.4.1.1. Suspensión rígida.

Se denomina suspensión de eje rígido debido a que está compuesta por una barra rígida restringiendo el movimiento de una rueda respecto la otra, unidas en cada uno de sus extremos. Por este motivo, al moverse una de las ruedas en sentido vertical, la otra rueda actúa con la misma magnitud hacia el lado opuesto balanceando el vehículo.

<sup>10</sup> <http://www.rts-sa.net/antcatalogo.asp?nombre=2286&hoja=0&sesion=1>

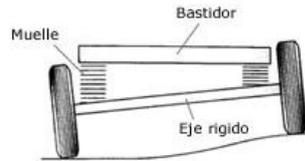


Figura 2.28. Esquema de suspensión rígida.<sup>11</sup>

Este tipo de suspensión ya no se utiliza en vehículos convencionales o de competición, ya que la masa no suspendida es muy elevada y no llegan a dar un buen resultado respecto a otro tipo de suspensión, comportándose peor ante desigualdades del terreno y provocando incomodidad e inseguridad.

En la actualidad se suele incorporar en vehículos todoterreno, camiones, autobuses o maquinaria industrial —tanto en ejes traseros como delanteros— para soportar cargas de gran peso debido a la rigidez del material de la barra.

Como *ventajas* cabe destacar el sencillo diseño y que el balanceo producido en el vehículo no afecte al ángulo de caída de las ruedas, por lo que los neumáticos sufren un desgaste menor [58].

Los *inconvenientes* que presenta son varios, destacando la transmisión de oscilaciones y movimientos de una rueda a otra —por eso no es conveniente utilizarlas en el eje delantero de la dirección, siendo más satisfactorio el resultado utilizándola en el eje trasero— y el elevado peso de la barra, ya que debe soportar grandes cargas.



Figura 2.29. Suspensión rígida en el eje trasero.

#### 2.1.4.1.2. Suspensión semirrígida.

La suspensión semirrígida está compuesta por un tubo rígido —que une ambas ruedas de un mismo eje— y soportes articulados que se unen al chasis del vehículo, los cuales permiten movimientos longitudinales del sistema de suspensión y el giro de las ruedas, transmitiendo al chasis de manera parcial las vibraciones que reciben de las desigualdades del terreno.

<sup>11</sup> <http://www.aficionadosalamecanica.net/suspension3.htm>



Figura 2.30. Suspensión semirrígida.

Como ventajas respecto a la suspensión de eje rígido hay que destacar que el tubo rígido tiene menor peso que la barra rígida, disminuyendo esto la masa no suspendida del vehículo, además de poseer elementos elásticos.

#### 2.1.4.1.3. Suspensión independiente.

La suspensión independiente es la más óptima desde el punto de vista de estabilidad y confort, debido a que reduce las oscilaciones generadas por las desigualdades del terreno y permite el movimiento vertical de las ruedas, independientemente del movimiento que realice la rueda opuesta del mismo eje [58].

Está formada por el elemento elástico —muelle o barra de torsión— junto a la actuación de un amortiguador hidráulico telescópico colocado en el hueco inferior del muelle. Debe permitir incorporar una barra estabilizadora al sistema para compensar el balanceo del vehículo, situar el centro de balanceo a la altura deseada y soportar todas las fuerzas que actúan sobre ella durante la aceleración, la frenada o el paso por curva, permitiendo aislar el chasis de vibraciones no deseadas.

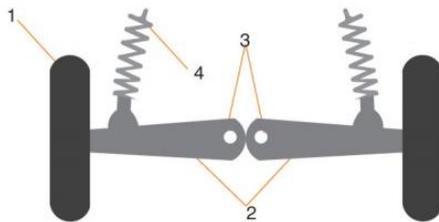
La suspensión independiente de *eje trasero* del vehículo es utilizada en vehículos de competición con tracción en las ruedas traseras o a las cuatro ruedas para mejorar el manejo en la conducción, la estabilidad y la tracción si el vehículo dispone de ello. Además, este tipo de suspensión permite un mayor espacio útil sin que la parte trasera del chasis interfiera con el sistema de suspensión [8].

Como principal *ventaja* destaca que disminuye la masa no suspendida del vehículo [2] con respecto a las suspensiones rígidas o semirrígidas, por lo que las oscilaciones que se transmiten al chasis disminuyen. Como *inconvenientes* destacan el elevado coste y la complejidad del sistema de suspensión añadido a posibles problemas si se le aplican cargas elevadas —por eso sólo se emplea en el eje delantero— [5].

Existen numerosos modelos de suspensión independiente y cada una puede tener variantes indefinidas dependiendo del diseño que se adopte. Los principales tipos de suspensión independiente son:

### -Suspensión de eje oscilante.

La suspensión de eje oscilante fue la primera suspensión independiente que se desarrolló y se caracteriza por tener un diseño sencillo formado por dos brazos oscilantes —o semiejes— conectados por uno de sus extremos a cada rueda y por el otro al plano medio longitudinal del vehículo como se observa en la figura 2.31. Debido a su elevada transferencia de cargas en las curvas, esta configuración se abandonó dando paso a otras más desarrolladas.



1. Rueda.
2. Semiejes.
3. Articulación en el plano medio longitudinal del vehículo.
4. Conjunto muelle-amortiguador.

Figura 2.31. Esquema de suspensión de eje oscilante.<sup>12</sup>

### -Suspensión de brazos tirados o arrastrados.

La suspensión de brazos tirados o arrastrados se denomina de esta forma por tener dos elementos de soporte o “brazos” en posición longitudinal —situados en cada rueda por delante del eje— [58].

Como ambos soportes están dispuestos longitudinalmente, controlan el movimiento de cabeceo del vehículo y absorben las fuerzas de aceleración y frenado, pivotando las ruedas en los anclajes que unen los brazos con el chasis.



Figura 2.32. Suspensión de brazos tirados en el eje trasero.

Si los brazos de cada extremo están unidos, se denomina suspensión de eje torsional o en H. El elemento de unión articulado puede ser más complejo que un brazo de suspensión, bien un triángulo con dos puntos de unión al chasis o varios brazos independientes en cada rueda.

<sup>12</sup> [http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Titulaci%C3%B3n\\_1](http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Titulaci%C3%B3n_1)



Figura 2.33. Composición del sistema de suspensión de brazos tirados.

### -Suspensión de MacPherson.

La suspensión MacPherson es la más utilizada por su sencillez de fabricación y mantenimiento, escaso coste de producción y el poco espacio que ocupa. Normalmente se sitúa en el eje delantero de los vehículos convencionales por la gran estabilidad que proporciona al chasis. En el eje trasero prácticamente no se usa por el gran espacio que le quita a la parte trasera del vehículo.

Está compuesto por un brazo inferior —tiene el movimiento restringido en su dirección longitudinal por la barra estabilizadora—, un muelle helicoidal que va montado sobre las copelas exteriores de un amortiguador —cuya parte superior va anclada al chasis y la parte inferior a la mangueta— con un cierto ángulo de sus ejes respecto del eje vertical de la rueda. Esto se hace para evitar que la rueda oscile hacia dentro del vehículo cuando se desplaza en línea recta.



Figura 2.34. Suspensión MacPherson.

Absorbe los movimientos oscilatorios del muelle, cuyas oscilaciones se reducen gracias al amortiguador. Es importante que el punto de la carrocería donde vaya anclado el amortiguador sea resistente, con la finalidad de absorber adecuadamente los esfuerzos que transmite el sistema de suspensión [2].

A diferencia de otros sistemas de suspensión —como la suspensión de paralelogramo deformable que se verá a continuación— el conjunto muelle-amortiguador, gira solidario a la rueda cada vez que se produce un giro del volante, al estar unido a la parte superior de la

mangueta. Esto provoca que la rueda al moverse verticalmente no sea exactamente perpendicular al suelo.



Figura 2.35. Suspensión MacPherson aplicada al eje delantero.

### -Suspensión de paralelogramo deformable.

La suspensión de paralelogramo deformable es uno de los sistemas más utilizados —tanto en los ejes delanteros como traseros— en los vehículos de competición y de gama alta. Esto es debido a que variando la configuración de sus parámetros se puede lograr la geometría deseada para mejorar la estabilidad y dirección del vehículo.

Está compuesta por dos brazos triangulares articulados —superior e inferior— que guían cada rueda y se anclan por sus bases al chasis y por su extremo a la mangueta de la rueda mediante rótulas esféricas —permiten la orientación de la rueda— formando la figura de un paralelogramo.

El brazo inferior, tiene mayor longitud que el brazo superior y es el que soporta las desigualdades del terreno comprimiendo al conjunto amortiguador-muelle —unido por su parte inferior al trapecio inferior y por su parte superior al chasis— cada vez que se produzca una oscilación.

Los trapecios no son paralelos entre sí, sino que tienen una cierta inclinación para conseguir disminuir el cabeceo que se origina al frenar o acelerar.



Figura 2.36. Suspensión de paralelogramo deformable.

### -Suspensión multibrazo o multilink.

La suspensión multibrazo o multilink corresponde a la configuración avanzada de la suspensión de paralelogramo deformable. Para que pueda considerarse multibrazo, al menos debe estar compuesta por tres brazos.

Está formada por un brazo superior unido a la mangueta curvada, un brazo inferior transversal unido a la mangueta por una rótula doble y al chasis por un casquillo que aísla de las vibraciones [58].

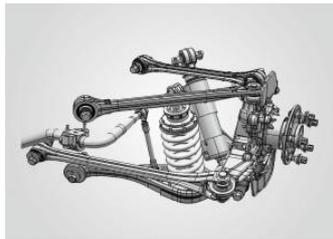


Figura 2.37. Partes que componen la suspensión multibrazo o multilink.

Se diferencia de su predecesora en que tiene un tercer brazo que está unido al chasis y a la mangueta de igual forma que el brazo inferior, los cuales están articulados por rótulas para eliminar cargas flectoras. Gracias a esta novedad y a la prolongación de la mangueta, se consigue modificar el ángulo de caída o la convergencia para conseguir menos inclinación del chasis en curvas, mayor adherencia y mayor estabilidad en el vehículo.



Figura 2.38. Suspensión multibrazo o multilink.

Las *ventajas* que destacan en la suspensión multibrazo son: la disminución de peso del conjunto además de poderse montar también en el eje trasero.

Se pueden clasificar en función de su elemento de guía, ya sea transversal o longitudinal, como se observa en la figuras 2.39 y 2.40 respectivamente [58].



Figura 2.39. Suspensión multibrazo con elementos guía transversales u oblicuos.



Figura 2.40. Suspensión multibrazo con brazos de guía longitudinal.

#### 2.1.4.2. Según el sistema de control.

##### 2.1.4.2.1. Suspensión pasiva.

La suspensión pasiva es el tipo de suspensión más habitual que suele utilizarse en los vehículos convencionales como medio para controlar la dinámica de su movimiento vertical, el balanceo y el cabeceo al paso de desigualdades en el terreno. Esto se logra mediante el conjunto muelle-amortiguador, el cual absorbe esas desigualdades, por lo que supone el sistema idóneo para aumentar el confort y la seguridad de los ocupantes del vehículo [5].

Se denomina “**pasiva**” debido a que el conjunto muelle-amortiguador no puede suministrar energía al sistema de suspensión. Solo controla el movimiento del chasis y las ruedas. Como característica principal destaca que una vez instalado este tipo de suspensión, no se puede modificar la altura o la resistencia del sistema de suspensión.



Figura 2.41. Suspensión pasiva.

## 2.1.4.2.2. Suspensión activa.

La suspensión activa tiene como objetivo lograr el confort y la seguridad de los ocupantes del vehículo y mantener la máxima adherencia de las ruedas con el terreno para evitar que el chasis balancee en curvas o cabecee en la frenada [5].

Se denomina “**activa**” debido a que sus componentes son capaces de suministrar y almacenar energía al sistema de suspensión.

En la actualidad, las suspensiones actúan de manera rápida sobre el movimiento de cada rueda permitiendo regular el control en un nivel más óptimo, ya que trabajan de forma progresiva adaptándose al nivel de carga que disponga el vehículo. Este control —del que las suspensiones pasivas no disponen— se realiza mediante actuadores y sensores con un canal externo que les proporciona energía. La función de los actuadores y sensores es evitar el movimiento indeseado del vehículo en curvas y corregirlo —si fuese necesario— para mantener el chasis lo más horizontal posible respecto al plano del suelo.

Existen dos tipos de suspensión activa: la suspensión activa rígida —o de alto ancho de banda— y la suspensión activa suave —o de bajo ancho de banda—:

- La suspensión activa rígida de alto ancho de banda se caracteriza por tener el actuador colocado en paralelo con el muelle y el amortiguador y unido a la masa no suspendida [57]. Así se controla tanto el movimiento vertical de la rueda como el movimiento del chasis.

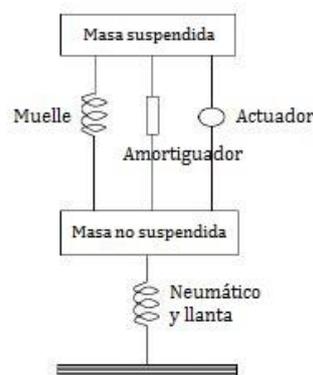
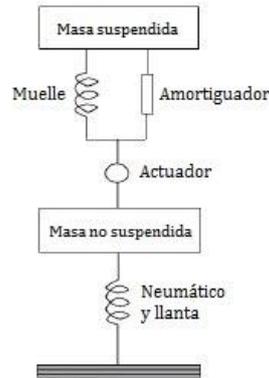


Figura 2.42. Suspensión activa rígida.

- La suspensión activa suave de bajo ancho de banda se caracteriza por tener el actuador conectado en serie con el muelle y el amortiguador [57]. Esto hace que solamente se controle el movimiento de la rueda, y no el movimiento del chasis como la suspensión activa rígida.



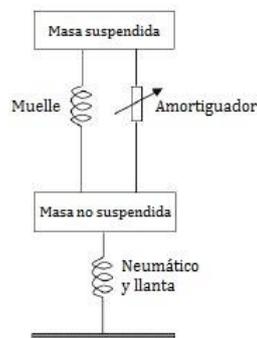
**Figura 2.43. Suspensión activa suave.**

La suspensión activa presenta la *ventaja* de tener la posibilidad de controlar cada rueda de manera independiente y con ello aumentar la adherencia de las ruedas con el suelo. Como *inconveniente* destaca su elevado coste [5], principalmente en la suspensión activa rígida, por estar conectada tanto al chasis como a las ruedas, además de ser de alta frecuencia, lo que requiere una tecnología más avanzada.

#### 2.1.4.2.3. Suspensión semi-activa.

La suspensión semi-activa se desarrolló a partir del elevado coste que sufría la suspensión activa. Está compuesta de elementos activos —como el amortiguador— para realizar el control de las frecuencias bajas y de elementos pasivos para realizar el control de las frecuencias altas. De esta forma se mejora notablemente el comportamiento del vehículo ante las desigualdades del terreno [5].

Este tipo de suspensión presenta como principal ventaja la posible regulación de la suspensión dependiendo las condiciones del terreno para poder obtener un mayor rendimiento y manejo del vehículo en su conducción.



**Figura 2.44. Suspensión semi-activa.**

2.1.4.3. En competición.

Los vehículos de competición normalmente realizan el diseño de la suspensión en base a la **barra de empuje**, la cual se encarga de transmitir el movimiento de las ruedas al amortiguador uniendo ambas diagonalmente.

Esta colocación da nombre a dos tipos de suspensión como son la suspensión de tipo Push-rod y la de tipo Pull-rod.

## 2.1.4.3.1. Push-rod.

La suspensión Push-rod está compuesta por dos brazos de suspensión y la barra de empuje —la cual tiene un extremo anclada al brazo inferior y el otro anclado al balancín situado en la parte superior del chasis—. El balancín transmite el movimiento de compresión de la barra al amortiguador, reduciendo las oscilaciones creadas por el movimiento y el paso de ruedas.

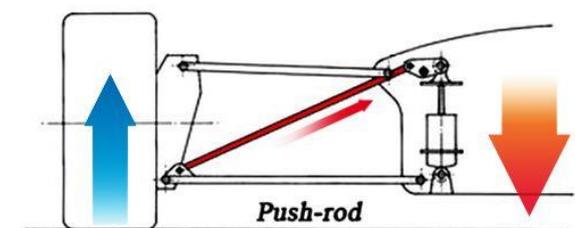


Figura 2.45. Suspensión Push-rod.<sup>13</sup>

## 2.1.4.3.2. Pull-rod.

La suspensión Pull-rod, por el contrario, trabaja a tracción al estar la barra de empuje situada de forma inversa a la suspensión Push-rod. Está compuesta por la barra de empuje, dos brazos de suspensión, un balancín y un amortiguador.

El funcionamiento consiste en situar uno de los extremos en el brazo superior y el otro extremo en el balancín, situado en la parte inferior del chasis recibiendo los esfuerzos de la rueda en forma de tracción para transmitírselos al amortiguador.

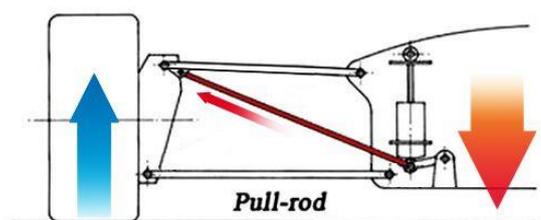


Figura 2.46. Suspensión Pull-rod.<sup>14</sup>

<sup>13</sup> <http://diariomotor.com/blogs/f1/2012/08/12/precaucion-amigo-conductor/>

<sup>14</sup> <http://diariomotor.com/blogs/f1/2012/08/12/precaucion-amigo-conductor/>

## 2. Base teórica

---

Para la colocación de alguna de las dos configuraciones en el sistema de suspensión de un monoplaza de competición, se realiza una comparación de ambas para adaptar la idónea al diseño de un monoplaza teniendo en cuenta las limitaciones que existan.

Partiendo de que en competición es muy importante tener en cuenta la resistencia aerodinámica del vehículo para ganar velocidad y reducir peso, la suspensión de tipo Pull-rod sería la adecuada puesto que la barra trabaja a tracción teniendo menor grosor y por lo tanto menos peso.

Además, como el balancín y el amortiguador se deben situar a una altura del suelo menor habrá un centro de gravedad más bajo, situación muy interesante para ganar aerodinámica. Con estas características, la elección sería la suspensión de tipo Pull-rod.

Pero también tiene inconvenientes. Los equipos de la competición Formula Student deben ajustar lo posible el presupuesto y el tiempo, por lo que la suspensión Pull-rod no se adapta a esto, ya que requiere un riguroso estudio puesto que a tracción sufre más esfuerzos, siendo más favorable y sencillo adaptar al monoplaza la suspensión Push-rod [81].

### 2.1.5. Suspensión independiente.

Debido a que el diseño del sistema de suspensión que se desarrolla en este trabajo es de tipo independiente, es en este apartado donde se va a explicar con detalle los parámetros que afectan a este tipo de suspensión, estudiando las distintas geometrías que aparecen en un vehículo, tanto del sistema de suspensión como de la dirección —ya que al estar unidos afectan de forma paralela— valorando los parámetros que realmente afectan al diseño del monoplaza.

#### 2.1.5.1. Geometría de la suspensión y parámetros cinemáticos dependientes de la dirección.

Para realizar el cálculo de la geometría del monoplaza, hay que tener en cuenta los siguientes parámetros ya que el sistema de suspensión y el sistema de dirección están estrechamente relacionados.

##### 2.1.5.1.1. Vía.

La vía es la distancia que se mide entre los puntos de contacto de las ruedas, de un mismo eje, con el terreno.

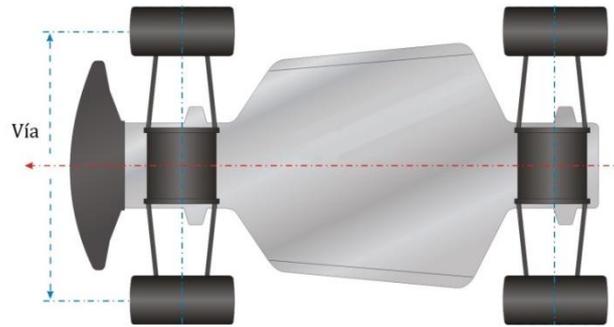


Figura 2.47. Vía del vehículo.

Cuanto más ancha sea la vía mayor será la estabilidad del vehículo —puesto que baja el centro de gravedad— y su paso por curvas se hará más seguro, lo que implica que la transferencia de masas en las curvas sea pequeña [8].

Por el contrario, al ensanchar la vía aumentan los esfuerzos que debe soportar el chasis, el sistema de suspensión y dirección además de disminuir la aerodinámica del vehículo, hecho que no interesa porque se pierde velocidad y aceleración en competición. No se debe diseñar de cualquier manera, sino que requiere una serie de cálculos y estudio previo para asegurarse que cumple la normativa correspondiente.

#### 2.1.5.1.2. Batalla.

La batalla es la distancia —en sentido longitudinal— que existe entre los puntos de apoyo de las ruedas del eje delantero y las ruedas del eje trasero como se observa en la figura 2.48.

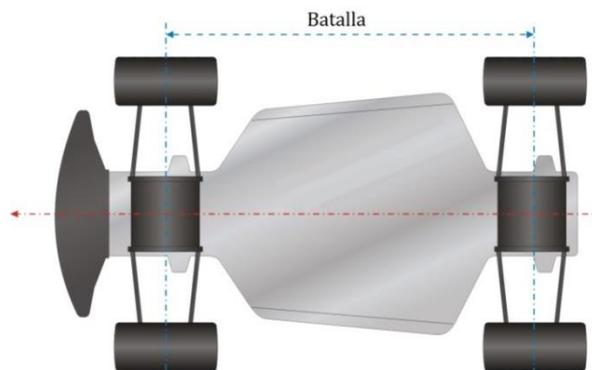


Figura 2.48. Batalla del vehículo.

En competición se debe diseñar la batalla del vehículo lo más corta posible debido a los frecuentes cambios de dirección que sufre [8], siempre teniendo en cuenta la distancia mínima exigida por la normativa.

## 2. Base teórica

### 2.1.5.1.3. Ángulo de caída.

El ángulo de caída o “camber” es el ángulo que se forma por la prolongación del plano medio de la rueda con la del plano perpendicular al suelo.

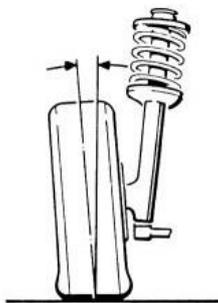


Figura 2.49. Ángulo de caída.<sup>15</sup>

Este ángulo varía debido a las oscilaciones del sistema de suspensión y se consigue dando la inclinación adecuada a la mangueta<sup>16</sup> con respecto al plano horizontal para lograr la máxima adherencia posible de los neumáticos al paso por curvas.

Cuando un vehículo realiza una curva, las ruedas que soportan el mayor peso del vehículo son las exteriores, por lo que interesa que al comprimirse el amortiguador, el ángulo de caída sea negativo para que la fuerza lateral aumente [8]. Esta fuerza además de ser función del ángulo, depende también de las propiedades específicas de cada neumático —el tipo, la presión de inflado, la temperatura, etc—.

El ángulo es *positivo* cuando la rueda tiene a inclinarse hacia el exterior del vehículo —hecho que provoca que el vehículo pierda adherencia con el terreno— y *negativo* cuando se inclina hacia el interior —aumenta la adherencia de las ruedas al realizar giros en curvas—. [6]

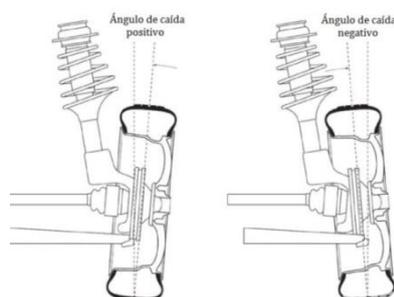


Figura 2.50. Ángulo de caída positivo y negativo.

<sup>15</sup> <http://toplowridersites.com/kingpin-inclination-angle/>

<sup>16</sup> Para el sistema de suspensión de este trabajo, al utilizar un diseño de suspensión independiente de elementos ya fabricados, no es necesario dar a la mangueta cierta inclinación, debido a que su eje es perpendicular al plano horizontal del suelo.

## 2.1.5.1.4. Ángulo de salida.

El ángulo de salida o “kingpin axis”, es el que se forma a causa de la intersección de las prolongaciones del eje de la mangueta y el eje vertical perpendicular a la superficie de rodadura en el apoyo del neumático con el terreno.

En el momento de realizar tanto el diseño de la suspensión como de la dirección hay que darle cierta importancia, ya que está condicionado por el comportamiento dinámico del vehículo al frenar o acelerar.<sup>17</sup>

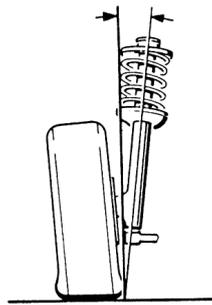


Figura 2.51. Ángulo de salida.<sup>18</sup>

Esta disposición de la mangueta reduce el esfuerzo para orientar la rueda. El esfuerzo es *nulo* cuando el eje de la mangueta pasa por el centro de la superficie de contacto. Se considera *positivo* cuando la parte superior de la mangueta se inclina hacia el interior del vehículo, es decir  $R_0 > 0$  y *negativo* cuando se inclina hacia el exterior, siendo  $R_0 < 0$ , como se puede observar en la figura 2.52, siendo  $R_0$  el radio de salida.

El ángulo de salida favorece la estabilidad de la dirección y mantiene las ruedas en posición de línea recta. En caso de giro ayuda a retornar la dirección a su posición de equilibrio, ya que la parte delantera tiende a elevarse con un ángulo negativo [6].

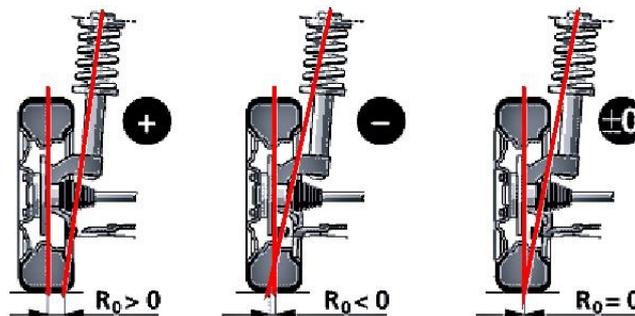


Figura 2.52. Ángulo de salida positivo, negativo y nulo.

<sup>17</sup> Del mismo modo que para el ángulo de caída, no se ha tenido en cuenta el ángulo de salida debido a que se han diseñado las piezas de elementos ya fabricados pertenecientes a una suspensión independiente —tipo de suspensión que se adapta a las desigualdades del terreno a diferencia de la suspensión de tipo MacPherson, que se observa en las figuras 2.49, 2.50, 2.51, 2.52, 2.53—.

<sup>18</sup> <http://toplowridersites.com/kingpin-inclination-angle/>

## 2. Base teórica

### 2.1.5.1.5. Ángulo de avance.

El ángulo de avance o “caster”, es el ángulo formado por la prolongación del eje de la mangueta de dirección con el eje perpendicular a la superficie de contacto de la rueda viéndose esta de perfil.

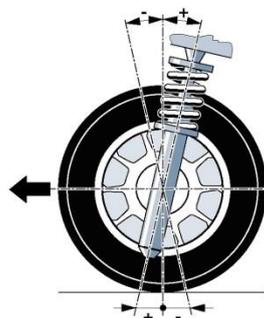


Figura 2.53. Ángulo de avance.

Si el vehículo es de tracción trasera, el eje delantero es arrastrado lo que supone una cierta inestabilidad para el chasis. Esta se corrige proporcionando al eje de la mangueta el ángulo de avance de forma que su prolongación corte por delante del eje vertical de la rueda —avance positivo—. [62]

Se debe tener en cuenta que si el ángulo de avance es muy grande la dirección sería dura y por el contrario, si es muy pequeño, la dirección sería suave y por lo tanto inestable, por lo que hay que buscar un punto medio para la correcta configuración.

En conclusión, el *avance positivo* tiene ventajas en cuanto a estabilidad en línea recta pero inconvenientes en las curvas actuando a favor de la fuerza centrífuga y, el *avance negativo* tiene ventajas evidentes en las curvas oponiéndose a la fuerza centrífuga en el desequilibrio de la carrocería [2].

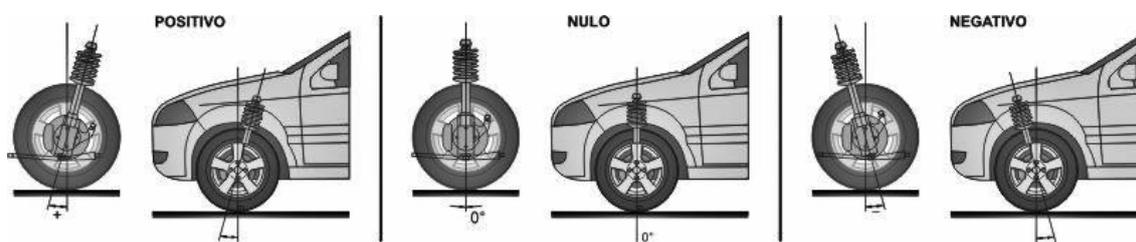


Figura 2.54. Ángulo de avance positivo, negativo y nulo.<sup>19</sup>

### 2.1.5.1.6. Convergencia y divergencia.

Los fenómenos de convergencia y divergencia surgen del ángulo formado por los ejes longitudinales de las ruedas —tanto traseras como delanteras— con el eje longitudinal del vehículo. El ángulo puede ser positivo y negativo. Es positivo cuando las ruedas tienden hacia

<sup>19</sup> <http://www.truckcenter.com.br/AlinhamentodeDirecao>

el interior —convergencia o “toe-in”— y negativa para el caso contrario, si tienden a dirigirse hacia el exterior —divergencia o “toe-out”—.

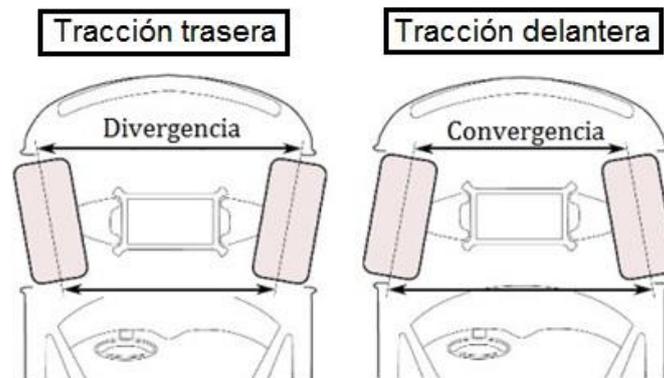


Figura 2.55. Convergencia y divergencia en el vehículo.

Los vehículos con tracción trasera, empujan al eje delantero haciendo que las ruedas de este se abran con la marcha del vehículo, por ello hay que diseñar el tren delantero con cierta convergencia para compensar este efecto. De manera opuesta, los vehículos con tracción delantera, tienden a cerrar las ruedas delanteras —fenómeno de convergencia— por lo que se hace necesario realizar un ajuste de divergencia para compensar esto y que la dirección del vehículo sea la óptima [2].

La *ventaja* de la divergencia es que cuanto mayor sea en el eje delantero, mayor será la entrada del vehículo en curvas [8].

Los *inconvenientes* que tiene la convergencia es que su magnitud, bien sea excesiva o escasa, afecta al desgaste de los neumáticos del mismo eje, lo que hace una dirección imprecisa. Si es excesiva, el neumático se desgastará por su parte exterior y si es escasa, se desgastará por su parte interior. Además de esto, también condiciona la posición del centro instantáneo de rotación del vehículo y por tanto su comportamiento dinámico.

#### 2.1.5.2. Centro de gravedad.

El centro de gravedad es el punto donde se considera que toda la masa del vehículo está concentrada [6].

En los vehículos de competición, donde destaca la velocidad, el manejo y que todos los componentes del vehículo sean eficientes en la conducción, además de la importancia de la distribución de pesos, bien sea del piloto o las baterías que ocupan la mayor parte del peso —ya que el monoplaza que se va a diseñar es de tipo eléctrico—, surge la necesidad de situar el

## 2. Base teórica

---

centro de gravedad centrado<sup>20</sup> y a una altura del suelo lo más bajo posible para que la velocidad al paso por curva sea lo más rápida posible.

En nuestro caso, el piloto se situará lo más adelantado posible, teniendo en cuenta las restricciones de diseño, para compensar con el peso de las baterías, las cuales irán situadas en la parte trasera del monoplaça. Esto hace que se retrase el centro de gravedad respecto a la posición del piloto.

Con respecto a la altura del centro de gravedad, ésta puede variar ya que la suspensión a utilizar es regulable por lo que se puede ajustar cuando se requiera un centro de gravedad más bajo.

### 2.1.5.3. Centro instantáneo.

El centro instantáneo —como se muestra en las figuras 2.56 y 2.57— es el punto donde se intersectan las prolongaciones de las rectas que forman los trapecios de suspensión y sobre el que la rueda pivota. Se denomina “instantáneo” debido a que constantemente se modifica su situación con el movimiento del sistema de suspensión. Su posición dependerá del ángulo de caída de las ruedas al moverse en sentido vertical [6].

### 2.1.5.4. Centro de balanceo.

El centro de balanceo —también mostrado en las figuras 2.56 y 2.57— es el punto imaginario situado en el plano medio vertical del vehículo en el que se pueden aplicar esfuerzos laterales desarrollados por las ruedas —al resistir la acción de la fuerza centrífuga— que se transmiten a las masas suspendidas. Afecta tanto a las masas suspendidas como a las no suspendidas, repercutiendo directamente en el giro del vehículo [8].

Para conocer su localización, se prolongan los trapecios de la suspensión independiente hasta el punto en que se corten. El punto creado es el “centro instantáneo”. A partir de aquí, desde el punto medio de la banda de rodadura de la rueda —que está en contacto con el terreno—, se traza una recta hasta el centro instantáneo, y el punto donde corte con el plano medio vertical del vehículo es el centro de balanceo.

Una vez obtenido el centro de balanceo, analizando su situación respecto al centro de gravedad del vehículo, se observa cuánto afecta a la geometría del sistema de suspensión:

-Si se encuentra próximo al centro de gravedad, el balanceo que sufrirá el vehículo será menos pero la geometría de la suspensión variará en exceso [6], como en la figura 2.56.

-Si se encuentra alejado del centro de gravedad, el vehículo balanceará en mayor medida pero se compensa la variación de la geometría [6], como en la figura 2.57.

---

<sup>20</sup> Estar a una distancia media del vehículo visto en alzado, lateral y planta.

La opción más válida sería situando el centro de balanceo lo más bajo posible, alejado del centro de gravedad para que la geometría de la suspensión no varíe en exceso, ya que existe la posibilidad de añadir la barra estabilizadora y así se logra compensar el balanceo del vehículo. También se controla mejor la transferencia de masas únicamente variando el conjunto muelle-amortiguador [6].

Lo explicado hasta aquí se puede comprender mejor en las siguientes figuras para visualizar dónde se encuentran los centros de balanceo, instantáneo y de gravedad en la configuración escogida para los trapecios de la suspensión independiente en *estado de reposo* y *en funcionamiento* cuando las ruedas se encuentran un obstáculo:

-En estado de reposo, los trapecios se encuentran en el lugar de diseño y las prolongaciones se encuentran fuera del entorno del vehículo a una altura mayor del suelo, por lo que el centro de balanceo se aproximará más al centro de gravedad.

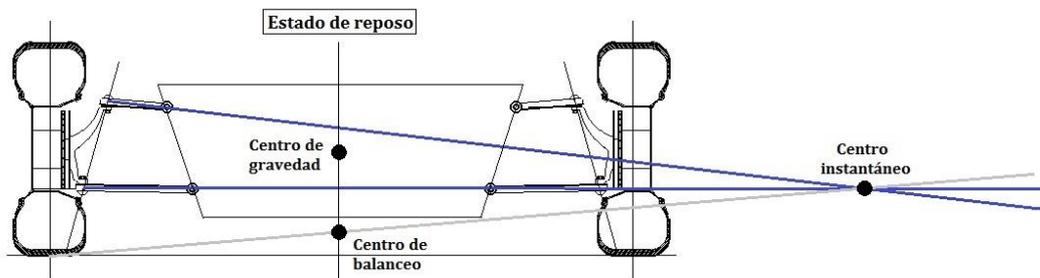


Figura 2.56. Suspensión en estado de reposo para el cálculo de la geometría.

-En movimiento, la rueda que sufra el impacto de un obstáculo se moverá hacia arriba exigiendo a los trapecios hacer el mismo recorrido que ella al estar sujetas a la mangueta. De esta manera, varían la geometría que tenían inicialmente, lo que hace que disminuyan la altura del centro instantáneo y de balanceo, quedando de la siguiente manera.

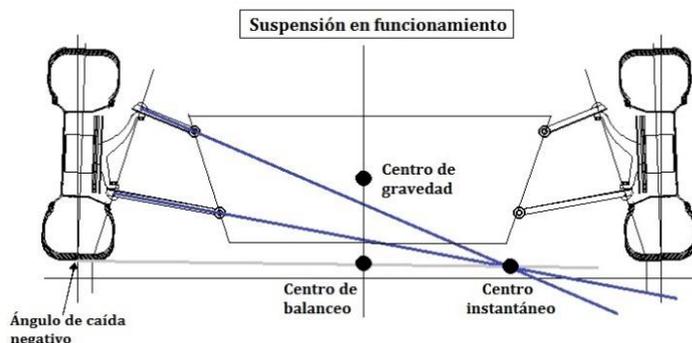


Figura 2.57. Suspensión en funcionamiento para el cálculo de la geometría.

2.1.5.5. Geometría anti-levantamiento y anti-hundimiento.

Las geometrías anti-levantamiento y anti-hundimiento tienen lugar en los movimientos de cabeceo del vehículo, es decir, si el vehículo acelera bruscamente tiende a levantarse — pudiendo llevar hasta un 50 % de la masa suspendida al eje trasero— y si por el contrario frena de golpe tenderá a hundirse —haciendo lo mismo en el eje delantero— aumentando el ángulo de avance y la aerodinámica [6].

Centrándose únicamente en la geometría anti-hundimiento que afecta al eje delantero de la suspensión, para evitar un movimiento de cabeceo excesivo se debe proporcionar a los trapecios de suspensión la inclinación adecuada al acoplarlos a los anclajes del chasis, siendo necesario hacer converger sus prolongaciones por detrás del centro de la rueda. Con esto se proporciona al vehículo la geometría anti-hundimiento en la frenada, observándose en la figura 2.58 como los trapecios A y B se encuentran en O —punto conocido como “Centro de transferencia”—. Es un punto imaginario en el que gira el eje de la rueda visto de lateral como se observa en la figura 2.59 [72].

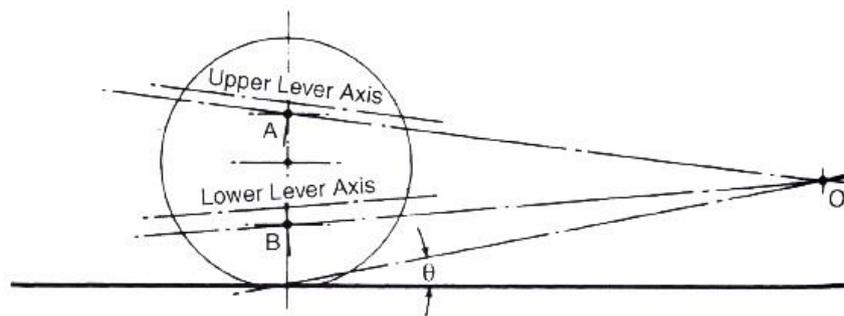


Figura 2.58. Suspensión de doble brazo cuyos ejes no son paralelos.<sup>21</sup>

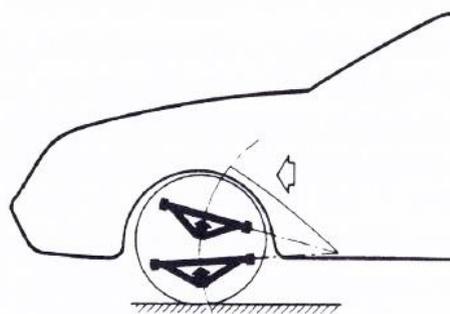


Figura 2.59. Centro de transferencia en la geometría anti-hundimiento.<sup>22</sup>

<sup>21</sup> Bastow, D., Howard, G., Whitehead, J.P. (2004), *Car Suspension and Handling*, Society of Automotive Engineers, Inc., 4th ed., p. 158.

<sup>22</sup> Bastow, D., Howard, G., Whitehead, J.P. (2004), *Car Suspension and Handling*, Society of Automotive Engineers, Inc., 4th ed., p. 15.

El porcentaje anti-hundimiento oscila entre 0-100 e indica la resistencia que ofrece la suspensión por su geometría al movimiento vertical del eje en el que se encuentre. Si es el 100% de anti-hundimiento, la suspensión tiene la máxima resistencia al cabeceo. Si es el 0% la resistencia es nula.

Para calcular ese porcentaje se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$\% \text{ anti-hundimiento} = (\% \text{ frenada}) * \operatorname{tg}(\theta) * \left(\frac{\text{Batalla}}{H}\right) \text{ [8]}$$

Siendo:

H: La distancia del centro de gravedad al suelo.

tg ( $\theta$ ): Ángulo de la recta que une el punto de contacto de la rueda con el suelo y el punto O.

% frenada: Reparto de frenada entre el 60-40%.

En **competición**, el porcentaje de anti-hundimiento no suele superar el 30% debido a la combinación de las ventajas e inconvenientes que tiene este tipo de geometría [6].

Teniendo en cuenta la ventaja de que al disminuir el hundimiento no se modifica ni la geometría del chasis, ni la altura al suelo, ni la aerodinámica ante frenadas excesivas. Por el contrario, disminuye la sensibilidad de la suspensión, por lo que se hace necesaria la utilización de muelles blandos para lograr la misma dureza en la rueda. Esto puede provocar un balanceo lateral del vehículo excesivo.

#### 2.1.5.6. Geometría de Ackermann.

Es la geometría mediante la cual la rueda exterior convierte un radio de giro mayor que la rueda interior tal y como se aprecia en la figura 2.60. Se calcula respecto a la medida de la batalla, ya que desde el centro de curvatura hasta el punto donde se intersecta el eje trasero con el eje longitudinal del vehículo, se considera el *radio de curvatura*, que es equivalente a dos veces la batalla del mismo.

Si se diese el caso de que ambas ruedas girasen con el mismo radio, cada una tendría un centro de rotación distinto, lo que hace que una de las ruedas arrastre a la otra, provocándole a ésta un desplazamiento lateral. Esto conlleva un rápido desgaste de los neumáticos, algo no aconsejable para la estabilidad del vehículo.

Para hallar el centro del radio de la curva, también conocido como “Centro de Ackermann”, es necesario prolongar el eje trasero del vehículo hasta que se intersecte con las prolongaciones de los radios de curvatura de cada rueda.

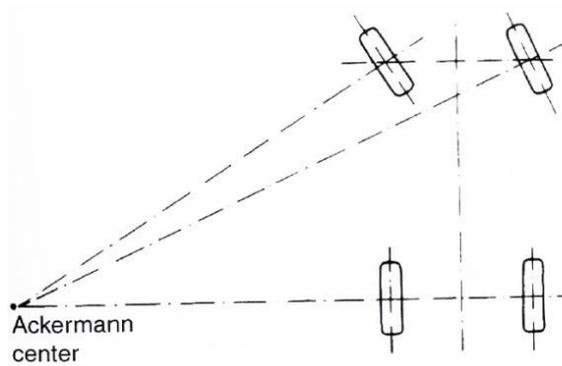


Figura 2.60. Geometría de Ackermann.<sup>23</sup>

Puede ser: *completa* cuando la intersección de las prolongaciones de los ejes de las ruedas se produce en el eje trasero, como se observa en la figura anterior, *neutra* si los ejes de las ruedas son paralelos y *negativa* cuando la intersección de las prolongaciones se produce en el eje delantero.

En *competición* es aconsejable que se reduzca a *neutra* o incluso hacerla *negativa* para conseguir mayor agarre de las ruedas en los giros y así compensar la transferencia de masa suspendida que se desplaza hacia el exterior de la curva.

Para conocer los ángulos de giro de la rueda interior y exterior que aparecen en la siguiente figura, se debe atender al análisis de Jeantaud, el cual evita el deslizamiento de las ruedas en las curvas y hace que recorran trayectorias paralelas concéntricas. Hay que tener en cuenta la batalla y el ancho de vía del vehículo para realizar el cálculo de los ángulos, y con ello conocer el ángulo máximo que puede girar cada rueda en base de la longitud y el ancho del vehículo.

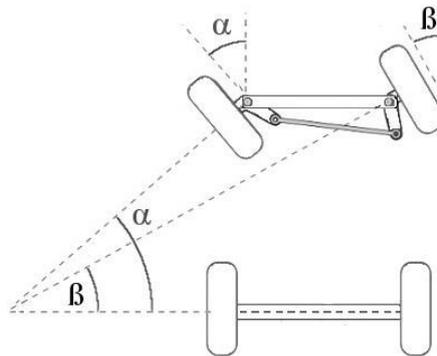


Figura 2.61. Análisis de Jeantaud.

En el diseño que se desarrolla en este trabajo, sabiendo que el monoplaza Formula Student tiene una batalla de 1773.21 mm y una vía de 1528.3 mm, se realiza el siguiente cálculo:

<sup>23</sup> Bastow, D., Howard, G., Whitehead, J.P. (2004), *Car Suspension and Handling*, Society of Automotive Engineers, Inc., 4th ed., p. 13.

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{(2 * \text{Batalla})}{(4 * \text{Batalla}) - \text{Ancho de vía}} \quad [69]$$

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{(2 * 1773.21 \text{ mm})}{(4 * 1773.21 \text{ mm}) - 1528.3 \text{ mm}} = 0.64$$

$$\alpha = 32.6^\circ \quad (\text{Giro a la izquierda de la rueda interior}).$$

$$\operatorname{tg}(\beta) = \frac{(2 * \text{Batalla})}{(4 * \text{Batalla}) + \text{Ancho de vía}} \quad [69]$$

$$\operatorname{tg}(\beta) = \frac{(2 * 1773.21 \text{ mm})}{(4 * 1773.21 \text{ mm}) + 1528.3 \text{ mm}} = 0.41$$

$$\beta = 22.4^\circ \quad (\text{Giro a la izquierda de la rueda exterior}).$$

A continuación, se realiza una simulación de los ángulos obtenidos en el giro de ambas ruedas del monoplaza Formula Student, mostrándose en la figura 2.62 el resultado:

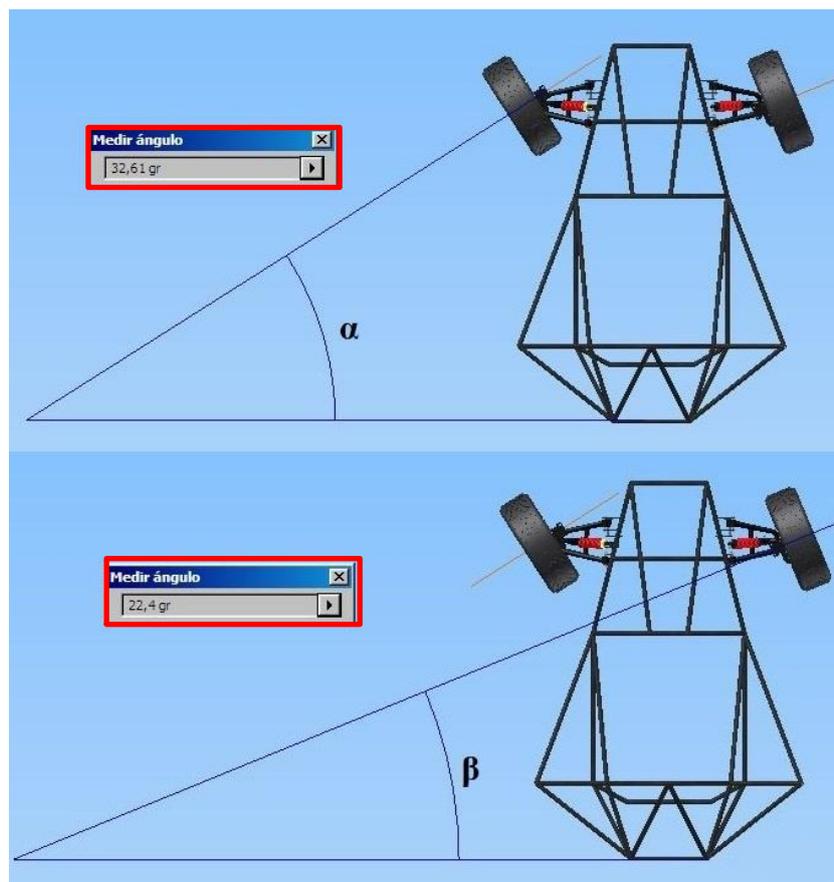


Figura 2.62. Ángulos máximos de giro en las ruedas izq. (arriba) y der. (abajo).

## 2.2. LA RUEDA EN EL AUTOMÓVIL.

La rueda es el elemento más característico de cualquier tipo de vehículo para desplazarse.

Las ruedas deben cumplir las siguientes funciones:

- Sustentación: soportar el peso del vehículo.
- Motricidad: transmitir el movimiento a través de sus ruedas motrices y con su reacción generar el desplazamiento del vehículo.
- Dirección: gracias a la orientación de las ruedas directrices se consigue el guiado del vehículo.
- Confort y estabilidad: son un complemento al sistema de suspensión.
- Frenado: transmiten los esfuerzos de frenado.

### 2.2.1. El neumático.

El neumático es la parte de la rueda que está en contacto con el suelo y que aloja en su interior, entre el mismo y la llanta, el volumen de aire destinado a mejorar las propias características de la rueda [2].

#### 2.2.1.1. Partes.

Las partes del neumático que se observan en la figura 2.63 son:

- La banda de rodadura: zona que se encuentra en contacto con el terreno construida de caucho y con dibujos o tacos para facilitar el agarre.
- Los hombros, zona de unión entre la banda de rodadura y los flancos.
- Los flancos situados en los laterales del neumático.
- El revestimiento de goma interior del neumático.
- El cordón de centrado o la zona de posicionamiento de la cubierta en la llanta.
- Los talones, los cuales tienen la función de anclar la cubierta a la llanta, crear un cierre hermético entre ambas y asegurar la transmisión de esfuerzos en frenadas y aceleraciones.



Figura 2.63. Partes que componen el neumático.

### 2.2.1.2. Tipos.

Actualmente existen dos tipos de neumáticos, los de carcasa diagonal y los de carcasa radial.

Los de *carcasa diagonal* se caracterizan por tener un mayor desgaste, menor adherencia y por transmitir las desigualdades del terreno al chasis.

Por el contrario, los de *carcasa radial* aseguran mayor duración, mayor estabilidad y un mayor confort para la conducción, por lo tanto al tener mejores prestaciones que los de carcasa diagonal son los más utilizados en los vehículos de competición [6].

### 2.2.1.3. Dimensiones.

Como se observa en la figura 2.64, las dimensiones del neumático son:

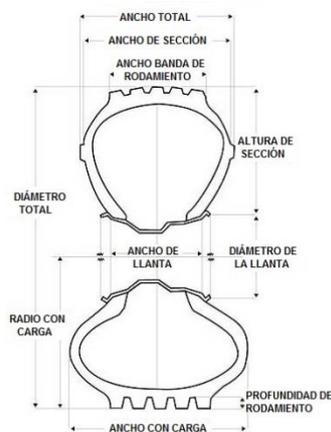
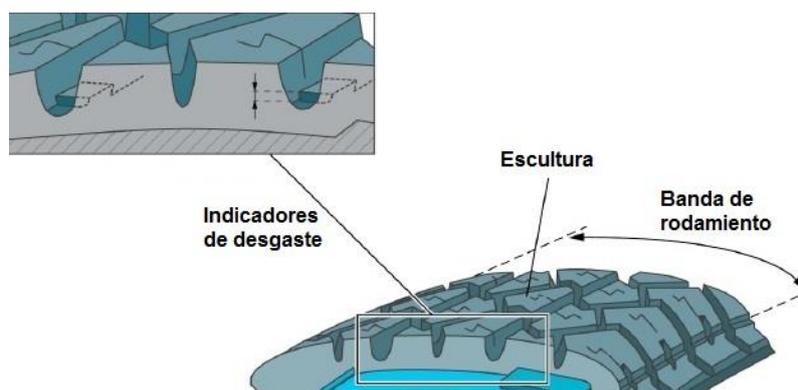


Figura 2.64. Dimensiones del neumático.

## 2. Base teórica

- *Ancho total*: distancia de pared a pared teniendo en cuenta las marcas del neumático.
- *Ancho de sección*: distancia de pared a pared de la cubierta.
- *Ancho banda de rodamiento*: distancia de la banda de rodamiento que está en contacto con el terreno.
- *Altura de sección*: distancia desde la banda de rodamiento hasta el diámetro de la llanta.
- *Diámetro de la llanta*: expresado en pulgadas o milímetros.
- *Ancho de la llanta*.
- *Profundidad de rodamiento*: indica la profundidad que tiene la banda de rodamiento. Para conocer el desgaste de la misma existen los indicadores de desgaste que indican que si se llega a ellos, el neumático debe ser sustituido:



**Figura 2.65. Indicadores de desgaste del neumático.**

- *Ancho con carga*: distancia de pared a pared medida cuando el neumático está soportando carga.
- *Radio con carga*: distancia medida desde el suelo hasta el centro de la llanta cuando el neumático está soportando carga.
- *Diámetro total*: que tiene la circunferencia del neumático.

## 2. Base teórica

### 2.2.1.4. Designación.

Todo neumático está dimensionado respecto a unas marcas identificativas situadas en el perfil del mismo.



1. Ancho del neumático en milímetros.
2. Perfil del neumático. Altura del flanco dada como % de la relación entre la altura y el ancho del neumático.
3. Tamaño de la llanta. Indica el diámetro de la llanta en pulgadas —1 pulgada = 25.4 mm—. “R” indica que el neumático es de tipo radial.
4. Código de velocidad: Indica la velocidad máxima para los neumáticos.
5. Nombre del fabricante.
6. Marca: Nombre comercial del modelo de neumático.
7. Carga máxima.
8. Máxima presión soportada.

Figura 2.66. Designación del neumático.<sup>24</sup>

En el diseño que se desarrolla en este trabajo, los neumáticos que se van a utilizar para el eje delantero son los de la marca “Duro” y tienen la siguiente designación:

#### ➤ AT 21x7-10

Como se puede observar, la designación es distinta a la explicada anteriormente y es otra opción de expresar las dimensiones del neumático, esta vez en pulgadas, correspondiéndose cada valor con la distancia marcada en la figura 2.67.



Figura 2.67. Neumático AT 21x7-10 Scorchers para el diseño.

Por otro lado, en el neumático también existe la opción comentada anteriormente y expresada en milímetros, **175/80-R10**. Conociendo esta designación es suficiente para realizar el diseño del neumático con las medidas adecuadas.

<sup>24</sup> <http://www.talleresmm.com/faq-conozca-sus-neumaticos.php>

Para el cálculo de la altura del perfil —sabiendo que la relación entre la altura o “perfil” y el ancho es el 80 %— se realiza lo siguiente:

$$\frac{\text{Altura del perfil}}{\text{Ancho del neumático}} * 100 = \mathbf{80 \text{ Relación (\%)}}$$

$$\text{Altura del perfil} = \frac{80 \% * \text{Ancho del neumático}}{100} = \frac{80 * 175 \text{ mm}}{100} = 140 \text{ mm}$$

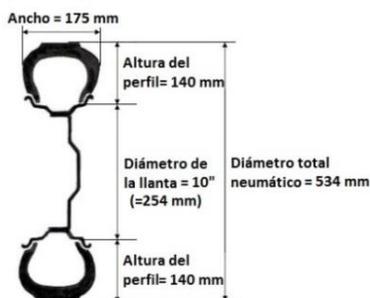


Figura 2.68. Dimensiones para el diseño del neumático.

#### 2.2.1.5. Tablas de carga y velocidad.

A continuación, se van a adjuntar dos tablas para conocer la equivalencia entre la nomenclatura que aparece en los neumáticos con la máxima carga y velocidad permitida para cada uno de ellos dependiendo del código que tengan inscrito en el perfil.

La primera tabla corresponde al índice de carga, situando la referencia de los más representativos:

Rangos de carga máxima			
Índice de carga	Peso máximo en kg.	Índice de carga	Peso máximo en kg.
20	80	70	335
24	85	75	387
26	90	80	450
30	106	85	515
35	121	90	600
40	136	95	690
44	160	100	800
46	170	105	925
50	190	110	1060
55	218	115	1215
60	250	120	1400
65	290		

Tabla 2.1. Rangos de carga máxima del neumático.<sup>25</sup>

<sup>25</sup> <http://www.neumaticos-pneus-online.es/indices-de-carga-y-velocidad-consejos.html>

La segunda tabla, corresponde al índice de velocidad, situando los códigos que existen en el mercado de la automoción:

Rangos de velocidad máxima			
Índice de velocidad	Velocidad en km/h	Índice de velocidad	Velocidad en km/h
A1	5	K	110
A2	10	L	120
A3	15	M	130
A4	20	N	140
A5	25	P	150
A6	30	Q	160
A7	35	R	170
A8	40	S	180
B	50	T	190
C	60	U	200
D	65	H	210
E	70	V	240
F	80	ZR	>240
G	90	W	270
J	100	Y	300

Tabla 2.2. Rangos de velocidad máxima del neumático.<sup>26</sup>

### 2.2.2. La llanta.

Las llantas son el eje principal entre las ruedas, el sistema de suspensión y el sistema de dirección. El material con el que se fabrica puede ser acero o aleación ligera y su función es la de resistir las masas suspendidas, además de las fuerzas de torsión y flexión que se producen cuando el vehículo inicia la marcha.

#### 2.2.2.1. Partes.

Las partes de la llanta que se observan en la figura 2.69 se describen a continuación:

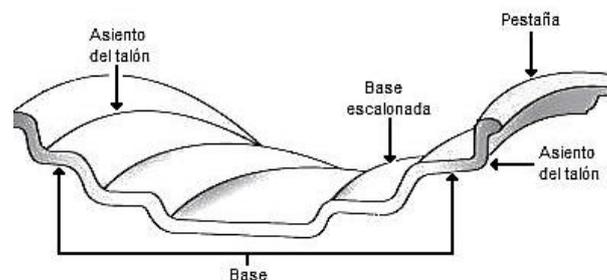


Figura 2.69. Partes de la llanta.

<sup>26</sup> <http://www.neumaticos-pneus-online.es/indices-de-carga-y-velocidad-consejos.html>

## 2. Base teórica

- La base corresponde a la zona comprendida entre los dos asientos del talón.
- Los asientos del talón son las zonas de la llanta sobre los que apoyan los talones del neumático.
- Las pestañas son las partes que contactan lateralmente con el talón del neumático.

### 2.2.2.2. Tipos.

Los tipos de llanta que se pueden encontrar son los siguientes: [2]

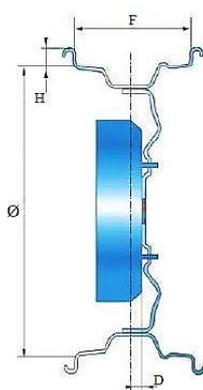
**Llanta hundida.** Se fabrican de esta forma para que el montaje del neumático sea sencillo. Los perfiles que puede presentar una llanta hundida son: llanta honda serie ancha, honda serie estándar, honda pilote y semi-honda.

**Llanta para vehículos pesados.** Se diseñan para soportar esfuerzos elevados lo que conlleva a un desgaste prematuro por lo que necesitan realizar temporalmente una inspección rigurosa para prevenir errores. Los perfiles que puede presentar una llanta de este tipo son: llanta plana, intermedia, avanzada, honda, semi-honda y con la base honda.

**Llanta para neumáticos montadas sin cámara.** Son conocidas como “tubeless” y su material es de aleación ligera (aluminio y magnesio). Los perfiles que puede presentar una llanta sin cámara son: “Hump” (H), “doble hump” (H2), “fiat hump” (FH), “TR”, “contrapendiente” (CP), “combinación” (CH) –combina hump y fiat hump- y “drop center”.

### 2.2.2.3. Dimensiones.

Las dimensiones que se observan en la figura 2.70 suelen expresarse en pulgadas y se definen como: [2]



Ancho interior, F. Es la distancia que existe entre las pestañas.

Altura de pestaña, H. Es la distancia entre la parte superior de la pestaña y la base de apoyo del talón. En el caso de denominarse con una letra se mide en milímetros, por ejemplo J —distancia más habitual en los vehículos, 17.3 mm—.

Diámetro nominal, Ø.

Bombeo, D. Distancia entre el disco y el eje de simetría de la rueda.

Figura 2.70. Dimensiones de la llanta.<sup>27</sup>

<sup>27</sup> Arias-Paz, M. (2006), *Manual de Automóviles*, Cie Inversiones Editoriales Dossat 2000 S.L., 56ª ed., 1ª reimpresión, mayo 2008, p. 937.

## 2. Base teórica

### 2.2.2.4. Designación.

El tamaño de las llantas viene determinado por un sistema internacional de identificación. Llevan estampada una denominación propia que comprende las características intrínsecas de cada una —el perfil de sus bordes y del asiento del neumático, el número de agujeros del disco y el diámetro del perno del buje en que se fije— como por ejemplo: [2]

- **5J x 14 H2 5/100 DIN 7818 FH 56<sup>28</sup>**

Quedando desglosadas cada una de ellas de la siguiente manera:

- 5, indica que la anchura interior es de 5 pulgadas.
- J, indica la altura de la pestaña, 17.3 mm.
- x, indica que posee acanaladura, al ser de base honda.
- 14, representa el diámetro de la llanta de 14 pulgadas.
- H2, perfil que posee dos resaltes entre la acanaladura y las bases de apoyo.
- 5, va fijada al vehículo mediante 5 pernos.
- 100, equidistantes entre sí 100 mm.
- DIN 7818, se ajusta a esta norma.
- FH, admite el montaje de neumáticos sin cámara. En el caso de ser CH, obligatoriamente el neumático debe disponer de cámara, debido a la falta de estanqueidad de la llanta.
- 56, que el saliente o bombeo es de 56 mm.

### 2.2.2.5. Estructura.

La estructura que siguen las llantas puede ser de tres tipos como se observa en la figura 2.71.

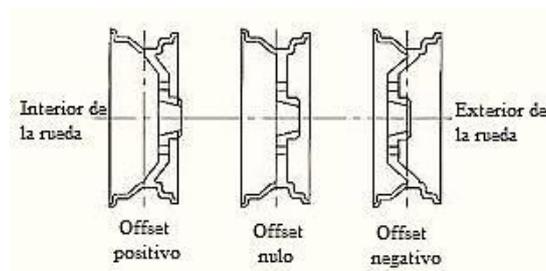


Figura 2.71. Estructura de la llanta.

Se debe tener en cuenta dónde está situado el punto de fijación con el buje y la mangueta, valorando si se encuentra desplazado hacia el interior —offset negativo— o el exterior —offset positivo— del vehículo o simplemente está centrado en el plano medio de la rueda —offset nulo— para saber qué estructura se adecúa mejor a las características del vehículo. La estructura de la llanta que se va a utilizar para el monoplaza Formula Student es de “offset nulo”, teniendo en su interior espacio suficiente para adaptar los elementos de suspensión.

<sup>28</sup> Este es un ejemplo de cómo se designa la llanta, por lo que se da por hecho que existen diferentes índices para designar cada característica.



### 3. Diseño del sistema de suspensión

---



## 3.1. CHASIS DE PARTIDA.

El chasis perteneciente al monoplaza Formula Student, el cual ha sido realizado por otro miembro del equipo, se observa en la figura 3.1 y servirá de base para realizar el estudio de la colocación del sistema de suspensión en el eje delantero a partir de las dimensiones de la estructura que lo compone y, teniendo en cuenta las restricciones que existen.

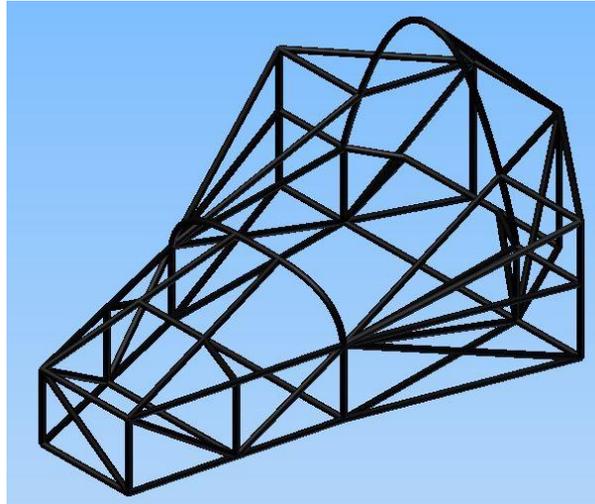


Figura 3.1. Chasis de partida.

El diseño se ha realizado a partir de la normativa impuesta por la organización de la competición, en la que es de obligado cumplimiento seguir cada una de las reglas que se dictan para poder pasar satisfactoriamente cada uno de los ensayos en los que sea sometido.

Para ello, se ha tenido en cuenta el diámetro y el espesor del tubo, las dimensiones respecto a la altura del suelo y del cuerpo del piloto, la colocación de los elementos de energía, además de los arcos de sujeción con sus respectivos tirantes diseñados previo estudio.

## 3.2. REQUERIMIENTOS SEGÚN NORMATIVA SAE.

### 3.2.1. Batalla y configuración del vehículo.

- *El coche debe tener una distancia mínima de 1525 mm (60 pulgadas). La distancia se mide desde el centro de contacto con el suelo de las ruedas delanteras y traseras con las ruedas delanteras rectas.*

*Regla T2.3. Normativa Formula Student® 2014. [10]*

La batalla del monoplaza que se va a diseñar es 1773.2 mm, distancia mayor que la distancia mínima de 1525 mm requerida por la normativa, por lo tanto, la regla T2.3 se cumple.

### 3. Diseño del sistema de suspensión

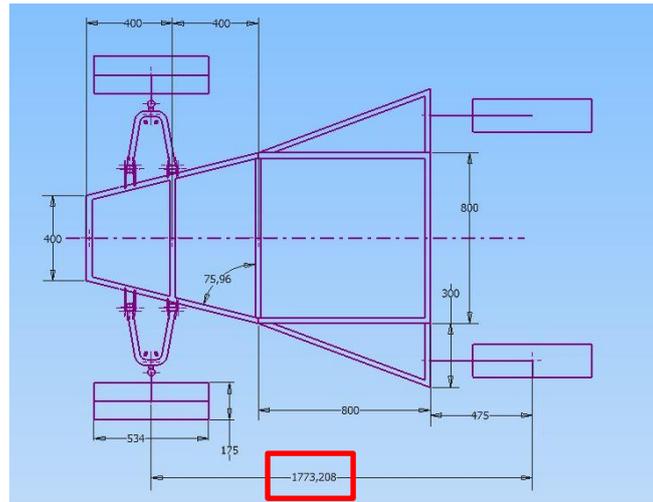


Figura 3.2. Batalla del monoplace.

#### 3.2.2. Vía.

- La vía más pequeña del vehículo (frontal o posterior) no debe ser menor del 75% de la vía más grande.

Regla T2.4. Normativa Formula Student® 2014. [10]

En el monoplace a diseñar, la vía del eje delantero es 1528.3 mm, por lo que el 75 % de 1528.3 mm es **1146.22 mm**. Al ser la vía del eje trasero —1150 mm— más pequeña que la del eje delantero, y mayor que 1146.22 mm se cumple la regla T2.4 de la normativa.

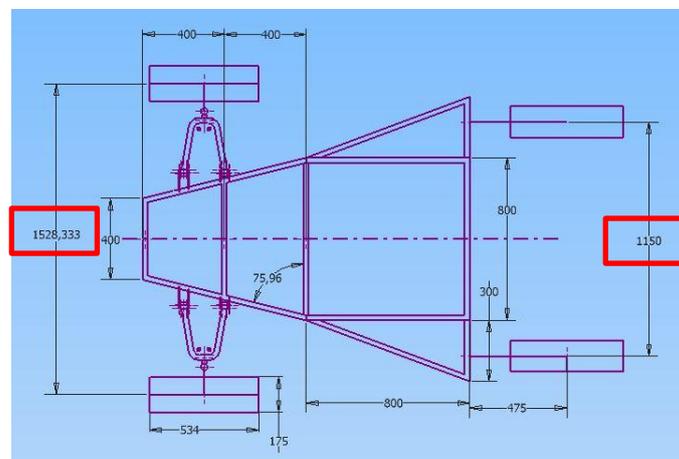


Figura 3.3. Vía del monoplace.

#### 3.2.3. Protección de las piernas del conductor.

- Para mantener las piernas del conductor alejadas de componentes en movimiento o afilados, los componentes de la suspensión y dirección en movimiento, y otros bordes afilados del interior del habitáculo del chasis entre el aro de rodillo frontal y un plano vertical 100 mm (4 pulgadas) hacia atrás de los pedales, tienen que estar apantallados con un material sólido. Incluidos los componentes en movimiento, pero no limitados a los muelles, amortiguadores, balancines, barra anti-balanceo/barras

### 3. Diseño del sistema de suspensión

---

*estabilizadoras, bastidores de dirección y juntas homocinéticas de la columna de dirección.*

**Regla T5.8.1. Normativa Formula Student® 2014. [10]**

#### 3.2.4. Elementos estructurales.

- *Los componentes cubiertos de suspensión y dirección tienen que ser desmontables para permitir la inspección de los puntos de montaje.*

**Regla T5.8.2. Normativa Formula Student® 2014. [10]**

#### 3.2.5. Recorrido de la suspensión.

- *El vehículo debe estar equipado con un sistema de suspensión totalmente operativo con amortiguadores delanteros y traseros, con recorrido utilizable de la rueda de al menos 50,8 mm (2 pulgadas), 25,4 mm (1 pulgada) de bote y 25,4 mm (1 pulgada) rebote, con el conductor sentado. Los jueces se reservan el derecho de descalificar a los coches que no representen un intento serio del funcionamiento de un sistema de suspensión o que demuestren un manejo inapropiado para un circuito de autocross.*

**Regla T6.1.1. Normativa Formula Student® 2014. [10]**

#### 3.2.6. Ruedas.

- *Las ruedas del coche tienen que tener un diámetro mayor o igual a 203.2 mm (8 pulgadas).*

**Regla T6.3.1. Normativa Formula Student® 2014. [10]**

La rueda elegida para el eje delantero del monoplaza a diseñar tiene la designación 175/80-R10, la cual tiene un diámetro total de 534 mm, mayor a la distancia de 203.2 mm requerida por la normativa. Por lo tanto, se cumple la regla T6.3.1.

#### 3.2.7. Elementos de sujeción y seguridad.

- *Todos los pernos roscados utilizados en la estructura del conductor y sistemas de la dirección, frenado, cinturón del conductor y suspensión deben cumplir o superar, grado SAE 5, métrica grado 8.8 y/o especificaciones AN/MS.*

**Regla T11.1.1. Normativa Formula Student® 2014. [10]**

- *Todo perno crítico, tuercas y otros elementos de sujeción en los sistemas de dirección, frenado, cinturón del conductor y suspensión se deben asegurar de un aflojamiento no intencionado por el uso de mecanismos de bloqueo.*

*Los mecanismos de bloqueo aceptados incluyen:*

- El cableado de seguridad instalado correctamente.*
- Los pasadores de chaveta.*
- Las tuercas de fijación de nylon.*
- Las contratuercas de par prevaeciente.*

**Nota:** *Las arandelas de seguridad y compuestos de cierre, por ejemplo, Loctite ®, no cumplen con el requisito de bloqueo.*

**Regla T11.2.1. Normativa Formula Student® 2014. [10]**

- *Debe haber un mínimo de dos roscas completas que sobresalgan de cualquier tuerca de seguridad.*

**Regla T11.2.2. Normativa Formula Student® 2014. [10]**

- *Todas las rótulas y rodamientos esféricos de la dirección y de la suspensión deben estar soportados por dos sujeciones mediante un tornillo/perno con un diámetro exterior más grande que el diámetro interior de la rótula.*

**Regla T11.2.3. Normativa Formula Student® 2014. [10]**

- *Los tirantes ajustables deben ser restringidos con una tuerca de seguridad para evitar que se afloje.*

**Regla T11.2.4. Normativa Formula Student® 2014. [10]**

## 3.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN.

### 3.3.1. Introducción a los sistemas CAD.

El diseño asistido por ordenador, también conocido como CAD —Computer Aided Design— es la tecnología que dispone como herramienta principal el uso de software específico —acompañado de hardware de gran potencial— para dar soporte en las tareas de creación, modificación, análisis u optimización del diseño de un producto en 2D o 3D perteneciente a distintas áreas: mecánica, aeronáutica, eléctrica, robótica, arquitectónica, electrónica, fluido-térmica, etc.

En la actualidad, dada la progresión exponencial que está teniendo el “mundo” industrial, esta tecnología se ha convertido en una herramienta básica para integrarla en los ordenadores de cualquier usuario o empresa del ámbito de la ingeniería, con la finalidad de reducir el tiempo y los costes de diseño y con ello mejorar la calidad del producto y la competencia en el mercado.

Los sistemas CAD tienen la capacidad de obtener una referencia visual real de la pieza deseada desde diferentes perspectivas, además de tener la posibilidad de simular el movimiento de la misma. Incluyen desde el diseño de la geometría hasta el análisis o la optimización de una pieza, una serie de análisis y cálculos como por ejemplo el análisis de elementos finitos, el cálculo de las propiedades físicas o el ensamblado de las piezas.

Es de vital importancia cómo se define la geometría del diseño, ya que es fundamental para reutilizarla en las tareas posteriores de ingeniería como son la optimización, la fabricación, la automatización o la producción del producto.

### 3.3.2. Software de aplicación.

#### 3.3.2.1. Autodesk Inventor.

El software Autodesk Inventor está orientado al diseño en tres dimensiones. Permite crear piezas de gran complejidad dando la posibilidad de crear geometrías con el mínimo número de operaciones.

Incluye operaciones para modelado 3D, gestión de información, colaboración y soporte técnico, dando la posibilidad de: [12]

- Crear modelos en 3D y planos para fabricación en 2D.
- Crear operaciones, piezas y sub-ensamblajes adaptativos.
- Gestionar miles de piezas en grandes ensamblajes.

### 3. Diseño del sistema de suspensión

---

- Utilizar aplicaciones de terceros con una interfaz del programa de aplicación —API Application Programming Interface—.
- Utilizar VBA —Visual Basic for Applications— para acceder a la interfaz API de Autodesk Inventor. Crear programas para automatizar tareas repetitivas. Seleccionar la ayuda de programación en el menú Ayuda.
- Importar archivos SAT —Standard ACIS Text format—, STEP —Standard for the Exchange of Product Data—, AutoCAD® y Autodesk® Mechanical Desktop® —DWG— para utilizarlos en Autodesk Inventor. Exportar archivos desde este último a formatos de AutoCAD, Autodesk Mechanical Desktop e IGES —Initial Graphics Exchange Specifications—.
- Colaborar con varios diseñadores en el proceso de modelado.
- Enlazar con herramientas de la Web para acceder a recursos de la industria, compartir datos y comunicarse con otros compañeros del trabajo.
- Utilizar el Sistema de Apoyo al Diseño —DSS, Design Support System— para facilitarle el trabajo.

#### 3.3.2.2. Formatos de archivo.

El programa admite y trabaja con diferentes formatos de archivo:

- Pieza: Archivo que tiene extensión **.ipt** y sirve para crear una pieza nueva a partir de un boceto en 2D o 3D.
- Ensamblaje: Archivo que tiene extensión **.iam** y se utiliza para crear un ensamblaje entre piezas creadas a partir de archivos **.ipt**, relacionándolas con los comandos pertenecientes a este entorno, destacando *Restringir* o *Ensamblar*, los cuales sitúan las piezas en la posición deseada.
- Plano: Archivo con extensión **.idw** y sirve para crear un dibujo que contiene las vistas en 2D del diseño. Cualquier cambio en el diseño en 3D se reflejará de manera inmediata en el dibujo. Se pueden guardar con la extensión **.dwg**, siendo así válidos para su uso en el software AutoCad.
- Chapa: Archivo con extensión **.ipt** y se utiliza para crear una pieza de chapa. El entorno de trabajo incluye todos los comandos específicos para realizar el diseño de chapa.

### 3. Diseño del sistema de suspensión

---

- Conjunto soldado: Archivo con extensión **.iam** y sirve para crear un ensamblaje de piezas. Su entorno de trabajo contiene los comandos específicos de soldadura para realizar un diseño de conjunto soldado.
- Presentación: Archivo que sirve para realizar la animación de las piezas que componen un ensamblaje además de crear sus vistas explosionadas.

#### 3.3.2.3. Creación de piezas sólidas.

Para la creación de piezas sólidas se debe partir de la realización de un boceto. Una vez creado, se deben aplicar una serie de operaciones en función de la forma requerida de la pieza. Las operaciones más comunes que se utilizan y que más adelante se verá su aplicación en el diseño de las piezas del sistema de suspensión son las siguientes:

- Extrusión: Operación para añadir profundidad a un perfil abierto o cerrado, o bien una región a lo largo de un camino recto.
- Revolución: Operación para girar uno o varios perfiles de boceto alrededor de un eje. El eje y el perfil deben ser coplanarios.
- Barrido: Operación para desplazar un perfil de boceto a lo largo de un camino plano. Excepto en el caso de superficies, los perfiles deben ser contornos cerrados.
- Solevación: Operación para fusionar las formas de dos o más perfiles en planos de trabajo o caras planas.
- Espira: Operación que proyecta un perfil de boceto a lo largo de un camino helicoidal. Sirve para crear muelles espirales y roscas.
- Nervio: Operación para crear nervios —formas de apoyo cerradas de paredes delgadas— y refuerzos de corte —formas de apoyo abiertas de paredes delgadas—.

Una vez obtenido el cuerpo de la pieza, existen otro tipo de operaciones predefinidas que no tienen la necesidad de crear un boceto para su aplicación. Estas operaciones sirven para aproximarse al resultado final que se desea obtener de la pieza y son las siguientes: agujero, vaciado, rosca, empalme, chaflán, patrón rectangular, patrón circular y simetría.

### 3. Diseño del sistema de suspensión

#### 3.3.3. Diseño de las piezas del sistema de suspensión.

##### 3.3.3.1. Esquema y material de las piezas del sistema de suspensión.

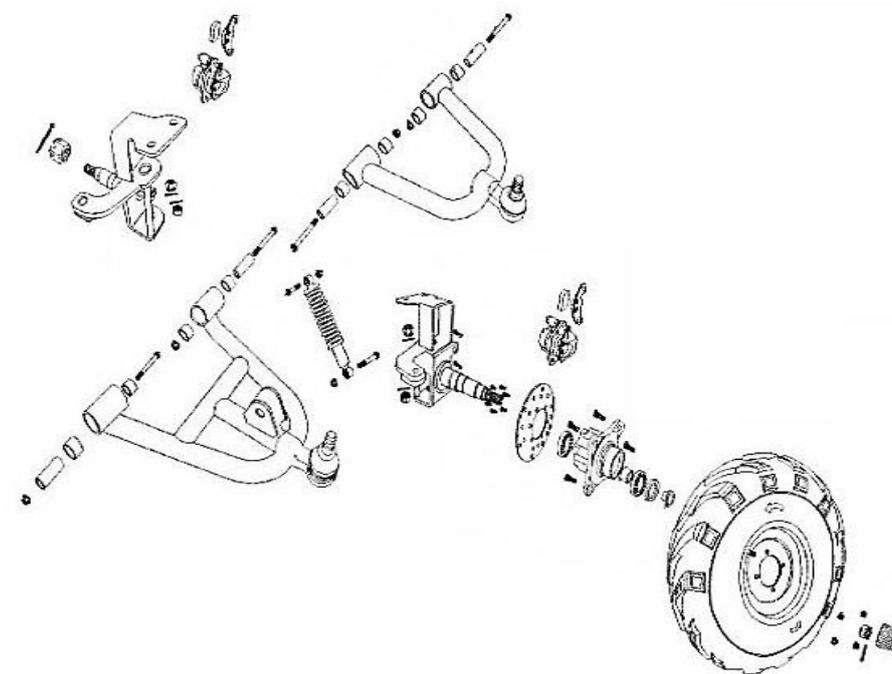


Figura 3.4. Despiece de las piezas del sistema de suspensión.

Código	Piezas	Material
F3-7-260	Trapezio delantero superior 260-1	Acero
F3-9-260	Trapezio delantero inferior 260-1	Acero
F3-13-260	Mangueta dirección izquierda 260	Acero
F3-1-260	Mangueta dirección derecha 260	Acero
F3-22-260	Buje rueda delantera	Acero
-	Rodamientos de buje	Acero
F4-6-260	Amortiguador delantero 260-1	Acero
F3-28-260	Llantas delanteras 10"	Aluminio
F3-19-260	Cubierta mixta 21/7-10	Caucho
F3-25-260	Disco de freno delantero 130 mm	Acero

Tabla 3.1. Material de las piezas compradas del sistema de suspensión.

### 3. Diseño del sistema de suspensión

#### 3.3.3.2. Procedimiento del diseño detallado del trapecio inferior.

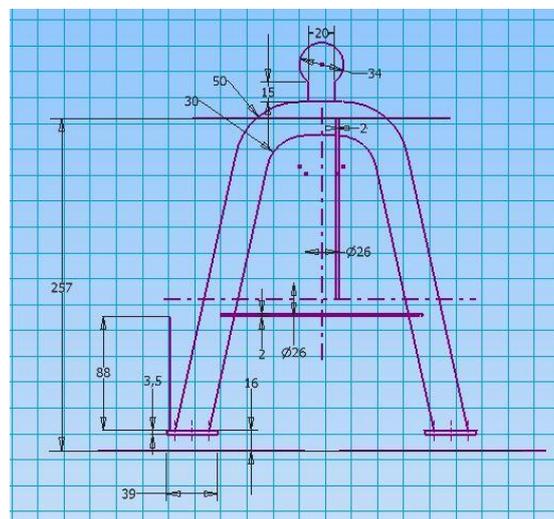
A continuación, se describe el proceso detallado del diseño de una de las piezas más relevantes del sistema de suspensión: el trapecio inferior de suspensión.

Para comenzar con el diseño, se parte de la pieza real para adaptarla al chasis del proyecto Formula Student, la cual se observa en la figura 3.5.



**Figura 3.5. Trapecio inferior.**

Las dimensiones del trapecio —y del resto de piezas—, se han tomado en el taller que dispone el equipo de la Universidad. La pieza cuenta con un diámetro exterior de tubo de 26 mm y de espesor 2 mm. A partir de este punto, conociendo el diámetro y el espesor de los tubos, además de las medidas de los anclajes y del resto de partes destacadas, se realiza el boceto 2D con la forma deseada resultando el que se observa en la figura 3.6.



**Figura 3.6. Boceto del trapecio inferior.**

Una vez finalizado el boceto, para dar forma al tubo, se crea un plano en el lugar que se indica en la figura 3.7 y se realiza un nuevo boceto 2D. En él se dibuja un círculo de diámetro 26 mm el cual será el que genere la forma al tubo posteriormente.

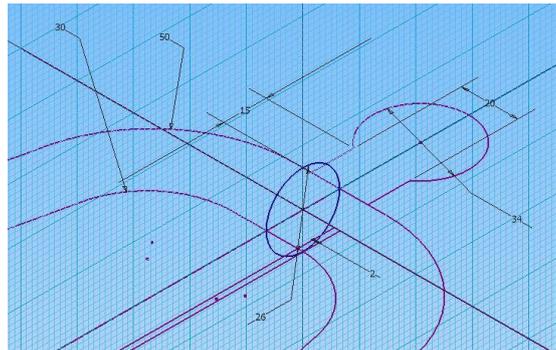


Figura 3.7. Segundo boceto para crear el brazo del trapecio.

Teniendo ambos bocetos visibles, se hace uso de la operación *Barrido* para dar forma al tubo, seleccionando el “Perfil”, —el círculo de 26 mm— y el “Camino” que debe seguir el barrido para la creación de la pieza —brazo izquierdo del trapecio— como se observa en la figura 3.8.

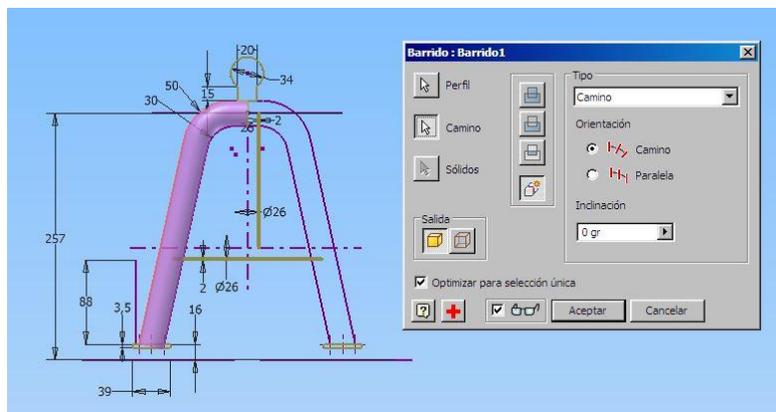


Figura 3.8. Operación *Barrido* en el brazo izquierdo.

Para realizar el diseño de los apoyos del trapecio que se anclan al chasis, se hace uso de la operación *Revolución*, seleccionando el “Perfil” para revolucionar —habiéndose diseñado previamente en el boceto con 39 mm de largo y 3.5 mm de espesor— y el “Eje” en el cual ese perfil va a revolucionar, como se observa en el cuadro de diálogo de la siguiente figura:

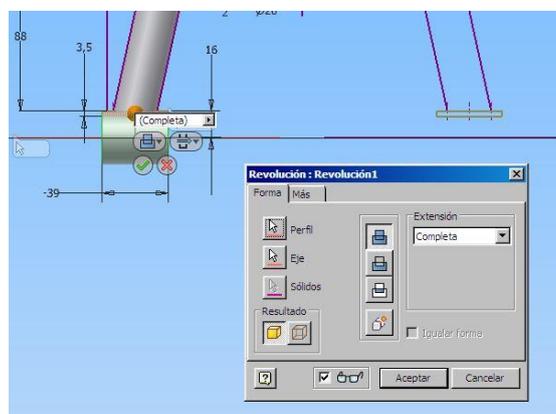
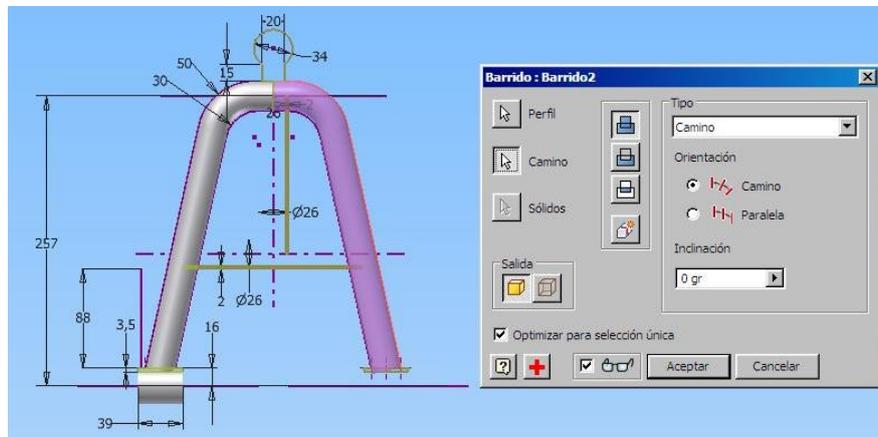


Figura 3.9. Operación *Revolución*.

### 3. Diseño del sistema de suspensión

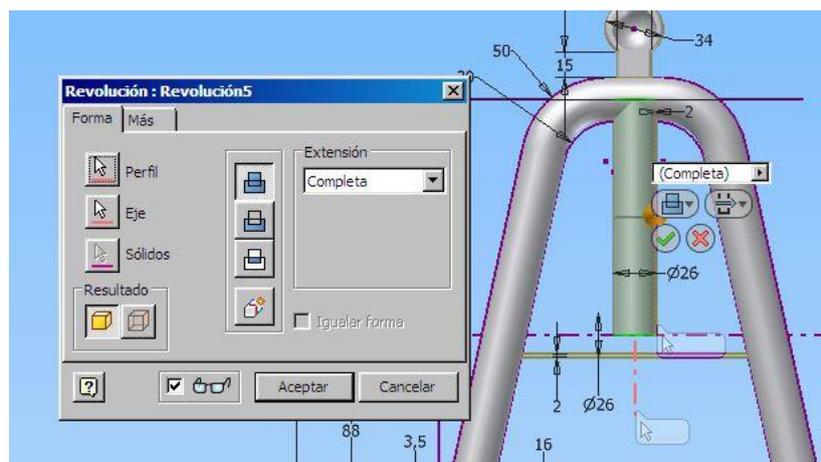
Para el brazo derecho del trapecio, se sigue el mismo proceso que para el brazo izquierdo, con la operación *Barrido* y seleccionando el círculo como “Perfil” a desarrollar y el brazo derecho como “Camino” indicado en la siguiente figura:



**Figura 3.10. Operación *Barrido* en el brazo derecho.**

Con la estructura realizada, la cual sirve también para el trapecio superior, se realizan los tubos internos que darán sujeción al trapecio para poder soportar los esfuerzos realizados por el amortiguador.

En la creación del primer boceto 2D, se había dibujado el eje del plano medio de la pieza y a 13 mm de él una línea paralela —corresponde con el exterior del tubo—, realizando a 2 mm otra paralela para crear el espesor del tubo correspondiente a 2 mm. Esto se ha pensado para hacer uso nuevamente de la operación *Revolución*, seleccionando el “Perfil” en la sección creada de 2 mm y como “Eje” el creado en el plano medio de la pieza, observándose en la figura 3.11 el tubo resultante.



**Figura 3.11. Operación *Revolución* para la barra vertical.**

Del mismo modo, para diseñar la barra horizontal se ha seguido el mismo paso con la operación *Revolución*, seleccionando el “Perfil” y el “Eje” creados para tal fin, observando el resultado en la figura 3.12.

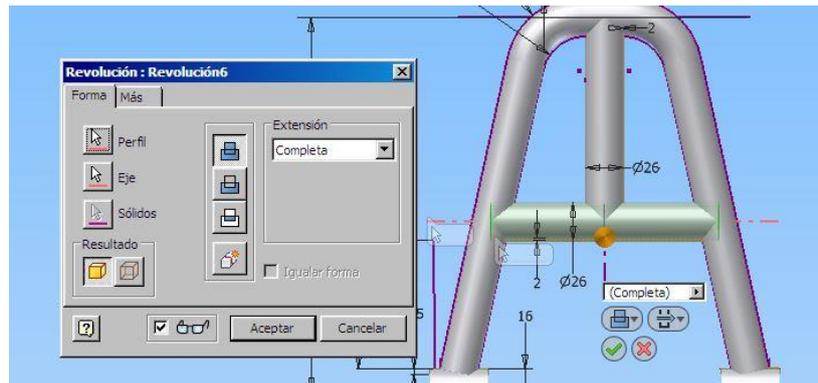


Figura 3.12. Operación *Revolución* para la barra horizontal.

Con el cuerpo principal diseñado, el siguiente paso es el diseño del soporte para el anclaje del amortiguador. Se inicia creando un plano *Tangente a superficie a través de punto* y seleccionando un punto de la barra vertical en el que se va a diseñar el soporte queda marcado el plano para trabajar sobre él. A partir de aquí, se crea un boceto 2D nuevo y a la distancia medida se diseña la base del soporte, con 31 mm de ancho y 37 mm de largo. Con el rectángulo, se hace uso de la operación *Extrusión*, seleccionando como “Perfil” la base y dándole 3.5 mm de espesor, indicado en la figura 3.13.



Figura 3.13. Operación *Extrusión*.

Para el diseño de los anclajes del amortiguador, se crea un nuevo boceto 2D en una de las caras laterales de la base, dando la forma deseada al anclaje, con las medidas indicadas en la siguiente figura:

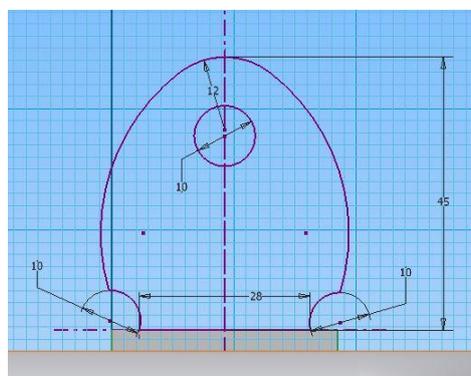
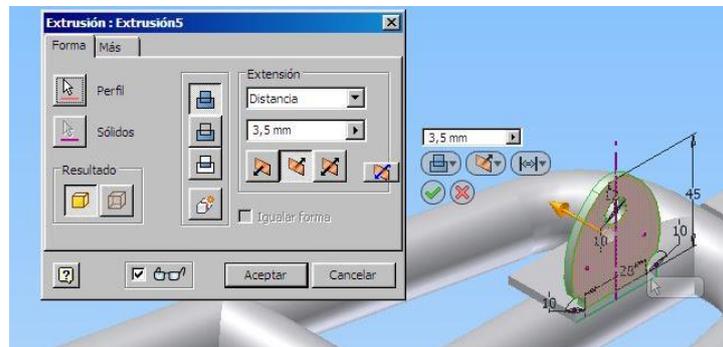


Figura 3.14. Boceto para la creación del anclaje del amortiguador.

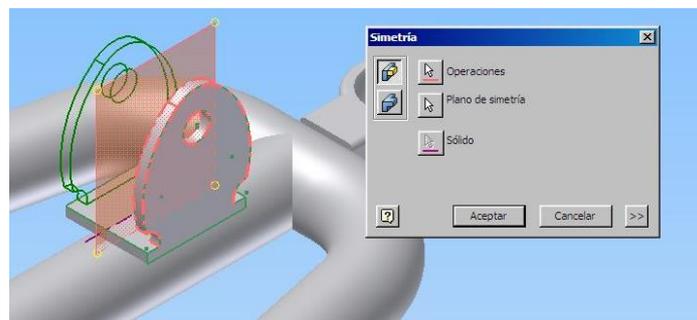
### 3. Diseño del sistema de suspensión

De la misma forma que para la base del soporte, se usa la operación *Extrusión* con un espesor de 3.5 mm, seleccionando como “Perfil” la forma del anclaje y cambiando la dirección al sentido opuesto, da como resultado lo siguiente:



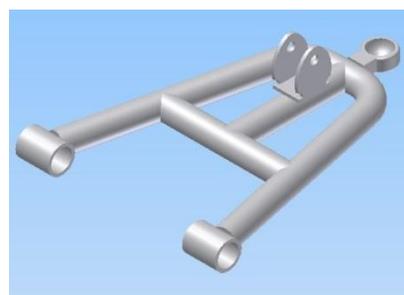
**Figura 3.15. Operación *Extrusión*.**

Puesto que hay dos anclajes en la base, la forma más sencilla de realizar el otro anclaje es con el comando *Simetría*. Para ello, se crea un plano en una cara lateral, y haciendo uso del *Desfase de plano*, se selecciona el plano y se traslada 15.5 mm —punto medio de la base—. Con el plano situado en el punto medio, se usa la operación *Simetría* seleccionando como “Operaciones” el anclaje y el plano de simetría que se observa en la figura 3.16.



**Figura 3.16. Operación *Simetría*.**

Con esto, se tiene la pieza prácticamente terminada, a excepción de la unión de las partes que la componen, ya que como se muestra en la siguiente figura, la unión con el chasis, el soporte del anclaje del amortiguador y la estructura en la que se insertará la rótula parecen estar “en el aire” sin ningún tipo de unión.



**Figura 3.17. Forma del trapecio inferior.**

### 3. Diseño del sistema de suspensión

En la siguiente figura, se observa bien lo comentado anteriormente, como la parte superior del trapecio necesita algún tipo de unión con el trapecio para que a la hora de simular no “rompa” la pieza por esa zona.

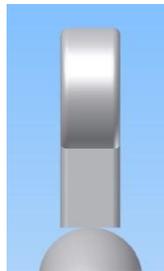


Figura 3.18. Vista lateral del apoyo de la rótula.

La opción elegida para unir cada elemento al cuerpo principal del trapecio, es haciendo uso del entorno *Soldaduras*. Al seleccionar en “Entornos” la opción *Convertir en conjunto soldado*, aparece el siguiente cuadro de diálogo, en el que se selecciona la norma ISO y el material correspondiente del cordón de soldadura.

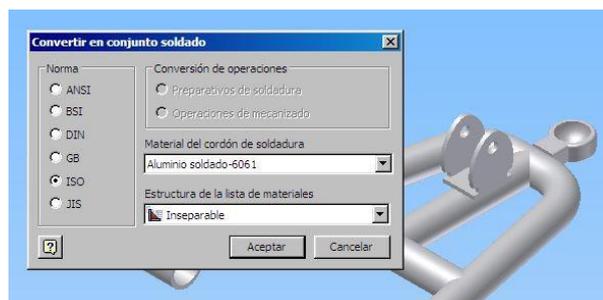


Figura 3.19. Inicio del entorno *Soldadura*.

Dentro del entorno *Soldaduras*, existen varias opciones para soldar los elementos a unir como soldadura por empalme, para ranuras o ficticia.

Para la unión del soporte donde se insertará la rótula de sujeción se hará mediante *Soldadura para ranuras*, seleccionando la base del soporte como cara 1 y el tubo donde irá soldado como cara 2, dando la dirección radial como se observa en la figura 3.20.

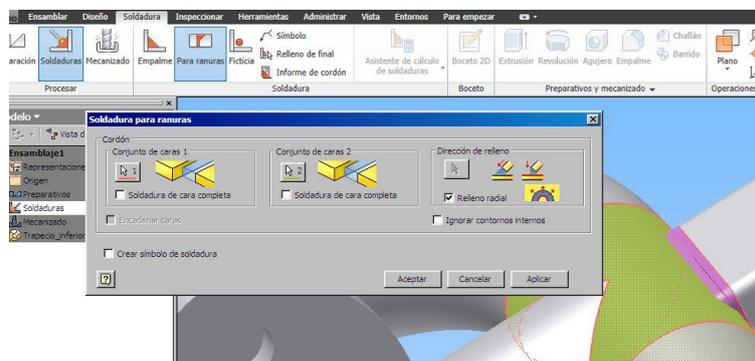


Figura 3.20. Uso de la operación *Soldadura para ranuras*.

Para usar la opción de *Soldadura de empalme*, se selecciona una de las caras laterales del soporte y acto seguido la zona del tubo donde se unirá el cordón de soldadura de 3 mm.

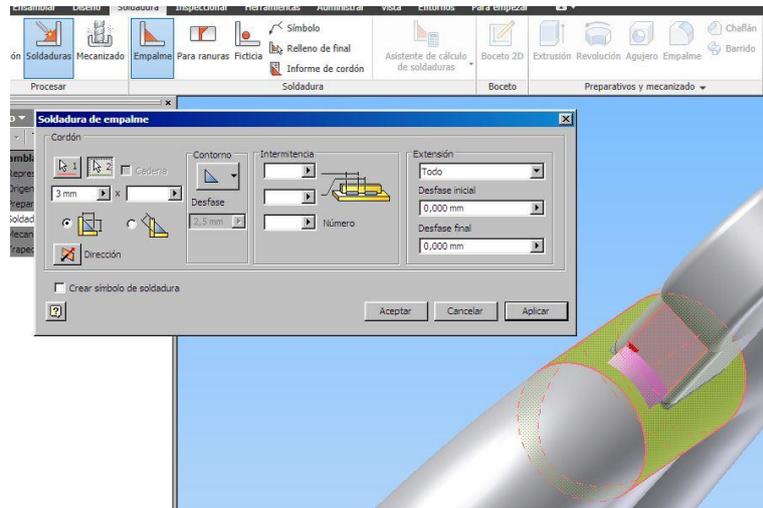


Figura 3.21. Uso de la operación *Soldadura de empalme*.

En los anclajes con el chasis ocurre lo mismo, queda un hueco libre que se debe unir para reforzar la zona de la base y no rompa ante grandes esfuerzos de oscilación. Para ello se usa el modo *Soldadura para ranuras* y se selecciona como cara 1 la base del tubo y como cara 2 el soporte —donde irá el silentblock y los casquillos de unión al chasis— dando como dirección relleno radial.

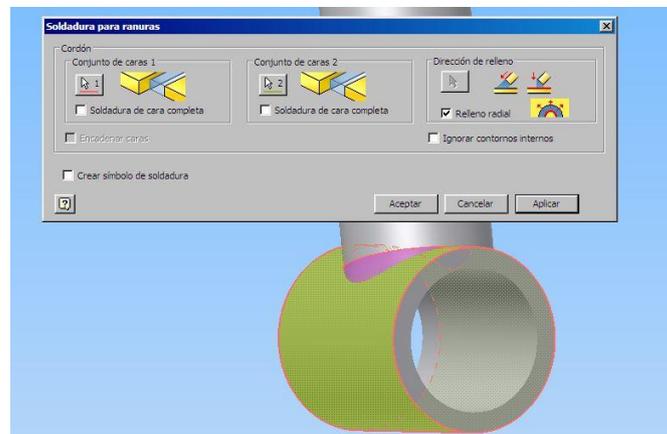


Figura 3.22. Uso de la operación *Soldadura para ranuras* en el apoyo al chasis.

La base del soporte de los anclajes del amortiguador se realizan por *Soldadura de empalme*, seleccionando primero la parte inferior del soporte seguido del tubo vertical para que siga el cordón de soldadura de 15.5 mm la dirección adecuada al tubo, quedando el resultado de la figura 3.23.

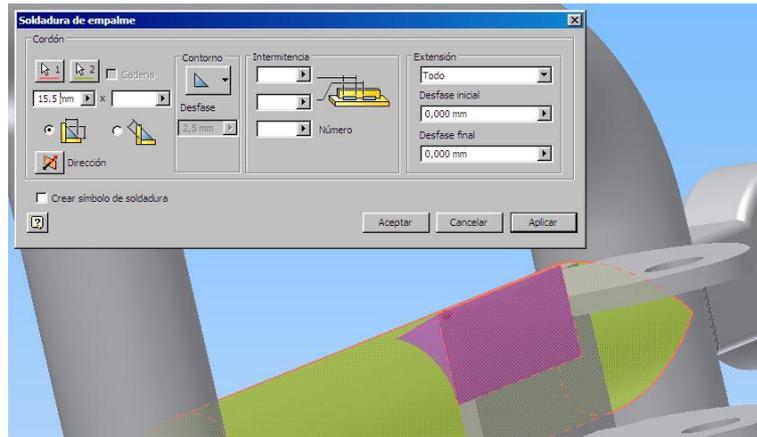


Figura 3.23. Uso de la operación *Soldadura de empalme* en el anclaje.

Una vez finalizado el conjunto soldado, quedaría la pieza de la figura 3.24, observándose el cordón de soldadura en cada elemento de unión.

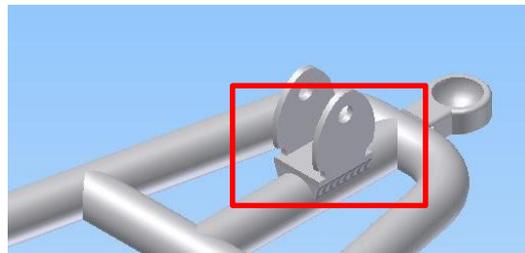


Figura 3.24. Conjunto soldado.

Para terminar la pieza, se crea un archivo con extensión **.iam** para ensamblar las diferentes partes que componen el trapecio como son los casquillos, silentblocks y la rótula.

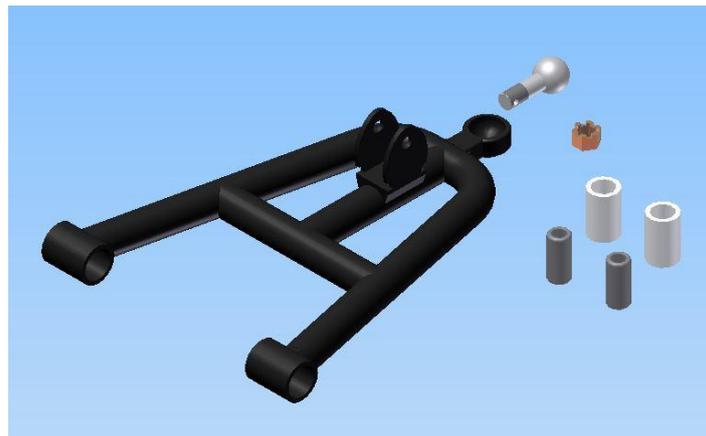


Figura 3.25. Inicio del ensamblaje del trapecio con los elementos de unión.

Existen dos formas para el ensamblaje de las piezas. A partir de la operación *Restringir* o de la operación *Ensamblar*. Para ensamblar el trapecio completo, se ha usado solamente la opción de restricción.

### 3. Diseño del sistema de suspensión

Para restringir los silentblocks —dentro del modo “Coincidencia”— se selecciona primero el eje del silentblock y después el eje de las bases del trapecio que se unen con el chasis como se indica en la figura 3.26.

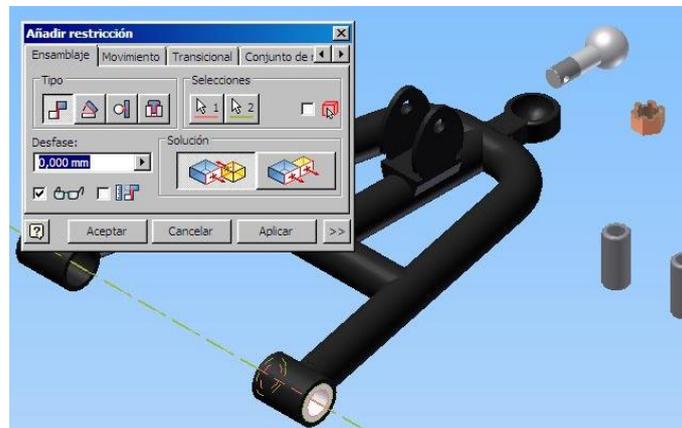


Figura 3.26. Uso de la operación *Restringir* por “Coincidencia”.

Estando el silentblocks en el mismo eje, queda restringido el movimiento solamente en la dirección del eje. Para fijarlo a la misma distancia que el apoyo del trapecio, se elige el modo “Nivelación”, como se indica en el cuadro de diálogo de la figura 3.27, y se selecciona la cara lateral de cada una para restringirlas en el mismo lugar.

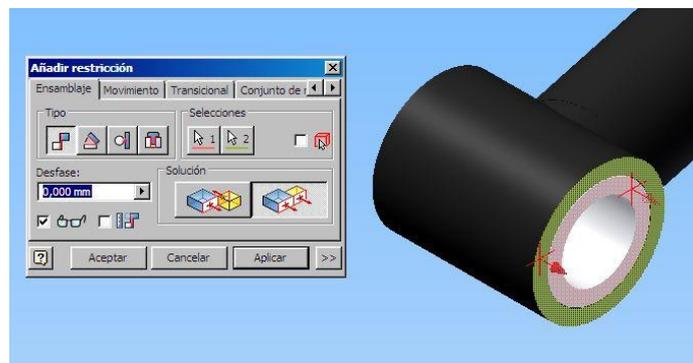


Figura 3.27. Uso de la operación *Restringir* por “Nivelación”.

Se realiza el mismo método con los casquillos donde irán los pernos de sujeción. Se elige el modo “Nivelación” y se seleccionan las caras del silentblock y del casquillo para igualarlas quedando fijadas a la misma altura.

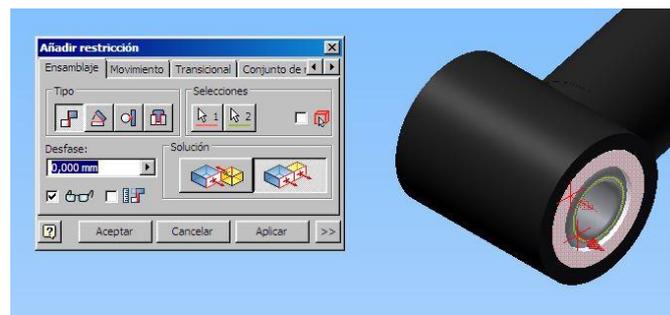


Figura 3.28. Restricción por “Nivelación” del casquillo con el silentblock.

### 3. Diseño del sistema de suspensión

En el caso de la rótula, también se utiliza el modo “Coincidencia” seleccionando el punto medio de la esfera para restringirlo con la superficie diseñada para este fin, dejando el movimiento de rotación libre sobre el mismo eje para hacer la función propia de una rótula esférica.



Figura 3.29. Restricción por “Coincidencia” de la rótula con el apoyo del trapecio.

La pieza final resultante, después de utilizar el módulo de soldadura y el ensamblaje, queda de la siguiente manera:



Figura 3.30. Diseño final del trapecio de suspensión inferior.

#### 3.3.3.3. Diseño del resto de elementos.

- **Diseño del amortiguador.**

- Pieza real:



Figura 3.31. Amortiguador.

- Resultados del diseño realizado:

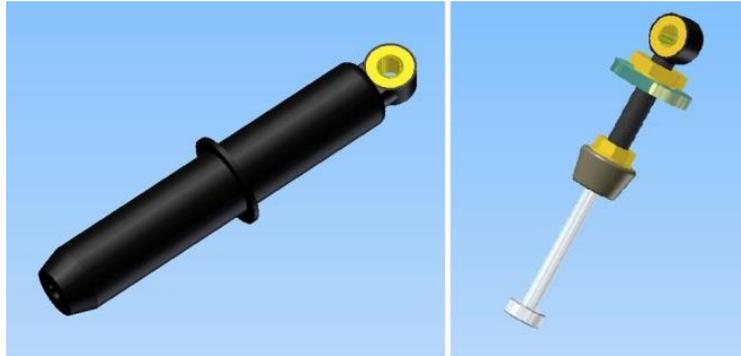


Figura 3.32. Parte inferior (izda.) y superior (drcha.) del amortiguador.

- Muelle:

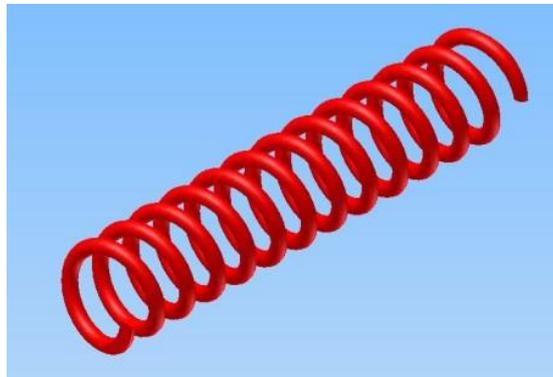


Figura 3.33. Diseño del muelle.

- Pieza final:



Figura 3.34. Diseño completo del amortiguador.

### 3. Diseño del sistema de suspensión

- **Diseño del trapecio superior.**

- Pieza real.



Figura 3.35. Vista frontal (izda.) y posterior (drcha.) del trapecio superior.

- Resultado del diseño realizado.



Figura 3.36. Diseño completo del trapecio superior.

- **Diseño del buje.**

- Pieza real:



Figura 3.37. Alzado (izda.), perfil (centro) y planta (drcha.) del buje.

- Resultados del diseño realizado:

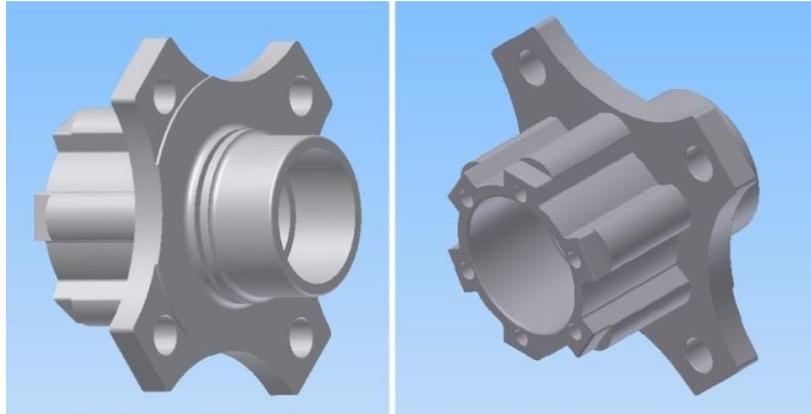


Figura 3.38. Vista frontal (izda.) y posterior (drcha.) del diseño del buje.

- **Diseño de la mangueta.**

- Pieza real:



Figura 3.39. Alzado (izda.) y perfil (drcha.) de la mangueta.

- Resultados del diseño realizado:

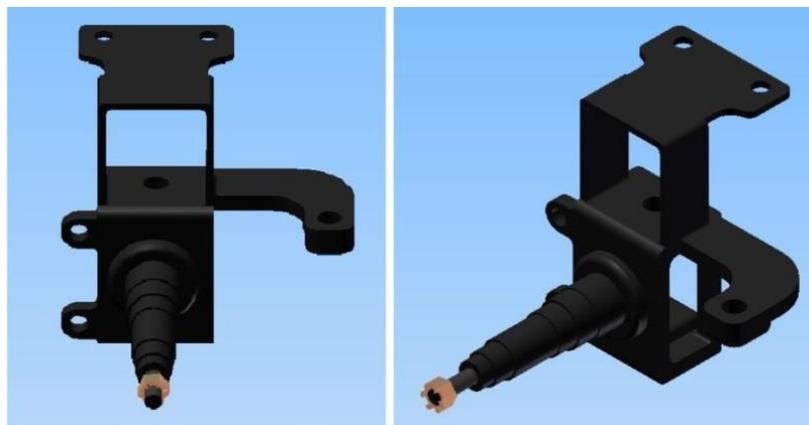


Figura 3.40. Vista frontal (izda.) e isométrica (drcha.) del diseño de la mangueta.

- **Diseño del disco de freno:**

- Pieza real:



Figura 3.41. Vista frontal (izda.) y posterior (drcha.) del disco de freno.

- Resultado del diseño realizado:

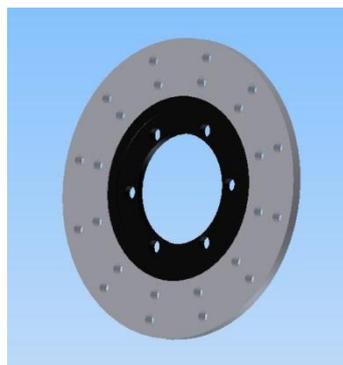


Figura 3.42. Diseño del disco de freno.

- **Diseño de los anclajes del chasis.**

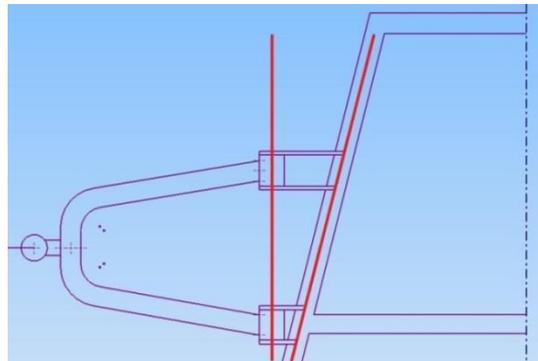
- Justificación.

El diseño de los anclajes que unen los trapecios de la suspensión con el chasis, viene determinado por el diámetro del tubo del chasis —25 mm—, el perno de sujeción que une el trapecio con cada par de anclajes y la forma de los trapecios elegidos.

Debido a que los dos apoyos de cada trapecio están en un plano paralelo al plano longitudinal del chasis, y a que el lugar de colocación de los trapecios en el chasis se realizará en un plano oblicuo y no paralelo a los puntos de apoyo, se ha realizado un estudio en el lugar de colocación teniendo en cuenta las restricciones que existen para situar el sistema de suspensión en la posición más óptima, siempre que el eje delantero cumpla la distancia mínima de 1525 mm —exigida por la normativa SAE— respecto al eje trasero.

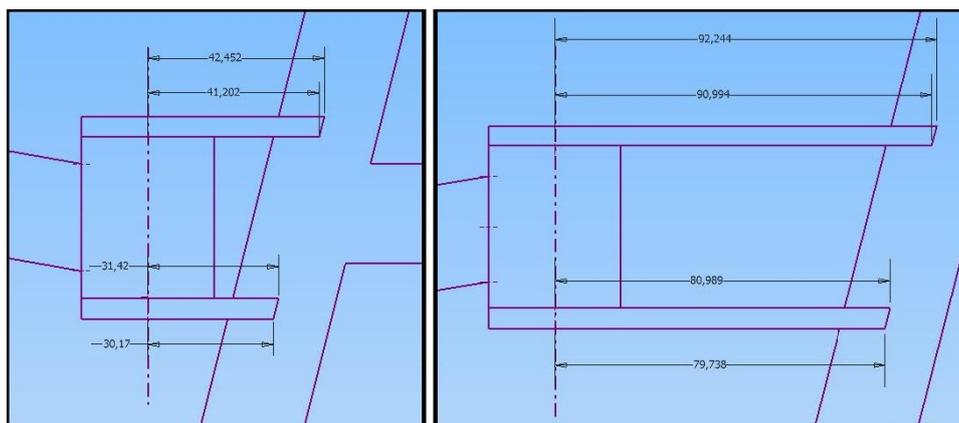
### 3. Diseño del sistema de suspensión

La opción elegida para posicionar los anclajes del chasis es la que se observa en la figura 3.43, situando uno de los brazos en la unión de los tubos para asegurar que las fuerzas que actúan en las desigualdades del terreno afecten lo menos posible al chasis:



**Figura 3.43. Representación de la colocación de los anclajes.**

Para conocer las medidas de cada anclaje y posteriormente realizar su diseño, en la figura 3.44 se observan las distancias desde el eje del apoyo del trapecio hasta el eje del tubo oblicuo del chasis, teniendo en cuenta la inclinación de este para que no hay problemas de adaptación de la base del anclaje al chasis cuando se realice la soldadura.



**Figura 3.44. Bocetos con las medidas de los anclajes.**

➤ Resultado del diseño realizado:



**Figura 3.45. Diseño de los anclajes del chasis.**

- **Diseño del anclaje que une la parte superior del amortiguador.**

- Justificación:

El diseño que se ha pensado para el anclaje del amortiguador con la barra del chasis es de distinta forma que los anclajes de unión de los trapecios con el chasis, debido a que la longitud del amortiguador elegido es mayor respecto a la distancia que resta para unirlo al chasis, por lo que con las piezas ya ensambladas en el chasis, se ha medido la distancia de 179 mm desde el orificio del perno hasta parte superior de la barra del chasis, como se observa en la figura 3.46.

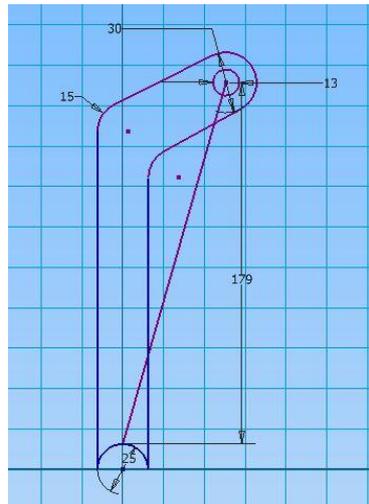


Figura 3.46. Boceto del anclaje del chasis para el amortiguador.

Para proporcionarle a la pieza mayor sujeción, se ha utilizado el comando *Extrusión* con un espesor de 8 mm, seguido del comando *Simetría* y así poder hacer una única pieza mediante 3 nervios instalados en la parte interior para que pueda soportar mayores esfuerzos y absorber las oscilaciones con menor dificultad que si estuviesen por separado.

- Resultado del diseño realizado:

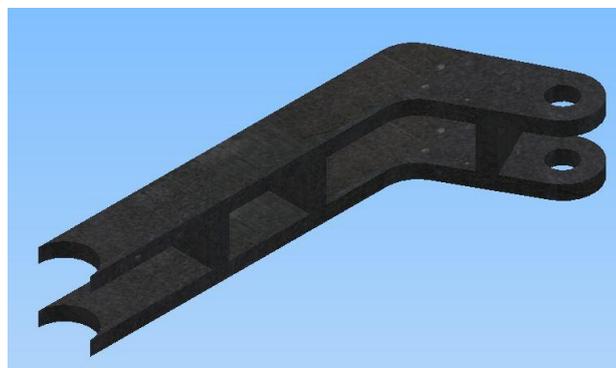


Figura 3.47. Diseño del anclaje del chasis para la parte superior del amortiguador.

- **Diseño de pernos y elementos de sujeción.**

- Piezas reales:



Figura 3.48. Tuerca almenada de la mangueta (izda.) y perno amortiguador (drcha.).

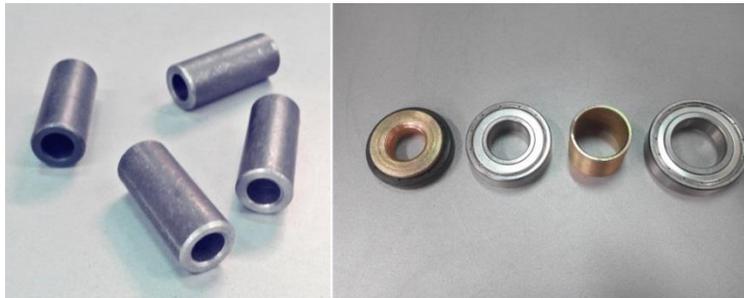


Figura 3.49. Casquillos de los trapecios superior e inferior (izda.) y elementos internos del buje (drcha.)



Figura 3.50. Anillo interior (izda.) y tope de sujeción (drcha.) del buje.



Figura 3.51. Rodamiento rígido de bolas FAG 6004-C-2Z (izda.) y 6005-2ZR (drcha.) del buje.



Figura 3.52. Pernos de sujeción del buje con la llanta.

➤ Resultados del diseño realizado:

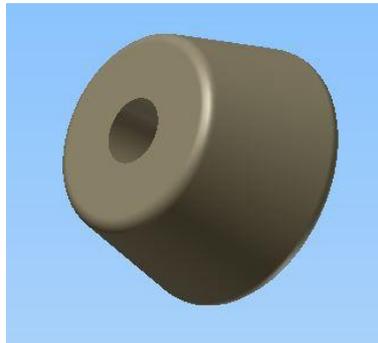


Figura 3.53. Diseño del tope de goma del amortiguador.

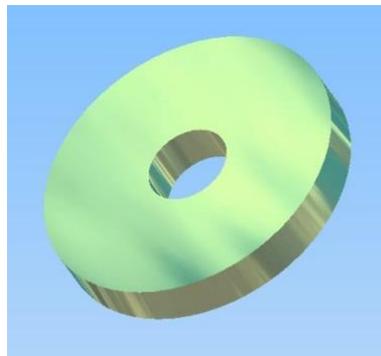


Figura 3.54. Diseño de la copela de la parte superior del amortiguador.

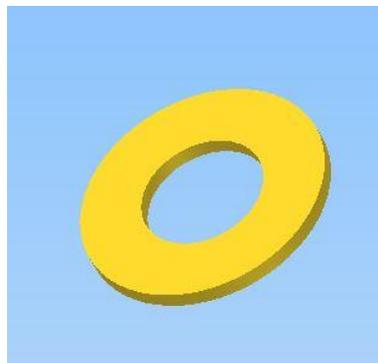


Figura 3.55. Diseño de la arandela de la parte superior del amortiguador.

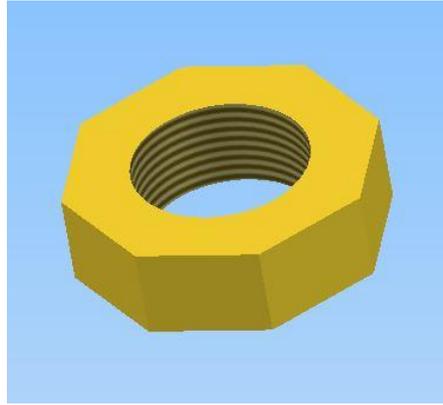


Figura 3.56. Diseño de la tuerca que sujeta el tope de goma.

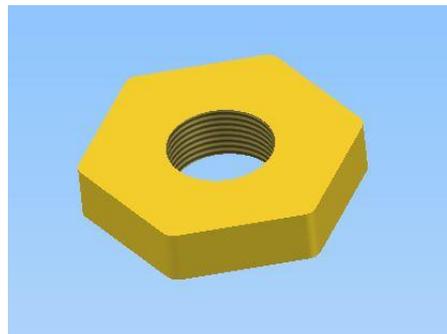


Figura 3.57. Diseño de la tuerca reguladora de la compresión del muelle.

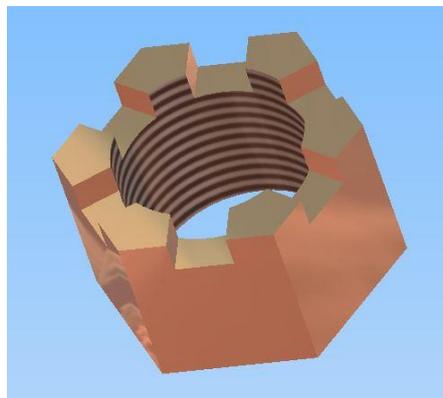


Figura 3.58. Diseño de la tuerca almenada de las rótulas de fijación.

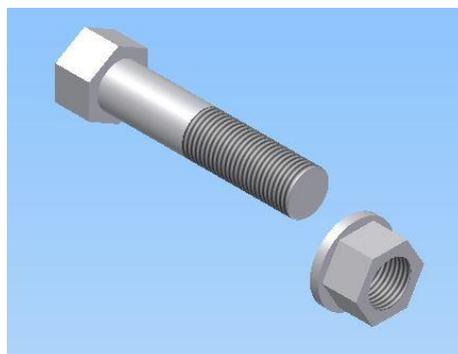
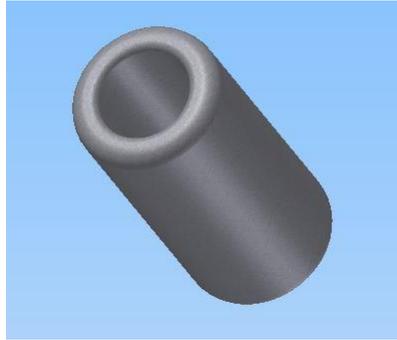
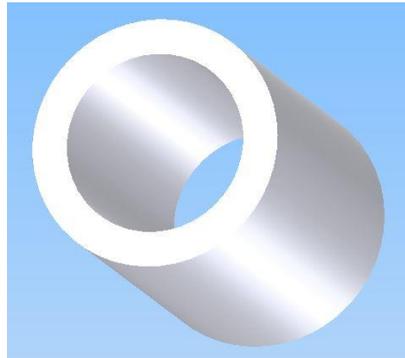


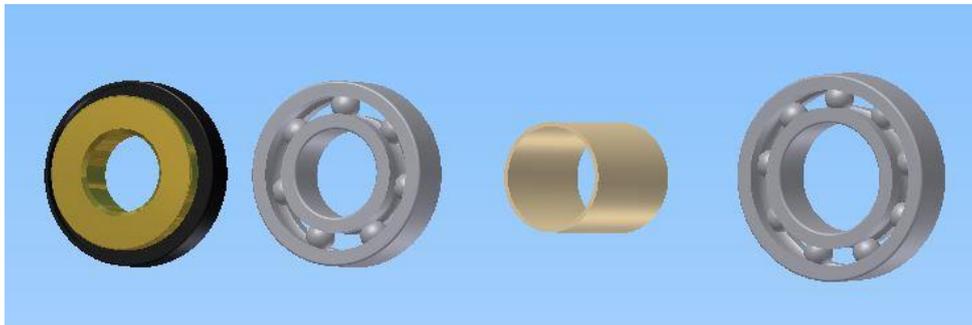
Figura 3.59. Diseño del perno M10 y tuerca de sujeción amortiguador-trapecio-chasis.



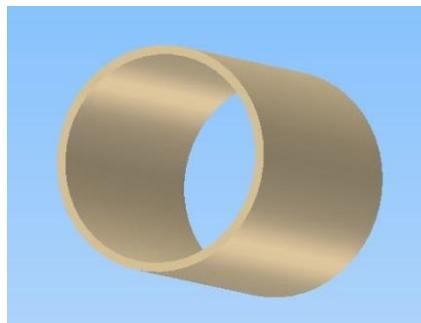
**Figura 3.60.** Diseño del casquillo de los trapecios superior e inferior de una rueda.



**Figura 3.61.** Diseño del silentblock de los trapecios superior e inferior.



**Figura 3.62.** Diseño de los elementos internos del buje.



**Figura 3.63.** Diseño del anillo interior del buje.



Figura 3.64. Diseño del tope de sujeción del buje con la mangueta.

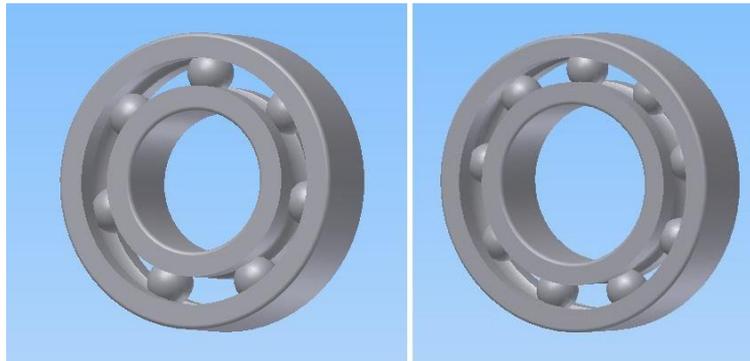


Figura 3.65. Diseño rodamiento bolas FAG 6004-C-2Z (izda.) y FAG 6005-2ZR (drcha.).

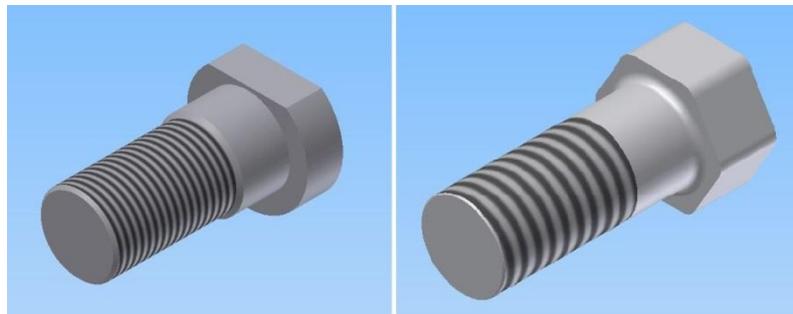


Figura 3.66. Perno M11 que fija el buje con la llanta (x4 en cada rueda) (izda.) y M6 que fija el disco de freno con el buje (x6 en cada rueda) (drcha.).

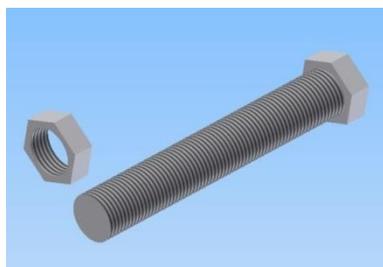


Figura 3.67. Perno M11 y tuerca de los anclajes del chasis (x4 en cada rueda).

### 3. Diseño del sistema de suspensión

#### 3.3.4. Diseño de la llanta y el neumático.

- **Diseño de la llanta.**

- Pieza real:



Figura 3.68. Llanta de 10”.

- Resultados del diseño realizado:

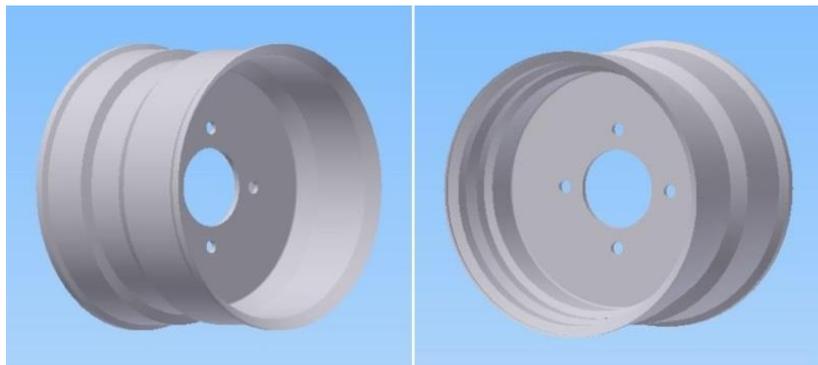


Figura 3.69. Vista posterior (izda.) y frontal (drcha.) del diseño de la llanta de 10”.

- **Diseño del neumático.**

- Pieza real:



Figura 3.70. Neumáticos 175/80-R10.

### 3. Diseño del sistema de suspensión

➤ Resultados del diseño realizado:



Figura 3.71. Diseño del neumático 175/80-R10.

#### 3.3.5. Ensamblaje del sistema de suspensión.

##### 3.3.5.1. Ensamblaje de la rueda.



Figura 3.72. Vista frontal de la rueda.

##### 3.3.5.2. Ensamblaje de los trapecios, mangueta y amortiguador.



Figura 3.73. Fijación de los trapecios con la mangueta y el amortiguador.



Figura 3.74. Ensamblaje de los trapecios con la mangueta y el amortiguador.

### 3. Diseño del sistema de suspensión

#### 3.3.5.3. Ensamblaje de la mangueta con el buje.

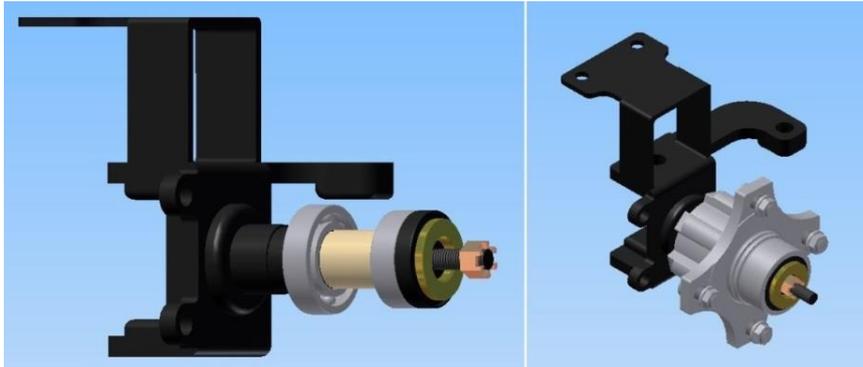


Figura 3.75. Ensamblaje de los elementos internos del buje (izda.) y el buje (drcha.) con la mangueta.

#### 3.3.5.4. Ensamblaje de la rueda, el buje y los elementos de suspensión.



Figura 3.76. Ensamblaje de la rueda y los elementos de suspensión.

#### 3.3.5.5. Ensamblaje de los anclajes con el chasis.

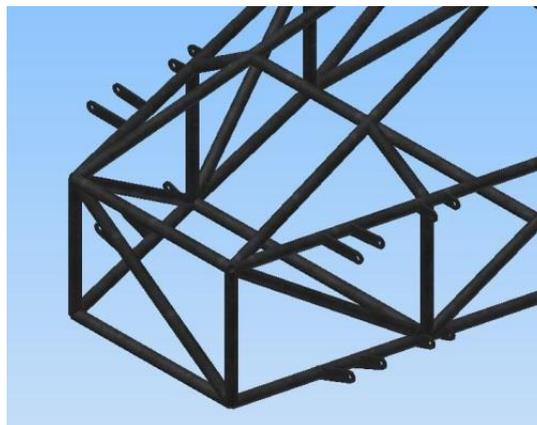


Figura 3.77. Ensamblaje de los anclajes con el chasis.

### 3. Diseño del sistema de suspensión

#### 3.3.5.6. Ensamblaje del sistema de suspensión con el chasis.

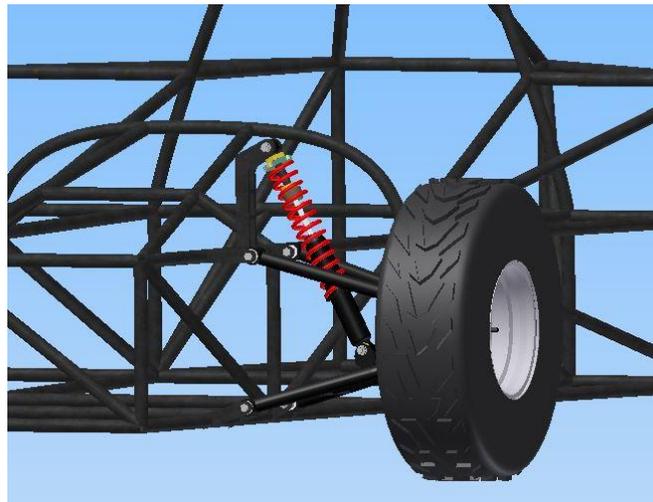


Figura 3.78. El sistema de suspensión ensamblado con el chasis.

#### 3.3.6. Resultado del sistema de suspensión delantero acoplado al chasis.

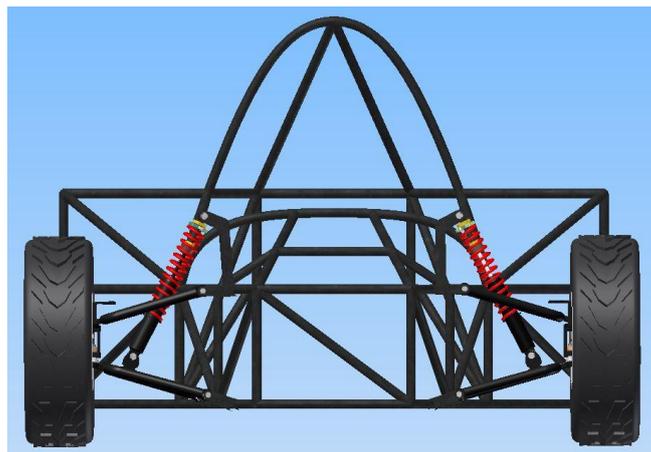


Figura 3.79. Alzado del ensamblaje completo.

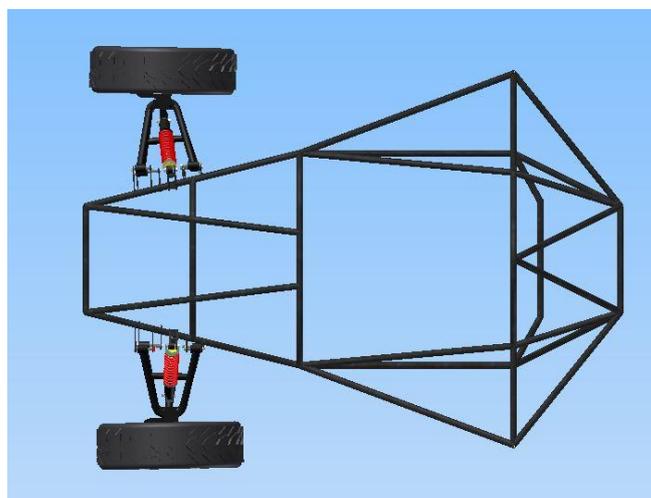


Figura 3.80. Planta del ensamblaje completo.

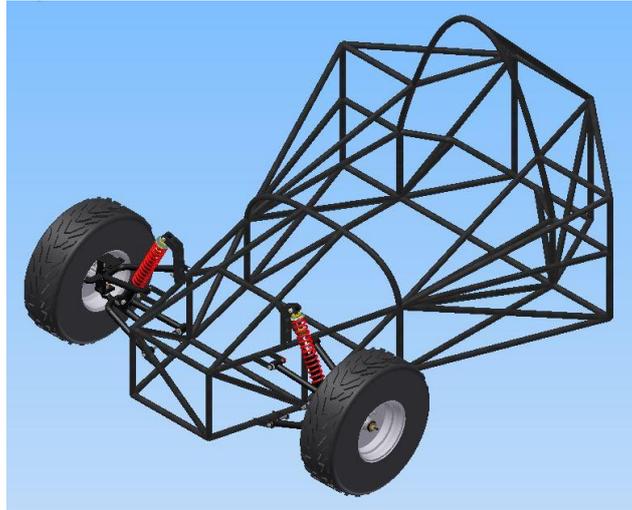


Figura 3.81. Vista en isométrico del ensamblaje completo.

### **3.4. ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS.**

En este apartado se va a desarrollar el análisis de tensión de uno de los elementos diseñados mediante el entorno de “Análisis de tensión” del software Autodesk Inventor, el cual se fundamenta en el “Método de Elementos Finitos”.

#### 3.4.1. Introducción a los elementos finitos.

El “Método de Elementos Finitos” —“Finite Element Method”— es una técnica numérica que se aproxima a una solución de un sistema de ecuaciones diferenciales relacionadas con un problema de carácter físico o ingenieril. Este método requiere que el problema se encuentre definido en un espacio geométrico o dominio, para ser subdividido en un número finito de regiones pequeñas, las cuales son únicas y no necesariamente ortogonales, formando una especie de red o malla —“mesh”— [84].

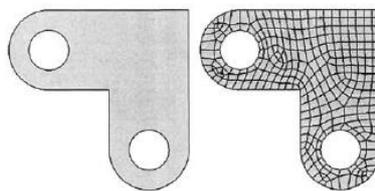
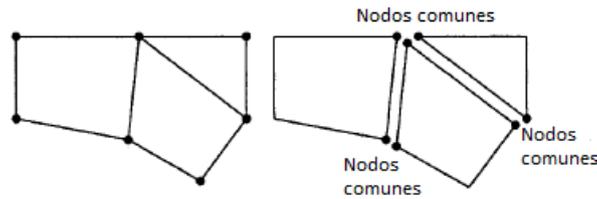


Figura 3.82. Mallado por el “Método de Elementos Finitos”.

Las variables desconocidas —velocidad, temperatura, etc.— son aproximadas sobre cada elemento finito mediante el uso de funciones lineales o polinomios de un orden alto, el cual depende de la localización de los puntos geométricos o vértices, que definen la forma del elemento finito, conocidos como “nodos” [84].

### 3. Diseño del sistema de suspensión



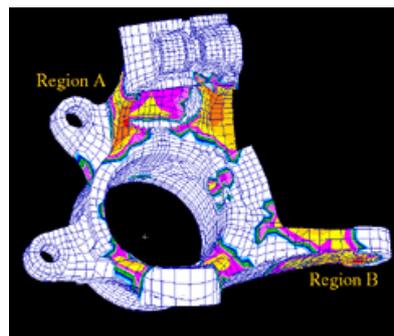
**Figura 3.83. Nodos que definen el elemento.**<sup>29</sup>

Las ecuaciones principales de este método son integradas para cada uno de los elementos que componen la malla cuya solución se suma alrededor de todo el dominio mediante métodos algebraicos. Como consecuencia de estas operaciones, se obtiene un conjunto de ecuaciones lineales finitas, que están en función de un conjunto de parámetros desconocidos para cada elemento [84].

Se trata de un método que se aplica fácilmente y comúnmente a una enorme cantidad de problemas físicos y matemáticos. Actualmente, existen muchos software que operan con este método. Estos realizan todas las operaciones matemáticas y el análisis de los modelos en cuestión de minutos o segundos. Son software que cada vez ofrecen análisis más completos, precisos y rápidos.

Se aplica en la industria aeroespacial, manufacturera o automotriz entre otros, para modelar y analizar diferentes tipos de carga sin haber construido el componente, con el fin de ahorrar tiempo y dinero realizando pruebas y ensayos.

En la siguiente figura, se observa la mangueta de un vehículo sometida a un análisis mediante el cálculo de elementos finitos. Para este trabajo, se pospondrá el análisis de la mangueta diseñada para futuras investigaciones.



**Figura 3.84. Mangueta.**

<sup>29</sup> <http://es.scribd.com/doc/103323502/The-Finite-Element-Method-in-Engineering-Using-Ansys-Copy>

### 3. Diseño del sistema de suspensión

#### 3.4.2. Análisis de tensión.

##### 3.4.2.1. Punto de partida.

El elemento que sirve como punto de partida, para ejemplificar el “Método de Elementos Finitos” en este trabajo, es el **muelle helicoidal** de la figura 3.85, siendo sometido a un análisis de tensión. Su elección se debe a que es un elemento fundamental en el sistema de suspensión y, el encargado de absorber el impacto del monoplaza ante posibles desigualdades del terreno.

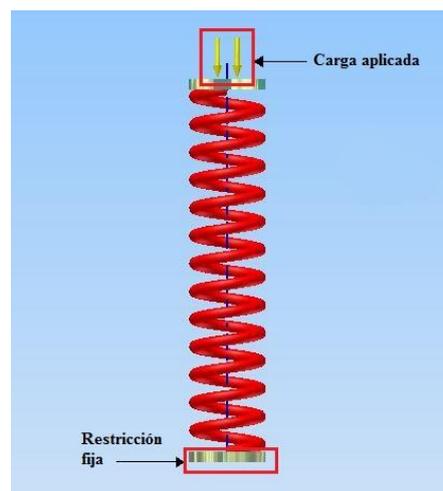


Figura 3.85. Punto de partida del análisis de tensión.

##### 3.4.2.2. Análisis estático.

Dentro del entorno de “Análisis de tensión” del software Autodesk Inventor, se pueden encontrar dos tipos de análisis: estático y modal. En este trabajo, se va a realizar el **análisis estático** para comprobar que el muelle helicoidal soporta las cargas a las que es sometido.

Para el cálculo de este análisis, se debe conocer la masa suspendida del monoplaza, la cual se tiene en cuenta en los ensayos de distintos componentes del vehículo realizados por otros miembros del equipo.

Para ello, se desglosa el peso total de 200 kg, quedando distribuido de la siguiente manera:

Peso del piloto	75 kg.
Peso del chasis	47 kg.
Peso de las dos baterías	70 kg.
Peso de la telemetría + la carrocería + otro elementos	8 kg.
<b>Peso total:</b>	<b>200 kg.</b>

Tabla 3.2. Peso total del monoplaza.

### 3. Diseño del sistema de suspensión

---

Por lo tanto, la masa del monoplaza en reposo corresponde a 2000 N.

Una vez se conoce esta masa, se desarrollan dos casos de análisis de tensión del muelle. Para ello, se sigue una serie de pasos en el proceso de simulación:

1. Buscar el material, que se desea aplicar al muelle, en la tabla existente del entorno de “Análisis de tensión”.
2. Asignar el material seleccionando muelle. En este caso, al tratarse de un material específico para muelles que no se encuentra en la tabla, se ha creado uno nuevo con un límite de elasticidad de 1150 MPa y un límite de máxima rotura entre 1350-1600 MPa. Estos valores se toman de los valores de resistencia mecánica correspondientes a un acero especial para resortes —norma UNE F1442—.
3. Acto seguido, se debe elegir la opción de simulación del muelle para el cálculo del coeficiente de seguridad: respecto al *límite de elasticidad* o respecto a la *resistencia máxima a tracción*.
4. Una vez asignado el material, se aplican las restricciones y las cargas en el lugar deseado. Para este análisis de tensión, al tratarse de un muelle que soporta fuerzas a compresión y a tracción, se aplica una restricción fija en su base y una carga en el extremo opuesto, simulando la posición en el monoplaza —junto al amortiguador—.
5. La carga a aplicar dependerá del análisis que se realice en los dos casos que se describen a continuación, para posteriormente realizar la simulación.

En el primer caso se va a suponer una **marcha normal en línea recta** del monoplaza —sin que afecten las desigualdades del terreno—, asumiendo que la masa se reparte entre las cuatro ruedas equitativamente —aplicando al muelle una carga de 500 N—, y en el segundo caso se va a suponer el análisis de tensión en **condición de frenada**, es decir, asumiendo que se va a transferir el 80% de la masa total al eje delantero del monoplaza —1600 N, perteneciendo una carga de aplicación al muelle de 800 N para este caso—.

### 3. Diseño del sistema de suspensión

#### 3.4.2.3. Resultados obtenidos.

- Caso 1: Marcha normal en línea recta

Aplicando la carga distribuida de 500 N en el muelle, y habiéndole proporcionado al material un límite de elasticidad de 1150 MPa y un valor de resistencia máxima a tracción de 1475 MPa, se obtiene un valor máximo para la tensión de Von Mises de **361.5 MPa** y un desplazamiento máximo de **18.78 mm**.

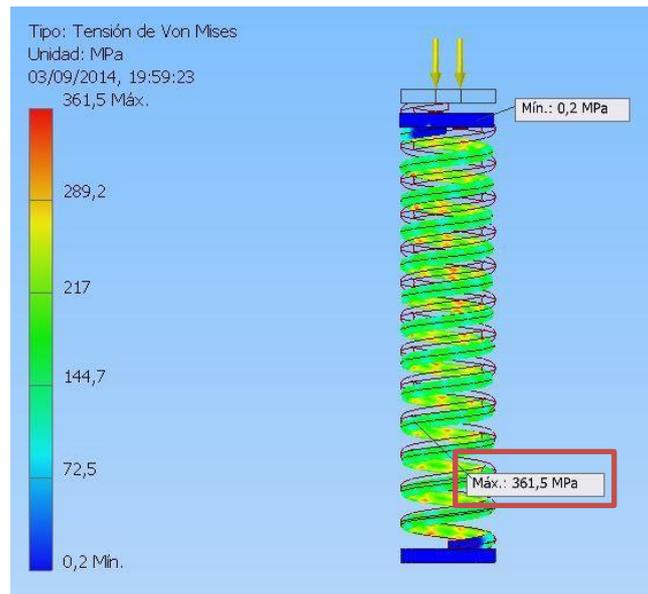


Figura 3.86. Tensión de Von Mises del muelle en marcha normal.

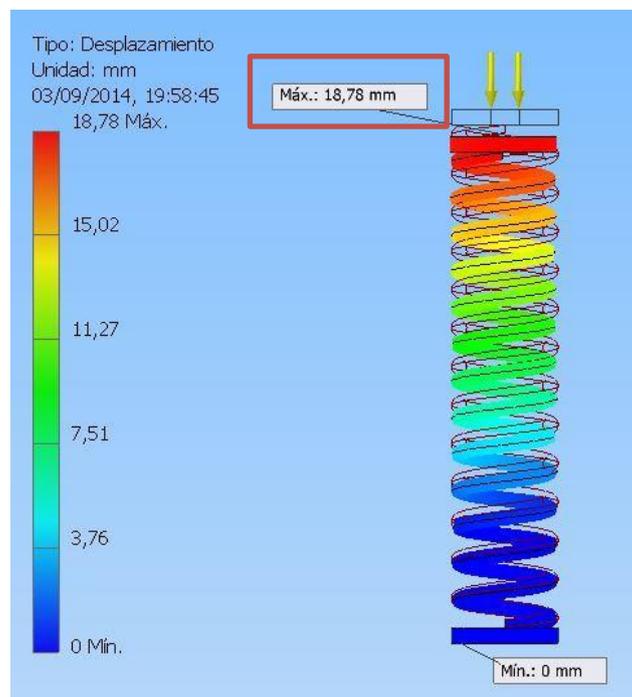


Figura 3.87. Desplazamiento del muelle en marcha normal.

- Caso 2: Condición de frenada

Aplicando la carga distribuida de 800 N en el muelle, y habiéndole proporcionado al material un límite de elasticidad de 1150 MPa y un valor de resistencia máxima a tracción de 1475 MPa, se obtiene un valor máximo de tensión de Von Mises de **578.4 MPa** y un desplazamiento máximo de **30.05 mm**.

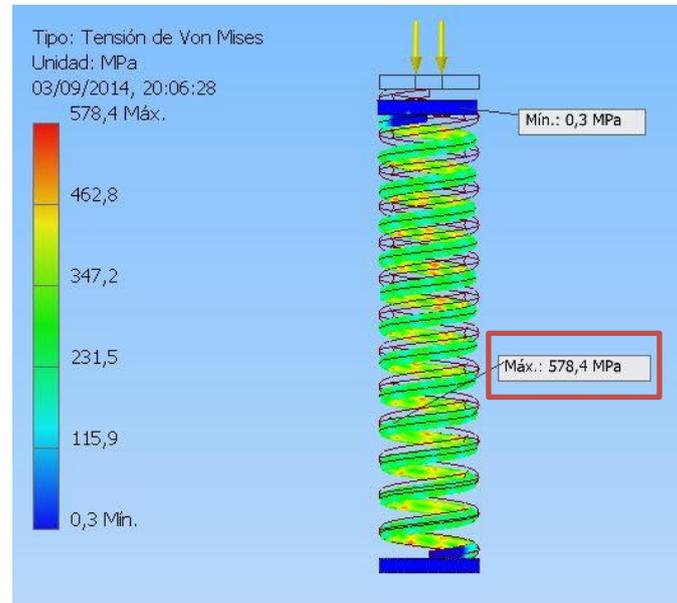


Figura 3.88. Tensión de Von Mises del muelle en condición de frenada.

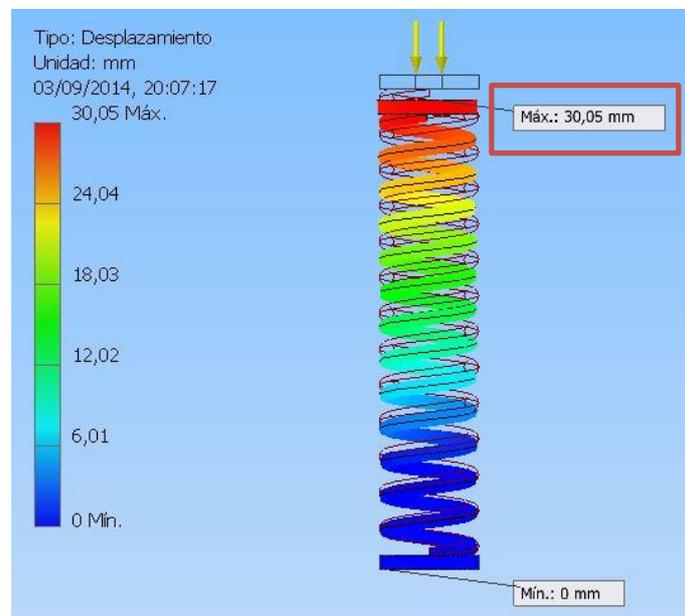


Figura 3.89. Desplazamiento del muelle en condición de frenada.

### 3. Diseño del sistema de suspensión

---

#### 3.4.2.4. Interpretación de los resultados.

La simulación se puede realizar calculando el coeficiente de seguridad para la condición de diseño, considerando el límite de fluencia del material, o para la condición de rotura, considerando la resistencia máxima a rotura en el ensayo a tracción del material.

Los resultados obtenidos en la simulación serán válidos, si el coeficiente de seguridad es superior a la unidad. Para comprobar que los resultados son válidos respecto al límite de elasticidad y la resistencia máxima a tracción, se hace lo siguiente:

$$\text{Factor de seguridad a diseño} = \frac{\text{valor real de elasticidad del material}}{\text{resultado de elasticidad}}$$

$$\text{Factor de seguridad a rotura} = \frac{\text{valor real de rotura del material}}{\text{resultado de rotura}}$$

- Para calcular el factor de seguridad del análisis del muelle **en marcha normal**, con una tensión máxima de Von Mises de 361.5 MPa, se aplica lo siguiente:

Respecto al valor real de elasticidad del material:

$$\text{Factor de seguridad a diseño} = \frac{1150 \text{ MPa}}{361.5 \text{ MPa}} = \mathbf{3.18}$$

Respecto al valor real de rotura del material:

$$\text{Factor de seguridad a rotura} = \frac{1475 \text{ MPa}}{361.5 \text{ MPa}} = \mathbf{4.08}$$

- En el caso del análisis estático del muelle **en condición de frenada**, donde se alcanza una tensión máxima de Von Mises de 578.4 MPa, se obtiene:

Respecto al valor real de elasticidad del material:

$$\text{Factor de seguridad a diseño} = \frac{1150 \text{ MPa}}{578.4 \text{ MPa}} = \mathbf{1.98}$$

Respecto al valor real de rotura del material:

$$\text{Factor de seguridad a rotura} = \frac{1475 \text{ MPa}}{578.4 \text{ MPa}} = \mathbf{2.55}$$

Como se observa para ambos casos, el coeficiente de seguridad a rotura obtenido es notablemente superior a la unidad, por lo que se puede concluir que el diseño del muelle del sistema de suspensión es adecuado; además en ninguno de los casos simulados el muelle llegaría a sufrir deformación permanente, por lo que se comportaría como un material elástico perfecto, lo cual favorece de cara a la resistencia a la fatiga.

## 4. Conclusiones y trabajos futuros

---



### **4.1. CONCLUSIONES.**

El sistema de suspensión está muy desarrollado en cualquier tipo de vehículo y por ello ha resultado sencillo encontrar documentación para afrontar este trabajo.

Durante su desarrollo, se han encontrado diferentes tipos de restricciones que se solventaron de la mejor manera posible para lograr el objetivo. En el ecuador del proyecto, surgió una restricción temporal debido a que se desconocía la evolución del chasis y el diseño final de los distintos componentes del monoplaza por errores en los ensayos, lo que conllevó a un retraso del diseño de las piezas de la suspensión —desconociendo si se adquirirían o se fabricarían a partir del diseño obtenido con este trabajo—. Finalmente, por plazos, se decidió adquirir las piezas y adaptar el diseño de los elementos de la suspensión. El resultado final no ha sido el más óptimo y se confirma que es necesario que el diseño del chasis y de la suspensión vaya a la par, para evitar que requerimientos del chasis afecten al diseño del sistema de suspensión y viceversa.

Durante el diseño de las piezas mediante el software Autodesk Inventor, surgió otro inconveniente, al tener que realizar un estudio de la colocación del sistema respecto al chasis. Esto fue debido a que las piezas adquiridas son recambios del sistema de suspensión de un buggy —vehículo que cuenta con una anatomía distinta al Formula Student—. Se hizo entonces una modificación de los trapecios de suspensión acortando la medida real, para poder cumplir la distancia de ancho de vía exigida por la normativa de la competición y la altura respecto al suelo. Esto lleva a la conclusión y a la recomendación de que en futuros diseños del Formula Student se realice la fabricación de los trapecios y el amortiguador del sistema de suspensión dentro del propio proyecto, en lugar de adquirir y adaptar elementos ya existentes. Con esto se ahorraría el diseño y la fabricación de los elementos de adaptación que se han tenido que diseñar en este trabajo, como son los anclajes del amortiguador y los anclajes de los trapecios con el chasis.

Por otro lado, el objetivo de diseñar las piezas que afectan al sistema de suspensión se ha logrado satisfactoriamente, ensamblando cada una de sus partes con la finalidad de adaptarlo al eje delantero del monoplaza Formula Student y a partir de este punto, simular el modelo facilitando la visualización de su colocación real.

En el análisis estático que se ha aplicado al muelle, los resultados han sido favorables, debido a que el coeficiente de seguridad obtenido para los dos casos supuestos es superior a la unidad, llegando a la conclusión de que el material asignado es válido para los esfuerzos a los que se somete en la simulación, dándose, en el caso de marcha normal, un margen mayor para llegar al límite de deformación que en el caso de frenada, evitando en ambos, la deformación permanente en el muelle ante una posible rotura del mismo trabajando a fatiga.

## **4.2. TRABAJOS FUTUROS.**

Partiendo del diseño que se ha realizado en este proyecto, se pueden desarrollar en años posteriores nuevos trabajos que incluyan aspectos de simulación, análisis —tanto estático como dinámico— o la optimización del sistema de suspensión.

Para conseguir mejorar lo presente y poder ser competitivos en las próximas participaciones de la Formula Student con mayor fiabilidad, los temas a tratar podrían ser:

- Mediante el uso del software ANSYS y el módulo dinámico LS-DYNA, simular como se comportarían los elementos del sistema de suspensión delantero del monoplaça —trapecios, mangueta, llanta, etc— cuando este pase por curvas, el piano y por obstáculos del terreno, realizando un estudio de las reacciones que actúan en el movimiento de balanceo.
- Realizar una optimización del diseño de las piezas de este trabajo mediante el software Autodesk Inventor, con la finalidad de obtener la colocación óptima del sistema de suspensión en el chasis —una vez rediseñado el eje trasero del monoplaça—.
- Simular los movimientos del monoplaça, ante cambios bruscos de dirección, aceleraciones y frenadas, para reproducir las pruebas estáticas y dinámicas que comprenden la competición Formula Student.

---

## V. PRESUPUESTO

---



A continuación, se va a escribir el presupuesto utilizado para llevar a cabo el desarrollo del Trabajo Fin de Grado.

- **Presupuesto detallado**

- Coste del material del sistema de suspensión.

En este punto se detalla el coste de las piezas que se han comprado y se han tenido en cuenta para realizar el diseño del sistema de suspensión delantero.

Código	Piezas	Cantidad	Importe	Total
F3-7-260	Trapezio delantero superior 260-1	2	40.90 €	81.80 €
F3-9-260	Trapezio delantero inferior 260-1	2	46.41 €	92.82 €
-	Casquillo trapezio	8	3.78 €	30.24 €
F3-13-260	Mangueta dirección izquierda 260	1	51.78 €	51.78 €
F3-1-260	Mangueta dirección derecha 260	1	51.78 €	51.78 €
F3-22-260	Buje rueda delantera	2	49.14 €	98.28 €
-	Rodamientos de buje	4	22.75 €	91.00 €
-	Casquillo interior buje delantero	2	5.28 €	10.56 €
F4-8-260	Espárragos ruedas juego de 4	2	5.00 €	10.00 €
F4-6-260	Amortiguador delantero 260-1	2	62.79 €	125.58 €
F3-28-260	Llantas delanteras 10”	2	43.68 €	87.36 €
F3-19-260	Cubierta mixta 21/7-10	2	52.00 €	104.00 €
F3-25-260	Disco de freno delantero 130 mm	2	21.60 €	43.20 €
-	Portes	2	38.00 €	76.00 €
			<b>Total: 954.40 €</b>	

**Tabla V.1. Coste del material del sistema de suspensión.**

- Coste del material informático y formación.

El coste del material informático incluye el hardware y el software utilizado en el desarrollo del trabajo.

Concepto	Coste
Ordenador portátil Lenovo Z500	799.00 €
Sistema operativo Windows 8	-
Autodesk Inventor Professional 2011 <sup>30</sup>	-
Formación del curso en ANSYS <sup>31</sup>	500 €
<b>Total: 1299.00 €</b>	

**Tabla V.2. Coste del material informático y formación.**

<sup>30</sup> El software Autodesk Inventor no tiene coste debido a que se ha trabajado con la versión educacional gratuita soportada por la “Education Community de Autodesk”.

<sup>31</sup> El coste total del curso de formación en ANSYS es de 3500 €/7 personas.

➤ Costes adicionales.

Los costes añadidos a la realización del trabajo incluyen los costes del material para el aprendizaje y la impresión y encuadernación de la memoria final.

Concepto	Coste
Impresión de la memoria final	121.18 €
Encuadernación de la memoria final	36 €
Libro “ <i>Car Suspension and Handling</i> ”	61.42 €
<b>Total: 218.60 €</b>	

Tabla V.3. Costes adicionales del proyecto.

• **Presupuesto total del trabajo**

El presupuesto total al que asciende el trabajo, incluyendo los desgloses de los costes anteriormente citados, son los siguientes:

Concepto	Coste
Coste del material del sistema de suspensión	<b>954.40 €</b>
Coste del material informático y formación	<b>1299.00 €</b>
Costes adicionales	<b>218.60 €</b>
<b>Total:</b>	
<b>2472.00 €</b>	

Tabla V.4. Presupuesto total.

El presupuesto final asciende a dos mil cuatrocientos setenta y dos euros (2472.00 €).

## VI. BIBLIOGRAFÍA

---



### **Referencias bibliográficas**

- [1] Bastow, D., Howard, G., Whitehead, J.P. (2004), *Car Suspension and Handling*, Society of Automotive Engineers, Inc., 4th ed., pp. 13-15, 98, 158-160.
- [2] Arias-Paz, M. (2006), *Manual de Automóviles*, Cie Inversiones Editoriales Dossat 2000 S.L., 56ª ed., 1ª reimpresión, mayo 2008, pp. 810-813, 818-820, 866, 875, 937-939.
- [3] Font, J. y Dols, J.F. (2004), *Tratado sobre automóviles: tecnología del automóvil*, Universidad Politécnica Valencia, vol. 2, pp. 553-555.
- [4] Ariza, P. y Sáez, A. (1999), *Método de los elementos finitos. Introducción a ANSYS*, Universidad de Sevilla, Secretariado de Publicaciones, 1ª ed., pp. 1-10.
- [5] MESA, D. (2011), *Simulación virtual de una suspensión McPherson en entorno VRML*. Proyecto Final de Carrera. Madrid. Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid.
- [6] PILLAJO, G.P. (2012), *Estudio cinemático del comportamiento de la suspensión de un prototipo de Formula SAE Student Eléctrico del equipo UPM Racing*. Proyecto Final de Máster. Madrid. Instituto de Investigación del Automóvil, Universidad Politécnica de Madrid.
- [7] VILLAR, C. (2006), *Diseño conceptual y dinámica vehicular de un Formula SAE*. Proyecto Final de Carrera. Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas.
- [8] RIERA, P.F. (2010), *Trucaje y adaptación de un sistema de suspensión y dirección para un vehículo tipo buggy de la Formula Automovilística Universitaria FAU*. Tesis de Grado. Riobamba. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- [9] BELTRÁN, A. y EJARQUE, P. (2009), *Diseño de un vehículo todoterreno*. Proyecto Final de Carrera. Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech. Barcelona.

### **Reglamentación**

- [10] Normativa Formula Student® 2014.
- [11] Normativa Formula Student® Electric 2014.

## **Material docente**

[12] Manual de usuario Autodesk Inventor 2011 proporcionado por el personal docente.

[13] Apuntes del curso intensivo realizado en el INSIA —Instituto Universitario de Investigación del Automóvil— en julio del 2013.

## **Tutoriales**

[14] Tutorial Autodesk Inventor.

[15] Tutorial ANSYS. Universidad de Alberta. Canadá.

## **Videotutoriales**

[16] Videos para el aprendizaje del software Autodesk Inventor 2011 proporcionado por el personal docente.

[17] “Análisis de Suspensiones Automotrices”. *Youtube*.

<<http://www.youtube.com/watch?v=hFVozqi0okg>> [Consulta: 24 de febrero de 2014]

[18] “Como diseñar una llanta de automóvil how to design a car tire”. *Youtube*.

<<http://www.youtube.com/watch?v=ABD6z9Uitiw>> [Consulta: 12 de marzo de 2014]

[19] “Suspension (Video Tutorial) Autodesk Inventor”. *Youtube*.

<<http://www.youtube.com/watch?v=LKqllf30mMY>> [Consulta: 12 de marzo de 2014]

[20] “Neumático en Autodesk Inventor 2014”. *Youtube*.

<<http://www.youtube.com/watch?v=QwH2nW0ocx4>> [Consulta: 12 de marzo de 2014]

[21] “Entendiendo los conceptos de la alineación de ruedas”. *Youtube*.

<<http://www.youtube.com/watch?v=AquGhgO1Bbk>> [Consulta: 20 de marzo de 2014]

[22] “Modeling a Formula SAE Suspension Spring”. *Youtube*.

<[http://www.youtube.com/watch?v=IC\\_PxRXBpiY](http://www.youtube.com/watch?v=IC_PxRXBpiY)> [Consulta: 20 de marzo de 2014]

[23] “Autodesk Inventor 2013 – tutorial – PLANOS!\_011”. *Youtube*.

<<http://www.youtube.com/watch?v=iDqsFttA43g>> [Consulta: 19 de agosto de 2014]

[24] “Como crear una Animacion en Inventor 2009 1ra Parte”. *Youtube*.

<<http://www.youtube.com/watch?v=27k-65E-tjA>> [Consulta: 20 de agosto de 2014]

[25] “Como crear una Animacion en Inventor 2009 2da Parte”. *Youtube*.

<<http://www.youtube.com/watch?v=RqeaplPbhd8>> [Consulta: 20 de agosto de 2014]

### Páginas web consultadas

- [26] ALBERDI, J., *Amortiguadores y suspensión*.  
<[http://www.tecnun.es/automocion/files/ebooks/Amortiguadores\\_y\\_suspension.pdf](http://www.tecnun.es/automocion/files/ebooks/Amortiguadores_y_suspension.pdf)>  
[Consulta: 25 de septiembre de 2013]
- [27] <<http://www.mtamotorsport.eu/competicion-evolucion-suspensiones.html>> [Consulta: 25 de septiembre de 2013]
- [28] “BILSTEIN Suspensión / Suspension :: Amortiguadores / Shock Absorbers :: TAEVision Web 3D”. *Youtube*.  
<<http://www.youtube.com/watch?v=aOvuy9jvUeI>> [Consulta: 25 de septiembre de 2013]
- [29] CRÓNICASF1. *Suspensiones en la F1*.  
<<http://www.cronicasf1.com/Contenido/Tecnica/Las%20Suspensiones%20en%20la%20f1/Las%20suspensiones%20en%20la%20f1.htm>> [Consulta: 25 de septiembre de 2013]
- [30] AUTODESK.  
<<http://www.autodesk.es/>> [Consulta: 22 de septiembre de 2013]
- [31] *Car Suspension Bible*.  
<<http://stuff.johnnymultimedia.com/SubaruManuals/Bonus%20Material/Car%20Suspension%20Bible/Car%20Suspension%20Bible.pdf>> [Consulta: 31 de octubre de 2013]
- [32] CRAIG, K. *Automotive Suspension Systems*.  
<[http://multimechatronics.com/images/uploads/mech\\_n/Automotive\\_Suspension\\_Systems.pdf](http://multimechatronics.com/images/uploads/mech_n/Automotive_Suspension_Systems.pdf)> [Consulta: 31 de octubre de 2013]
- [33] HUGHES, C. *Understanding Suspension*.  
<<http://www.craigsgminis.com/cmnew/ebooks/suspensionGK.pdf>> [Consulta: 31 de octubre de 2013]
- [34] ROBERT Q. RILEY ENTERPRISES, LLC. *Automobile Ride, Handling, and Suspension Design*.  
<<http://www.rqriley.com/suspensn.htm>> [Consulta: 31 de octubre de 2013]
- [35] THE UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN.  
<[http://www.me.utexas.edu/~longoria/VSDC/notes/11\\_Suspension\\_Concepts.pdf](http://www.me.utexas.edu/~longoria/VSDC/notes/11_Suspension_Concepts.pdf)> [Consulta: 31 de octubre de 2013]
- [36] AUTOSPORT.  
<<http://www.autosport.com>> [Consulta: 25 de febrero de 2014]

## VI. Bibliografía

---

- [37] UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID. *Repositorio Institucional de la Universidad Carlos III*.  
<<http://e-archivo.uc3m.es>> [Consulta: 25 de febrero de 2014]
- [38] SANTA FE COLLEGE. *Toyota. Suspension, Steering and Handling*.  
<<http://dept.sfcollge.edu/InTech/AUTO/content/courses/AER1498%20materials/toyota%20uspension%20basics.pdf>> [Consulta: 25 de febrero de 2014]
- [39] FORMULA STUDENT SPAIN.  
<<http://www.formulastudent.es/>> [Consulta: 23 de marzo de 2014]
- [40] FORMULA STUDENT SPAIN. *Preliminary Handbook 2013*.  
<[http://www.formulastudent.es/sites/default/files/pictures/images/FSS%202013%20Preliminary%20HNBK%20July\\_Imp..pdf](http://www.formulastudent.es/sites/default/files/pictures/images/FSS%202013%20Preliminary%20HNBK%20July_Imp..pdf)> [Consulta: 23 de marzo de 2014]
- [41] URT-UTP RACING TEAM. (2011). *Estudio de neumáticos utilizados para el SAE*.  
<<http://urfsae.blogspot.com.es/>> [Consulta: 27 de marzo de 2014]
- [42] FUEL WASTERS. *Formula SAE: Suspensiones (vol.1)*.  
<<http://www.fuelwasters.com/2011/02/formula-sae-suspensiones-vol1.html>> [Consulta: 27 de marzo de 2014]
- [43] TIRE RACK. *Alineación*.  
<<http://www.tirerack.com/tires/tiretech/techpage.jsp?techid=4&ln=sp>> [Consulta: 27 de marzo de 2014]
- [44] WIKIPEDIA. *Método de los elementos finitos*.  
<[http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo\\_de\\_los\\_elementos\\_finitos](http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos)> [Consulta: 06 de mayo de 2014]
- [45] SAE INTERNATIONAL. *Formula SAE® Series*.  
<<http://students.sae.org/competitions/formulaseries/>> [Consulta: 08 de mayo de 2014]
- [46] FORMULA SAE. *Downloads for Competition*.  
<<http://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=5ade9b01-8903-4ae1-89e1-489a8a4f08d9>>  
[Consulta: 08 de mayo de 2014]
- [47] FORMULA STUDENT GERMANY. *Workshops*.  
<<https://www.formulastudent.de/academy/workshops/20131102-beg-abstatt/>> [Consulta: 08 de mayo de 2014]
- [48] MOTORGIGA. *Mangueta-Definición-Significado*.  
<<http://diccionario.motorgiga.com/diccionario/mangueta-definicion-significado/gmx-niv15-con194731.htm>> [Consulta: 07 de agosto de 2014]

## VI. Bibliografía

---

- [49] HIPERTIENDAS. *Sistema de suspensión, dirección y frenado*.  
<<http://www.hipertiendas.com/es/8-sistema-de-suspension-direccion-y-frenado>> [Consulta: 07 de agosto de 2014]
- [50] TELLAETXE, J. (2012). *Precaución, amigo conductor...*  
<<http://diariomotor.com/blogs/f1/2012/08/12/precaucion-amigo-conductor/>> [Consulta: 07 de agosto de 2014]
- [51] Bruzos, T. *Suspensión del automóvil*.  
<<http://www.sabelotodo.org/automovil/suspension.html>> [Consulta: 08 de agosto de 2014]
- [52] *Sistema de suspensión*.  
<<http://es.scribd.com/doc/6588309/Sistema-de-Suspension>> [Consulta: 08 de agosto de 2014]
- [53] BBSPORT. *Barras estabilizadoras*.  
<<http://www.bbsport.es/Shop/es/suspensiones-series-5-e60-e61-04-09/14725-kit-barras-estabilizadoras-eibach-bmw-5-e60.html>> [Consulta: 08 de agosto de 2014]
- [54] AFICIONADOS A LA MECÁNICA. *Suspensiones regulables o pilotadas*.  
<<http://www.aficionadosalamecanica.net/suspension8.htm>> [Consulta: 08 de agosto de 2014]
- [55] PROYECTO ALICANTO.  
<[http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Titulaci%C3%B3n\\_1](http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Titulaci%C3%B3n_1)> [Consulta: 08 de agosto de 2014]
- [56] WALKER, G. (1997). *An Introduction to Active Suspension Systems*.  
<<http://jeroitim.blogspot.com.es/2012/06/suspensiones-vehiculos-parte-iii.html>> [Consulta: 08 de agosto de 2014]
- [57] <[http://www-control.eng.cam.ac.uk/gww/what\\_is\\_active.html](http://www-control.eng.cam.ac.uk/gww/what_is_active.html)> [Consulta: 08 de agosto de 2014]
- [58] AFICIONADOS A LA MECÁNICA. *Modelos de suspensión mecánica*.  
<<http://www.aficionadosalamecanica.net/suspension3.htm>> [Consulta: 08 de agosto de 2014]
- [59] SAM, Y.M. (2006). *Robust control of active suspension system for a quarter car model*.  
<<http://eprints.utm.my/2950/1/74283.pdf>> [Consulta: 09 de agosto de 2014]
- [60] ULDANE, M. *Los viejos amortiguadores*.  
<<http://archivodeautos.blogspot.com.es/2013/10/los-viejos-amortiguadores.html>> [Consulta: 09 de agosto de 2014]
- [61] HISPANIA TÉCNICA. *Suspensión: conjuntos muelle-amortiguador*.  
<<http://www.hispaniatecnica.com/tecnica/item/36-suspension-conjuntos-muelle-amortiguador>> [Consulta: 09 de agosto de 2014]

## VI. Bibliografía

---

- [62] RTS, S.A. *Suspensión*.  
<<http://www.rts-sa.net/antcatalogo.asp?nombre=2286&hoja=0&sesion=1>> [Consulta: 11 de agosto de 2014]
- [63] UNIVERSITY OF ALBERTA. *ANSYS Tutorials*.  
<<http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys/>> [Consulta: 11 de agosto de 2014]
- [64] PROINGETEC. *Neumáticos/Llantas/Separadores*.  
<<http://www.proingetec.com/services/4>> [Consulta: 11 de agosto de 2014]
- [65] SPEED DIRECT. *Dealing with Body Roll*.  
<<http://www.speeddirect.com/index.php/tech-info/suspension-handling-information/844-2>>  
[Consulta: 11 de agosto de 2014]
- [66] AUTODESK INVENTOR. *Aprendizaje de Inventor*.  
<[http://wikihelp.autodesk.com/Inventor/esp/2013/Help/1309-Autodesk1309/1993-Manual\\_d1993](http://wikihelp.autodesk.com/Inventor/esp/2013/Help/1309-Autodesk1309/1993-Manual_d1993)> [Consulta: 11 de agosto de 2014]
- [67] <<http://toplowridersites.com/kingpin-inclination-angle/>> [Consulta: 12 de agosto de 2014]
- [68] AUTOCENTRO DEL AUTOMÓVIL. *La importancia del Alineado*.  
<<http://www.autocentrodelaautomovil.es/2012/12/la-importancia-del-alineado.html>>  
[Consulta: 12 de agosto de 2014]
- [69] AFICIONADOS A LA MECÁNICA. *Sistema de dirección*.  
<<http://www.aficionadosalamecanica.com/direccion-geometria.htm>> [Consulta: 12 de agosto de 2014]
- [70] LANCER TUNERS (2010). *Wheel alignment explained...*  
<<http://www.lancertuners.com/mitsubishi-lancer/showthread.php?t=8460>> [Consulta: 12 de agosto de 2014]
- [71] TRUCK CENTER.  
<<http://www.truckcenter.com.br/AlinhamentodeDirecao>> [Consulta: 12 de agosto de 2014]
- [72] GARCÍA, C. *Geometría de la suspensión: vista lateral*.  
<<http://www.zonagravedad.com/modules.php?name=News&file=article&sid=761>>  
[Consulta: 12 de agosto de 2014]
- [73] VARBANOV, K. (2012). *F1 Aero Glossary*.  
<<http://f1framework.blogspot.com.es/2012/08/f1-aero-glossary.html>> [Consulta: 13 de agosto de 2014]
- [74] WIKIPEDIA, *Formula Student*.

<[http://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula\\_Student](http://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula_Student)> [Consulta: 13 de agosto de 2014]

[75] TALLERES MAESTRUM.

<<http://www.talleresmm.com/faq-conozca-sus-neumaticos.php>> [Consulta: 13 de agosto de 2014]

[76] PNEUS ONLINE SUISSE.

<<http://www.neumaticos-pneus-online.es/indices-de-carga-y-velocidad-consejos.html>>  
[Consulta: 13 de agosto de 2014]

[77] VAN BERKUM, A. *Chassis and suspension design FSRTE02*.

<<http://alexandria.tue.nl/repository/books/627108.pdf>> [Consulta: 23 de agosto de 2014]

[78] ZF FRIEDRICHSHAFEN AG, *Suspension Technology for Passenger Cars*.

<[http://www.zf.com/media/media/en/document/corporate\\_2/downloads\\_1/flyer\\_and\\_brochures/cars\\_flyer/dmpfungsmodulefrpkw.pdf](http://www.zf.com/media/media/en/document/corporate_2/downloads_1/flyer_and_brochures/cars_flyer/dmpfungsmodulefrpkw.pdf)> [Consulta: 23 de agosto de 2014]

[79] *Suspension systems and components*.

<[http://web.iitd.ac.in/~achawla/public\\_html/736/15-Suspension\\_systems\\_and\\_components\\_v2.pdf](http://web.iitd.ac.in/~achawla/public_html/736/15-Suspension_systems_and_components_v2.pdf)> [Consulta: 23 de agosto de 2014]

[80] ULTRA RACING. *How it works*.

<<http://www.ultraracing.my/home/knowledge-base/how-it-works/>> [Consulta: 24 de agosto de 2014]

[81] CAR, E. (2012). *Ferrari desempolva las suspensiones pull-rod delanteras*.

<[http://eduardojosecar.blogspot.com.es/2012\\_02\\_01\\_archive.html](http://eduardojosecar.blogspot.com.es/2012_02_01_archive.html)> [Consulta: 28 de agosto de 2014]

[82] UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. *El mundo de los neumáticos*.

<[http://www.eis.uva.es/~macromol/curso03-04/automovil/paginas/El\\_neumatico.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso03-04/automovil/paginas/El_neumatico.htm)>  
Consulta: 28 de agosto de 2014]

[83] THE UNIVERSITY OF ARIZONA. *The Finite Element Method and applications in engineering using Ansys*.

<<http://es.scribd.com/doc/103323502/The-Finite-Element-Method-in-Engineering-Using-Ansys-Copy>> [Consulta: 05 de septiembre de 2014]

[84] GONZÁLEZ, E. (2003). *Determinación del factor de concentración de esfuerzos en una plaza con múltiples concentradores de esfuerzo mediante Algor*.

<[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/gonzalez\\_d\\_e/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/gonzalez_d_e/capitulo3.pdf)>  
[Consulta: 05 de septiembre de 2014]



## **ANEXO I. PLANOS**



## ANEXO II. PLIEGO DE CONDICIONES

Las características de las piezas y sus dimensiones se han definido entre el capítulo 3 y el anexo anterior en el que se definen los planos.

<b>Pieza diseñada</b>					
<b>Tipo</b>	<b>Nº de piezas</b>	<b>Dimensiones (mm)</b>	<b>Material</b>	<b>Referencia</b>	<b>Plano</b>
Llanta	2	10"	Aluminio	F3-28-260	Hoja 1 del ANEXO I. PLANOS.
Buje	2	Ver plano.	Acero	F3-22-260	Hoja 2 del ANEXO I. PLANOS.
Mangueta dirección izquierda	1	Ver plano.	Acero	F3-13-260	Hoja 3 del ANEXO I. PLANOS.
Mangueta dirección derecha	1	Simétrica a mangueta izq.	Acero	F3-1-260	-
Trapezio superior	2	Ver plano.	Acero	F3-7-260	Hoja 4 del ANEXO I. PLANOS.
Trapezio inferior	2	Ver plano.	Acero	F3-9-260	Hoja 5 del ANEXO I. PLANOS.
Disco de freno	2	D = 130 mm	Acero	F3-25-260	Hoja 9 del ANEXO I. PLANOS.
Cubierta mixta AT 21/7-10 Marca: DURO	2	175/80-R10	Caucho	F3-19-260	Hoja 10 del ANEXO I. PLANOS.
Amortiguador	2	Ver plano.	Acero	F4-6-260	Hoja 15 del ANEXO I. PLANOS.

**Tabla ANEXO II. Características y dimensiones de los elementos de suspensión.**



## **ANEXO III. NORMATIVA FORMULA STUDENT.**

En este anexo se detallan las reglas de la normativa Formula Student® 2014 que se han mencionado en el capítulo 3 y se deben tener en cuenta para el diseño del sistema de suspensión, adjuntándose a continuación.



---

## VII. CONTENIDO DEL CD-ROM

---

En el CD-ROM adjunto al Trabajo Fin de Grado se encuentra el material utilizado para el desarrollo del mismo. Se han incluido los archivos de diseño de las piezas, los planos, los resultados del análisis estático del muelle helicoidal, la memoria en formato digital, el anteproyecto y los documentos que se adjuntan como anexo al pliego de condiciones.

Para facilitar la búsqueda de cada elemento añadido al CD-ROM, se ha distribuido en carpetas con nombre “Análisis estático”, “Archivos de Autodesk Inventor 2011”, “Documentación” y “Planos”.

Cada una de estas carpetas incluye subcarpetas y documentos, describiendo su desglose a continuación:

- Carpeta “**Análisis estático**”: incluye una carpeta con las imágenes del análisis, y dos carpetas, cada una con el caso correspondiente de análisis estático que se ha estudiado en el trabajo, así como su reproducción en formato .avi. Además se puede encontrar un documento en formato .pdf con las características del acero para muelles.
- Carpeta “**Archivos de Autodesk Inventor 2011**”: incluye la carpeta del proyecto “suspensión delantera” con los archivos de diseño de las piezas del sistema de suspensión en formato .ipt, los ensamblajes en formato .iam y los planos en formato .dwg.
- Carpeta “**Documentación**”: incluye la carpeta “Anteproyecto” —con la notificación de aceptación y el documento en formato .pdf del anteproyecto—, la carpeta “Memoria” con el documento en .pdf de la memoria del trabajo, la carpeta “Pliego de condiciones” —con los documentos en formato .pdf de las características de los rodamientos y las reglas de la normativa Formula Student® 2014— y el documento en formato .pdf de la normativa del Trabajo Fin de Grado.
- Carpeta “**Planos**”: incluye los planos en formato .pdf de las piezas diseñadas del sistema de suspensión.