

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN DE  
UN VEHÍCULO MONOPLAZA PARA LA COMPETENCIA  
FORMULA STUDENT”**

**TESIS DE GRADO PREVIA A  
LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE: INGENIERO MECÁNICO  
AUTOMOTRIZ**

**AUTORES:**

**CHRISTIAN ANDRES CARAGUAY CORREA**

**SANTIAGO JAVIER CARAGUAY CORREA**

**DIRECTOR:**

**ING. JÓNATAN POZO PALACIOS**

**CUENCA, FEBRERO 2015**

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros Christian Andrés Caraguay Correa y Santiago Javier Caraguay Correa, declaramos que el trabajo de grado que presentamos, es de nuestra autoría y basado en el proceso de investigación establecida en la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana.

A través de la presente declaración, cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la Universidad Politécnica Salesiana según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento, y la Normativa Institucional Vigente.

Cuenca, febrero de 2015



Christian Andrés Caraguay Correa



Santiago Javier Caraguay Correa

## CERTIFICADO

Certifico que el presente proyecto de tesis “*Diseño y construcción del sistema de suspensión de un vehículo monoplaza para la competencia Formula Student*”, realizado por los estudiantes: Christian Andrés Caraguay Correa y Santiago Javier Caraguay Correa, fue dirigido por mi persona.

Cuenca, febrero de 2015



Ing. Jonatan Pozo Palacios

## DEDICATORIA

A nuestros padres, Luz María,  
y Ángel Serfio, a nuestro  
hermano Miguel Ángel,  
quienes, a pesar de las  
dificultades, nos apoyaron  
incondicionalmente durante  
nuestra formación para  
cumplir con esta meta.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a Dios, por darnos la fortaleza durante nuestra vida de estudiantes.

A nuestros padres, por su paciencia y sabiduría, por sabernos guiar y apoyarnos en todos los proyectos que nos hemos planteado, en especial durante el desarrollo del presente trabajo.

A quienes formaron parte del equipo *UPS RACING TEAM*, por las alegrías y vivencias compartidas durante el desarrollo del proyecto.

A nuestro director de tesis por compartir sus conocimientos y por su voluntad de guiarnos durante el desarrollo del presente trabajo.

## RESUMEN

En este trabajo de tesis, se presenta la descripción sobre el diseño y construcción del sistema de suspensión de un vehículo monoplaza para la competencia Formula Student.

Inicialmente se realiza la fundamentación teórica para el diseño del sistema de suspensión, con la descripción de la competencia y su reglamento. Además se analizan las características, elementos y componentes a tener en cuenta durante el diseño; sin dejar de lado los parámetros dinámicos que rigen el correcto funcionamiento de una suspensión.

A continuación, en el capítulo II se describe y aplica una metodología de diseño para definir el proceso y los aspectos a seguir durante la elaboración del presente trabajo.

El sistema de suspensión de un monoplaza cumple con diferentes funciones; para ello en el diseño del sistema se establecen: un ancho de vía y distancias entre ejes que permitan mantener la estabilidad en pista, además de una ubicación correcta de los brazos de suspensión para evitar el efecto de anti-hundimiento y anti-levantamiento del vehículo.

Se realiza un análisis de los momentos críticos durante el funcionamiento del monoplaza, y así se definen los parámetros necesarios para la realización de un análisis estructural de los elementos que conforman el sistema de suspensión. En el caso de los balancines, se acude a un análisis por elementos finitos.

El capítulo III, revisa brevemente los procesos de manufactura utilizados para la construcción del sistema de suspensión. Además se describe la construcción, así como el proceso a seguir para realizar el ensamble final de la suspensión. Posteriormente se elabora un compendio de los costos involucrados para la construcción del sistema.

En el capítulo IV se revisan las características finales del sistema de suspensión como su peso y medidas. A continuación se describen las pruebas realizadas para las calibraciones de la suspensión, en conjunto con los demás sistemas del vehículo.

Se especifican cada una de las revisiones técnicas realizadas a la suspensión durante la competencia Formula Student, y además se analiza su comportamiento al finalizar su participación en el evento.

Finalmente se realiza un compendio sobre los cambios y mejoras que se sugieren al sistema de suspensión, producto de la experiencia adquirida durante el proceso de elaboración del presente trabajo, y la participación en la competencia Formula Student, realizada en Silverstone Inglaterra.

# ÍNDICE

<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>xii</b>
<b>Lista de Tablas</b> .....	<b>xvi</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>Fundamentación teórica para el diseño del sistema de suspensión</b> .....	<b>1</b>
1.1    Introducción.....	1
1.2    Descripción de la competencia Formula Student .....	1
1.3    Reglamento Formula Student .....	3
1.3.1    Parte T - Requerimientos técnicos generales .....	3
1.3.2    Requerimientos generales de diseño .....	4
1.3.3    Reglas generales del chasis .....	4
1.4    Sistema de suspensión .....	7
1.4.1    Partes de un sistema de suspensión .....	8
1.4.2    Suspensión independiente .....	14
1.4.3    Tipos de suspensión independiente.....	14
1.4.4    Métodos de accionamiento del muelle.....	15
1.4.5    Elementos que interactúan con el sistema de suspensión .....	16
1.5    Geometría de la suspensión .....	18
1.5.1    Ancho de vía (Track) .....	18
1.5.2    Distancia entre ejes (Wheelbase) .....	18
1.5.3    Centro de gravedad .....	19
1.5.4    Centro instantáneo de rotación (Instant center) .....	19
1.5.5    Centro de Balanceo (Roll Center) .....	20
1.5.6    Momento de Balanceo.....	21
1.5.7    Bote y rebote (bump and droop) .....	21
1.5.8    Geometría Anti-levantamiento y Anti-hundimiento .....	21
1.5.9    Geometría de la Dirección .....	23
1.6    Sumario .....	27
<b>CAPÍTULO II</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>Diseño del sistema de suspensión</b> .....	<b>29</b>
2.1    Introducción.....	29
2.2    Metodología de diseño .....	29
2.2.1    Identificación de la necesidad .....	30

2.2.2	Investigación preliminar.....	30
2.2.3	Planteamiento de objetivos .....	31
2.2.4	Especificaciones de desempeño .....	31
2.2.5	Ideación e innovación .....	31
2.2.6	Análisis.....	31
2.2.7	Selección .....	32
2.2.8	Diseño detallado.....	32
2.2.9	Creación de prototipos y pruebas.....	33
2.2.10	Producción .....	33
2.3	Aplicación de la metodología de diseño.....	34
2.3.1	Identificación de la necesidad .....	34
2.3.2	Investigación preliminar.....	34
2.3.3	Planteamiento de objetivo .....	37
2.3.4	Especificaciones de desempeño .....	37
2.3.5	Ideación e invención .....	39
2.4	Diseño de la geometría de la suspensión.....	52
2.4.1	Diseño de la geometría de la suspensión en vista frontal.....	54
2.4.2	Diseño de la geometría de la suspensión en vista lateral .....	57
2.4.3	Posición de los balancines y amortiguadores.....	61
2.4.4	Balancín.....	63
2.4.5	Ensamble en 3D .....	67
2.5	Análisis de cargas en el sistema de suspensión .....	68
2.5.1	Ubicación del centro de gravedad .....	68
2.5.2	Cálculo antivuelco.....	70
2.5.3	Transferencia de masa lateral.....	72
2.5.4	Transferencia de masa longitudinal .....	73
2.5.5	Aceleración lateral .....	75
2.5.6	Obstáculo .....	75
2.5.7	Distribución de fuerzas en los brazos de suspensión .....	77
2.5.8	Determinación de fuerzas en los brazos de suspensión por medio de SolidWorks.....	78
2.5.9	Cálculo de los brazos de suspensión .....	80
2.5.10	Cálculo de los push rod .....	81

2.5.11	Análisis estructural de los balancines .....	82
2.6	Simulación de movimiento de la suspensión.....	85
2.6.1	Ubicación del centro de balanceo de la suspensión delantera.....	85
2.6.2	Ubicación del centro de balanceo de la suspensión posterior .....	88
2.7	Frecuencias Naturales.....	92
2.7.1	Masa suspendida .....	92
2.7.2	Masa no suspendida .....	92
2.8	Sumario .....	93
<b>CAPÍTULO III.....</b>		<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Construcción y ensamble del sistema de suspensión.....</b>		<b>95</b>
3.1	Introducción.....	95
3.2	Procesos con arranque de viruta .....	95
3.2.1	Mecanizado .....	95
3.2.2	Construcción de bujes de los brazos de suspensión.....	96
3.2.3	Construcción de los pernos de pivote del balancín y anclaje del amortiguador .....	98
3.2.4	Construcción de los brazos de suspensión .....	98
3.2.5	Preparación de plantillas .....	99
3.2.6	Corte de los brazos de suspensión.....	99
3.3	Procesos sin arranque de viruta .....	100
3.3.1	Corte mediante chorro de agua a presión.....	100
3.3.2	Preparación de las placas .....	100
3.4	Procesos de soldadura .....	102
3.4.1	Soldadura MIG.....	102
3.4.2	Soldadura de los brazos de suspensión .....	103
3.5	Soldadura de los anclajes de la suspensión .....	104
3.6	Ensamble de la suspensión .....	105
3.7	Costos de la manufactura del sistema de suspensión .....	107
3.7.1	Costo de la materiales .....	107
3.7.2	Costo de los elementos normalizados e importados .....	108
3.7.3	Costo del mecanizado .....	109
3.8	Sumario .....	109

<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Verificación y análisis del comportamiento del sistema de suspensión.....</b>	<b>111</b>
4.1    Introducción.....	111
4.2    Verificación del sistema de suspensión.....	111
4.2.1    Comportamiento del sistema de suspensión en sus primeras pruebas	113
4.3    Comportamiento del sistema de suspensión en la competencia Formula Student.....	113
4.3.1    Revisión técnica (Tech) y de seguridad (Safety) .....	113
4.3.2    Inspección en la plataforma de inclinación.....	115
4.3.3    Análisis del comportamiento de la suspensión en pista.....	116
4.4    Cambios y mejoras propuestas al sistema de suspensión.....	117
4.4.1    Brazos de suspensión .....	117
4.4.2    Amortiguadores.....	119
4.4.3    Balancín.....	120
4.4.4    Adaptabilidad de los pernos .....	121
4.4.5    Frecuencias que inciden en la suspensión.....	121
4.5    Sumario .....	121
<b>5    Conclusiones.....</b>	<b>123</b>
<b>6    Bibliografía.....</b>	<b>125</b>
<b>7    ANEXO 1: Datos de los neumáticos.....</b>	<b>128</b>
<b>8    ANEXO 2: catálogo de tubos para la suspensión .....</b>	<b>129</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Monoplaza Formula Student .....	2
Figura 1.2 Sistema de suspensión posterior Formula Student .....	7
Figura 1.3 Elementos de una suspensión independiente formula Student.....	8
Figura 1.4 Neumáticos utilizados en Formula Student .....	9
Figura 1.5 Aro de tres partes marca Braid .....	10
Figura 1.6 Manguetas de chapa soldada (izq) y mecanizada (der) .....	11
Figura 1.7 Rocker mecanizado.....	12
Figura 1.8 Disposición de amortiguadores Universidad Técnica de Múnich .....	12
Figura 1.9 Tipos de amortiguadores y sus elementos .....	13
Figura 1.10 Suspensión independiente Formula Student .....	14
Figura 1.11 Suspensión de brazos de diferente medida y no paralelos, Renault R25 .....	15
Figura 1.12 Suspensión Pull Rod (Izquierda), Push Rod (Derecha).....	16
Figura 1.13 Chasis Formula Student.....	16
Figura 1.14 Cremallera Formula Student.....	17
Figura 1.15 Rótulas utilizadas para Formula Student .....	17
Figura 1.16 Ancho de vía (Track) .....	18
Figura 1.17 Distancia entre ejes (Wheelbase).....	18
Figura 1.18 Centro Instantáneo y Centro de Balanceo .....	19
Figura 1.19 Centro instantáneo de rotación .....	19
Figura 1.20 Centro de Balanceo.....	20
Figura 1.21 Determinación del centro de balanceo.....	21
Figura 1.22 Comportamiento de bote y rebote de una suspensión de doble brazo....	21
Figura 1.23 Anti-dive (Izquierda), Anti-squat(Derecha) .....	22
Figura 1.24 Geometría Anti-hundimiento.....	22
Figura 1.25 Ángulo de caída (Camber Angle) .....	23
Figura 1.26 Ganancia de camber .....	23
Figura 1.27 Geometría Kingpin .....	24
Figura 1.28 Ángulo de Salida (Caster) .....	24
Figura 1.29 Divergencia (izquierda), Convergencia (derecha) .....	25
Figura 1.30 Transferencia longitudinal de peso.....	26
Figura 1.31 Transferencia Lateral de Peso.....	26

Figura 2.1 Matriz de decisión .....	32
Figura 2.2 Neumáticos Formula Student .....	35
Figura 2.3 Aros en fibra de carbono .....	35
Figura 2.4 Amortiguador Ohlins TTX25 .....	36
Figura 2.5 Rocker de titanio .....	36
Figura 2.6 Bujes mecanizados DUT Racing .....	37
Figura 2.7 Distancia entre ejes y anchos de vía posterior y delantero .....	53
Figura 2.8 Centro Instantáneo (CI) y Centro de Balanceo (RC) del eje delantero ....	54
Figura 2.9 Centro Instantáneo (CI) y Centro de Balanceo (RC) del eje posterior .....	55
Figura 2.10 Ubicación del push rod delantero en vista frontal .....	56
Figura 2.11 Ubicación del push rod posterior en vista posterior .....	57
Figura 2.12 Anti-levantamiento y anti-hundimiento de la suspensión .....	58
Figura 2.13 Anti-hundimiento de la suspensión .....	59
Figura 2.14 Anti-levantamiento de la suspensión .....	60
Figura 2.15 Vista lateral del push rod delantero .....	61
Figura 2.16 Vista lateral del push rod posterior .....	61
Figura 2.17 Soportes del balancín y amortiguador delantero .....	62
Figura 2.18 Soportes del balancín posterior .....	62
Figura 2.19 Geometría del balancín delantero .....	65
Figura 2.20 Balancín delantero .....	66
Figura 2.21 Balancín posterior .....	66
Figura 2.22 Ensamble del sistema de suspensión delantera en la rueda derecha.....	67
Figura 2.23 Ensamble del sistema de suspensión posterior en la rueda derecha .....	67
Figura 2.24 Ensamble del sistema de suspensión con la estructura tubular del chasis .....	68
Figura 2.25 Distribución de masas del vehículo .....	69
Figura 2.26 Análisis de cargas en la prueba de inclinación .....	71
Figura 2.27 Transferencia de masa lateral .....	72
Figura 2.28 Transferencia de masa longitudinal .....	74
Figura 2.29 Obstáculo en pista.....	76
Figura 2.30 Fuerzas en los brazos de suspensión.....	77
Figura 2.31 Análisis de fuerzas en la suspensión delantera derecha.....	78
Figura 2.32 Resultado del análisis de fuerzas suspensión delantera derecha .....	79

Figura 2.33 Análisis de fuerzas suspensión posterior derecha.....	79
Figura 2.34 Resultados del análisis de fuerzas suspensión posterior derecha .....	80
Figura 2.35 Balancín delantero aplicando cargas .....	83
Figura 2.36 Resultados de tensión de Von Mises balancín delantero.....	83
Figura 2.37 Resultados de tensión de Von Mises del balancín delantero con reducción de peso.....	84
Figura 2.38 Balancín posterior aplicando cargas .....	84
Figura 2.39 Resultados de tensión de Von Mises balancín posterior .....	85
Figura 2.40 Centros instantáneos de la suspensión delantera .....	86
Figura 2.41 Ubicación del centro instantáneo en diferentes momentos para la suspensión delantera.....	86
Figura 2.42 Altura del centro de balanceo en diferentes momentos, con la suspensión delantera en funcionamiento .....	86
Figura 2.43 Gráfica de la altura del centro de balanceo vs el recorrido del neumático .....	87
Figura 2.44 Gráfica del camber vs el recorrido del neumático .....	88
Figura 2.45 Centros instantáneos de la suspensión posterior.....	89
Figura 2.46 Ubicación del centro instantáneo en diferentes momentos para la suspensión posterior.....	89
Figura 2.47 Altura del centro de balanceo en diferentes momentos, con la suspensión posterior en funcionamiento.....	89
Figura 2.48 Gráfica de la altura del centro de balanceo vs el recorrido del neumático .....	90
Figura 2.49 Gráfica del camber vs el recorrido del neumático .....	91
Figura 3.1 Bujes de sujeción suspensión-chasis .....	96
Figura 3.2 Plano de construcción de los bujes de los brazos de suspensión.....	97
Figura 3.3 Planos de construcción de los bujes de los push rods.....	97
Figura 3.4 Pivote de balancín (arriba) anclaje de amortiguador (abajo).....	98
Figura 3.5 Modelado en CAD del brazo de suspensión delantero.....	98
Figura 3.6 Plantilla extendida de un brazo de suspensión .....	99
Figura 3.7 Plantilla final de los brazos de suspensión .....	99
Figura 3.8 Corte del tubo finalizado .....	100
Figura 3.9 Modelado en CAD del balancin posterior .....	101

Figura 3.10 Modelado en 2D de los balancines para corte por chorro de agua. ....	101
Figura 3.11 Balancín delantero ensamblado en el vehículo.....	102
Figura 3.12 Plantilla para soldadura elaborada en SolidWorks .....	103
Figura 3.13 Proceso de soldadura de brazos de suspensión.....	103
Figura 3.14 Alineación del chasis con ayuda de láser. ....	104
Figura 3.15 Puntos de referencia para la suspensión realizados en el chasis.....	104
Figura 3.16 Conjunto balancín –amortiguador ensamblado en el vehículo.....	105
Figura 3.17 Rótula centrada mediante espaciadores .....	106
Figura 3.18 Brazo de convergencia posterior ensamblado con la mangueta. ....	106
Figura 3.19 Ensamble final de la suspensión posterior.....	107
Figura 4.1 Pruebas para programación del motor .....	113
Figura 4.2 Inspección técnica realizada a la suspensión .....	114
Figura 4.3 Revisión de seguridad realizada a la suspensión .....	115
Figura 4.4 Prueba de inclinación realizada a 60 grados.....	115
Figura 4.5 Vehículo durante la competencia de velocidad .....	116
Figura 4.6 Degradación del neumático posterior izquierdo luego de la competencia .....	117
Figura 4.7 Brazos de suspensión elaborados en fibra de carbono.....	118
Figura 4.8 Anclaje de suspensión mediante perfil de acero.....	118
Figura 4.9 Rótula esférica forrada .....	119
Figura 4.10 Amortiguador Ohlins TTX25 MkII y Kaz Tech 7800 FSAE.....	120
Figura 4.11 Método de comprobación del diseño en CAD. YUT Racing .....	121

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Conceptos de solución para el tipo de sistema de suspensión .....	40
Tabla 2.2 Matriz de decisión para el sistema de suspensión.....	41
Tabla 2.3 Concepto de solución al accionamiento del muelle.....	41
Tabla 2.4 Matriz de decisión para el accionamiento del muelle .....	42
<i>Tabla 2.5 Concepto de solución para los neumáticos .....</i>	<i>43</i>
Tabla 2.6 Matriz de decisión para la selección de neumáticos .....	43
Tabla 2.7 Concepto de solución a los aros.....	44
Tabla 2.8 Matriz de decisión para la selección de aros.....	44
Tabla 2.9 Conceptos de solución para la selección de amortiguadores .....	46
Tabla 2.10 Matriz de decisión para la selección de amortiguadores.....	46
Tabla 2.11 Conceptos de solución para la fabricación de los balancines .....	47
Tabla 2.12 Matriz de decisión para la selección del material de los balancines .....	47
Tabla 2.13 Conceptos de solución para el material de los brazos de suspensión. ...	48
Tabla 2.14 Matriz de decisión para la selección del material de los brazos de suspensión .....	48
Tabla 2.15 Conceptos de solución a la unión chasis-suspensión. ....	49
Tabla 2.16 Matriz de decisión para la selección del método de unión chasis- suspensión. ....	49
Tabla 2.17 Conceptos de solución para la fabricación de bujes de la suspensión. ....	50
Tabla 2.18 Matriz de decisión para la selección del material de los bujes de suspensión. ....	50
Tabla 2.19 Conceptos de solución para la fabricación de bujes de la suspensión. ....	51
Tabla 2.20 Matriz de decisión para la selección del material de los anclajes amortiguador balancín.....	51
Tabla 2.21 Tiempos de vuelta para diferentes distancias entre ejes. ....	52
Tabla 2.22 Tiempo de vuelta para diferente ancho de vía. ....	53
Tabla 2.23 Cálculo del diámetro del tubo para la construcción del push rod .....	81
Tabla 2.24 Cálculo del diámetro del tubo para la construcción del push rod .....	82
Tabla 2.25 Valores del centro instantáneo y camber en diferentes etapas de funcionamiento de la suspensión delantera.....	87
Tabla 2.25 Valores del centro instantáneo y camber en diferentes etapas de funcionamiento de la suspensión posterior .....	90

Tabla 3.1 Costo de los materiales utilizados en el sistema de suspensión.....	107
Tabla 3.2 Costo de los elementos normalizados de la suspensión.....	108
Tabla 3.3 Costo del proceso de corte por agua .....	109
Tabla 4.1 Peso de los elementos de suspensión .....	112

# **CAPÍTULO I**

## **FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN**

### **1.1 Introducción**

En este capítulo se presenta la fundamentación teórica para el diseño del sistema de suspensión de un monoplaza Formula Student.

Inicialmente se hace una descripción de la competencia Formula Student; a continuación se revisan los requerimientos que debe cumplir el sistema de suspensión de acuerdo al reglamento de la competencia para el año 2014.

Además se recopila información acerca del tipo de suspensión empleada en un vehículo monoplaza, sus elementos y los componentes que interactúan con el sistema.

Finalmente se hace énfasis en los parámetros dinámicos que se toman en cuenta para el correcto diseño y funcionamiento del sistema de suspensión.

### **1.2 Descripción de la competencia Formula Student**

La competencia Formula Student o Formula SAE, es un evento de diseño para estudiantes organizada por SAE International. La primera competencia se remonta a 1979 como una variante de la entonces existente Mini Baja, para buscar mayor aceptación por parte de los participantes se modificó la reglamentación inicial y así poder dar mayor apertura en las reglas, permitiendo a los estudiantes trabajar en otros sistemas como los motores; de esta manera se buscó un nuevo nombre que muestre la naturaleza de la competencia y su crecimiento en el contenido de ingeniería, así fue como nació el evento Formula SAE [1].

El fin de la competencia Formula SAE, es que, una empresa ficticia contrata un equipo de diseño para desarrollar un pequeño auto de carreras estilo formula. El prototipo será evaluado por su potencial como un elemento de producción, teniendo

como objetivo de ventas al corredor no profesional de fin de semana. Cada estudiante del equipo diseña, construye y prueba su prototipo basándose en el reglamento, su propósito es asegurar la operación en el lugar del evento y promover una inteligente resolución de problemas.

Formula SAE promueve la excelencia en ingeniería y a la vez abarca todos los aspectos de la industria automotriz incluyendo investigación, diseño, manufactura, pruebas, desarrollo, marketing, administración y finanzas. Llevando a los estudiantes fuera de las aulas permitiéndoles aplicar lo aprendido en la vida real.

Hoy en día la competencia se realiza en las ciudades de Michigan y California en los Estados Unidos, además existen otros eventos que usan las reglas Formula SAE y están reconocidas oficialmente, como son:

- Formula SAE Australia.
- Formula SAE Brasil.
- Formula SAE Italy.
- Formula Student (UK).
- Formula Student Austria.
- Formula Student Germany.
- Formula SAE Japan.



*Figura 1.1 Monoplaza Formula Student [2]*

### **1.3 Reglamento Formula Student**

El principal requisito del sistema de suspensión es cumplir con el reglamento de la competencia y además obtener un buen desempeño para todas las pruebas a las que el vehículo estará sometido. A continuación se recopila y se traduce al español la parte del reglamento FSAE que regula el diseño de la suspensión.

#### **1.3.1 Parte T - Requerimientos técnicos generales [3]**

##### **1.3.1.1 Requerimientos Del Vehículo y Restricciones**

###### **1.3.1.1.1 Modificaciones y reparaciones**

**T1.2.2** Las modificaciones permitidas por el inspector una vez homologado el vehículo son:

- g. Ajuste de la suspensión donde no se requiera la sustitución de una parte (excepto los resortes, barras estabilizadoras y espaciadores podrían ser cambiados).
- h. Ajuste de la presión del neumático.
- l. El cambio de los aros y neumáticos en condiciones de mojado a seco es permitido en la parte D de las reglas FSAE – Reglamento de los eventos dinámicos.

**T1.2.3** El vehículo debe mantener las especificaciones requeridas, por ejemplo: altura de manejo, recorrido de la suspensión, capacidad de frenado (material de la pastilla/composición), nivel de sonido y ubicación del alerón a través de toda la competencia.

**T1.2.4** Una vez que el vehículo está aprobado para la competencia, cualquier daño en el vehículo que requiera una reparación, por ejemplo, daños por choques, eléctricos o daños mecánicos, se anulará la aprobación de la inspección, al finalizar la reparación y para volver a entrar en una competencia dinámica el vehículo debe volver a presentarse a la inspección técnica.

### **1.3.2 Requerimientos generales de diseño**

#### **1.3.2.1.1 T2.1 Configuración del vehículo**

El vehículo debe ser de neumáticos y cabina descubierta (cuerpo estilo formula) con cuatro (4) neumáticos que no se encuentran en línea recta.

- 1) Los 180 grados de las ruedas / neumáticos deben estar sin obstrucciones cuando se ve 68.6mm (2,7 pulgadas) por encima del plano formado por las copas de los neumáticos delanteros y traseros.
- 2) Las ruedas/neumáticos deben estar sin obstrucciones en vista lateral.

#### **1.3.2.1.2 T2.3 Distancia entre ejes**

El vehículo debe tener una distancia entre ejes de al menos 1525 mm (60 pulgadas). La distancia entre ejes se mide desde el centro de contacto con el suelo de las ruedas delanteras y traseras con las ruedas derechas.

#### **1.3.2.1.3 T2.4 Ancho de vía**

El ancho de vía mínimo del vehículo (delantero o posterior) no debe ser menos que el 75% de la distancia entre ejes.

### **1.3.3 Reglas generales del chasis**

#### **T6.1 Suspensión**

**T6.1.1** El vehículo debe estar equipado con un sistema de suspensión totalmente operativo con amortiguadores delanteros y posteriores, con un recorrido de la rueda utilizable de al menos 50.8 mm (2 pulgadas), 25.4 mm (1 pulgada) de bote y 25.4 mm (1 pulgada) de rebote, con el conductor sentado. Los jueces se reservan el derecho de descalificar a los vehículos que no posean un sistema de suspensión operacional o demuestren inadecuada maniobrabilidad para un circuito de autocross.

**T6.1.2** Todos los puntos de anclaje de los elementos de la suspensión deben ser visibles para la inspección técnica, ya sea por apreciación directa o mediante el retiro de cubiertas.

#### **1.3.3.1.1 T6.2 Distancia al suelo**

La distancia al suelo debe ser suficiente para prevenir que cualquier parte del vehículo, aparte de los neumáticos, entre en contacto con el piso durante los eventos en pista. Intencional o excesivo contacto con el piso de cualquier parte del vehículo a parte de los neumáticos recaerá en la pérdida de una carrera o un evento dinámico completo.

#### **1.3.3.1.2 T6.3 Ruedas**

**T6.3.1** Las ruedas del vehículo deben tener un diámetro de al menos 203.2 mm (8 pulgadas) o más.

#### **1.3.3.1.3 T6.4 Neumáticos**

Los vehículos deben tener dos tipos de neumáticos de la siguiente manera (T6.4.1):

- Neumáticos secos: los neumáticos del vehículo cuando este es presentado a la inspección técnica se definen como “neumáticos secos”. Los neumáticos secos pueden ser de cualquier tamaño o tipo. Pueden ser slicks o ranurados.
- Neumáticos de lluvia: los neumáticos de lluvia pueden ser de cualquier tamaño o tipo de labrado o ranurado.
  1. El dibujo de la banda o surcos fueron moldeados por los fabricantes del neumático, o fueron cortados por el fabricante de neumáticos o un agente designado. Cualquier ranurado debe tener una prueba documental de que fue hecho acorde a estas reglas.
  2. Hay una profundidad mínima de 2,4 mm (3/32 pulgadas).

#### **1.3.3.1.4 T6.7 Estabilidad de vuelco**

**T6.7.1** El ancho de vía y el centro de gravedad del vehículo se deben combinar para proveer una estabilidad de vuelco adecuada.

**T6.7.2** La estabilidad de vuelco será evaluada en la tabla basculante usando una prueba de pasa/no pasa. El vehículo no debería volcarse a un ángulo de inclinación de sesenta grados (60°) respecto a la horizontal, lo cual corresponde a 1.7 G's. La

prueba de inclinación se llevará a cabo con el conductor más alto en posición de conducción normal.

#### **1.3.3.1.5 T11.1 Requisitos de calidad de los sujetadores**

**T11.1.1** Todos los elementos de fijación roscados empleados en la estructura del vehículo deben cumplir o superar, SAE grado 5, Grado 8.8 métrico o especificaciones AN/MS “Ejercito Naval – Estándares Militares”

**T11.1.2** El uso de pernos de cabeza redonda, cabeza plana o tornillos de cabeza redonda o tornillos en lugares críticos, están prohibidos. Estas posiciones incluyen la estructura de la célula del conductor y los accesorios de equipos del conductor.

Nota: Tornillos Hexagonal de paso espaciado o pernos (llamados también tornillos de cabeza hueca o tornillos Allen) están permitidos.

#### **1.3.3.1.6 T11.2 Seguridad de los sujetadores**

**T11.2.1** Todo perno crítico y otros sujetadores sobre la dirección, frenos, seguridad del conductor y la suspensión deben ser asegurados de aflojamiento involuntario por el empleo de mecanismos de cierre positivos. Mecanismos de cierre positivos incluyen:

- Correcta instalación del alambrado de seguridad.
- Pasadores de chaveta.
- Tuercas con bloqueo de nylon.
- Tuercas de bloqueo de par.

**Nota:** Arandelas de seguridad y compuestos de rosca de cierre, por ejemplo, Loctite, no cumplen con el requisito de bloqueo.

**T11.2.2** Debe existir un mínimo de dos hilos de proyección que se visualicen desde cualquier tuerca de bloqueo.

**T11.2.3** Todas las rótulas esféricas y rodamientos esféricos en la dirección o suspensión deben estar en cortante doble o tener la cabeza de un tornillo/perno o una

arandela con un diámetro exterior que es más grande que el diámetro interior de la carcasa del rodamiento.

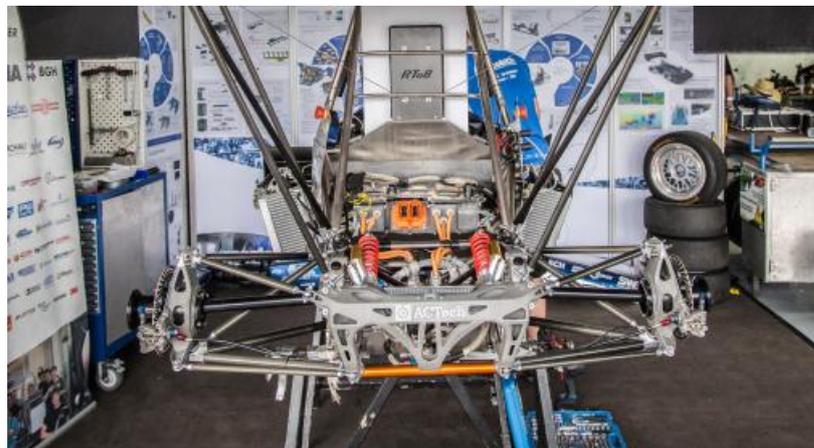
**TII.2.4** Las rótulas ajustables deben tener una contratuerca para evitar que se aflojen.

Esta es la parte del reglamento que debe ser considerada para realizar el diseño del sistema de suspensión del vehículo monoplaza, con la finalidad de aprobar el escrutinio y la seguridad de las pruebas estáticas.

A continuación se plantea el marco teórico de lo que es un sistema de suspensión de un prototipo Formula Student, los componentes del mismo y parámetros geométricos que permitirán el buen funcionamiento.

#### **1.4 Sistema de suspensión**

El sistema de suspensión está constituido por los elementos que unen el chasis con las ruedas y permiten absorber de forma directa las irregularidades del terreno por el cual transitan, además es responsable de la maniobrabilidad del vehículo, estabilidad y confort.



*Figura 1.2 Sistema de suspensión posterior Formula Student [4]*

Los componentes de un sistema de suspensión realizan seis funciones básicas que son:

1. Mantener una correcta altura del vehículo durante la conducción.
2. Reducir el efecto de las fuerzas de choque de la suspensión.

3. Mantener una correcta alineación de las ruedas.
4. Soportar el peso del vehículo.
5. Mantener los neumáticos en contacto con la carretera.
6. Controlar la dirección de movimiento del vehículo.

#### 1.4.1 Partes de un sistema de suspensión

Los elementos de una suspensión son aquellos que permiten unir la rueda con el chasis e incluyen [5]:

- Centro de rueda, para colocar los aros.
- Ejes.
- Mangueta, permiten conectar las manzanas con los brazos de suspensión, bieleta de dirección, y alojar las mordazas de frenos.
- Eslabones simples, con rótulas esféricas o conexiones articuladas en el final, o un par de eslabones combinados para formar un bastidor en A, un brazo en A, o un brazo de control.
- Palier para transmitir el par motor.
- Resortes y amortiguadores, conectados entre el chasis y suspensión directamente, o indirectamente a través de un eslabón y disposición push o pull rod.
- Opcionalmente barras antivuelco, permiten modificar el comportamiento de la suspensión.



*Figura 1.3 Elementos de una suspensión independiente formula Student [6]*

A continuación se presenta una descripción breve de los elementos que componen un sistema de suspensión común en formula Student:

#### **1.4.1.1 Neumáticos**

Es uno de los elementos más importantes, pues es la única parte del monoplaza que tiene contacto con el piso, por lo que todas las fuerzas y momentos generados durante el desplazamiento del vehículo son transmitidos y limitados por los neumáticos.

El neumático actúa como un componente de suspensión, pues funciona en serie con el sistema de resorte amortiguador, por lo que una suspensión mientras más rígida, mayor es la contribución del neumático en el comportamiento del vehículo. En la figura 1.4 podemos apreciar dos diferentes tipos de neumáticos utilizados en la competencia formula Student UK 2014.



*Figura 1.4 Neumáticos utilizados en Formula Student [4]*

#### **1.4.1.2 Aros**

Se define como la parte metálica o compuesto, que aloja al neumático. Las dimensiones generales de un aro están dadas por el diámetro y ancho. Por lo general un aro de competencia está formado por dos partes o mitades, y por un centro o porta manzana. El centro contiene un agujero central, que cuando se especifica para su construcción permite el montaje del aro con precisión. Además un círculo de agujeros permite acomodar a los espárragos, o en otros casos a una sola tuerca central para sujetarlo. La distancia entre el plano central o porta manzana a la línea central del aro se conoce como offset.



*Figura 1.5 Aro de tres partes marca Braid [7]*

### **1.4.1.3 Mangueta**

Es un elemento crucial para el funcionamiento de la suspensión, Pashley [8] establece las siguientes características que debe cumplir una mangueta:

1. Proporcionar una ubicación estable para los rodamientos de la rueda.
2. Resistir las fuerzas de rotación, alrededor de su eje vertical que surgen de la superficie de contacto causadas por la tracción y el frenado.
3. Debe resistir los momentos de flexión o cortantes originados por la fuerza centrífuga al tomar una curva.
4. Debe resistir las fuerzas impuestas por el conjunto resorte-amortiguador, directamente o a través de una barra.
5. Resistir las fuerzas torsionales que están actuando alrededor del eje de rotación de la rueda, causados por el frenado, y proveer un montaje seguro para los cálipers de freno.
6. Deberían estar unidas a los brazos de suspensión de manera que facilite un ajuste ligero en los tres planos de rotación.
7. Deben ser lo suficientemente rígidas a la torsión alrededor de su eje vertical para transmitir de manera precisa las maniobras de la dirección y sus reacciones.
8. Necesitan ser lo suficientemente robustas para resistir daños por contactos menores con objetos alrededor de la pista.
9. Finalmente deben encajar dentro del aro.

En la competencia formula Student existen varios materiales para la construcción de las mismas que van desde el uso de chapa metálica soldada, hasta las mecanizadas en materiales como aluminio.



*Figura 1.6 Manguetas de chapa soldada (izq) y mecanizada (der). [4]*

#### **1.4.1.4 Brazos de suspensión**

Los brazos de suspensión son los elementos que unen la masa no suspendida con el chasis, deben cumplir dos funciones importantes, la primera es que sean lo suficientemente fuertes para mantener una constante relación lateral y axial entre las ruedas y el chasis del vehículo. En segundo lugar no deben ser tan fuertes como para sobrevivir a un evento en el que pueda causarse daño al chasis [8]. Dentro de Formula Student, por lo general se fabrican de tubos de acero o tubos de fibra de carbono.

#### **1.4.1.5 Push/ Pull Rods**

Cuando se utiliza una suspensión abordo, normalmente se considera la actuación del conjunto resorte amortiguador, a través de un sistema de barra (push/pull rod) y un balancín (rocker); son tubos con uniones que además permiten modificar la altura del vehículo en algunos casos. Al igual que los brazos de suspensión se usa acero o fibra de carbono.

#### **1.4.1.6 Rocker**

Se trata de un balancín, que en el caso de una suspensión pull/push rod, permite la orientación de la fuerza generada en la rueda hacia el amortiguador. Consta de tres orificios que forma un patrón parecido a una 'L', uno de ellos contiene el rodamiento pivote, otro está unido a la parte final del push o pull rod, y otro está unido al

actuador del amortiguador. Se fabrican con chapa metálica soldada o mecanizándolos en aleaciones de acero o aluminio.



*Figura 1.7 Rocker mecanizado [2]*

#### **1.4.1.7 Amortiguador**

Staniforth [9] define a un amortiguador como un dispositivo para controlar la oscilación natural de un resorte, usualmente es un pistón forzando a un gas o líquido a pasar a través de una o más válvulas. En un vehículo debe amortiguar el movimiento de las masas suspendida y no suspendida del vehículo. Aun cuando existe una pequeña cantidad de amortiguación en los neumáticos (aproximadamente 2%) el amortiguador debe realizar la mayor parte del trabajo para todo el sistema. Mientras los resortes y barras de torsión producen fuerzas basadas en su desplazamiento, los amortiguadores producen fuerza basados en que tal rápido se mueven. [5]



*Figura 1.8 Disposición de amortiguadores Universidad Técnica de Múnich [4]*

La función primaria en el vehículo es de amortiguar las masas suspendida y no suspendida en sus frecuencias de resonancia. Y una función secundaria es controlar la proporción de transferencia de peso durante transitorios como frenado, entrada a una curva y aceleración [5] .

### Elementos de un amortiguador

**Pistón principal.-** contiene los componentes de válvulas primarios y produce la mayoría de las fuerzas de amortiguamiento.

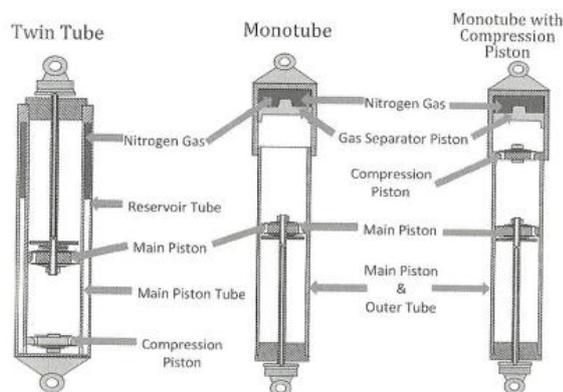
**Pistón de compresión.-** produce desplazamiento basado en el desplazamiento del actuador, permitiendo presiones de compresión menores, para la misma fuerza de amortiguamiento, dando como resultado menor variación en las fuerzas del neumático y mejor grip.

Provee un balance en la presión en el pistón principal durante el desplazamiento de compresión para prevenir la cavitación.

**Pistón separador.-** mantiene separado el gas del aceite en el interior del amortiguador.

**Tubo del pistón principal.-** es el tubo dentro del que opera el pistón principal.

**Tubo de reserva.-** en un amortiguador de doble tubo, es el tubo exterior, y crea espacio para aceite y gas extra.



*Figura 1.9 Tipos de amortiguadores y sus elementos [5]*

### 1.4.2 Suspensión independiente

Este tipo de sistema no une una rueda con otra, evitando que el movimiento de una se transmita a la otra permitiendo mayor estabilidad, además de poseer menor peso no suspendido, lo que disminuye las fuerzas generadas en el chasis. En la figura siguiente podemos observar un sistema desarrollado por el equipo Formula Group T, de la Universidad Católica de Lovaina, Bélgica durante el año 2013.



*Figura 1.10 Suspensión independiente Formula Student [6]*

### 1.4.3 Tipos de suspensión independiente

Los principales tipos de suspensión independiente son:

- Suspensión McPherson.
- Suspensión paralelogramo deformable.
- Suspensión multilink.
- Suspensión de brazos tirados.
- Suspensión de eje oscilante.

#### **Suspensión Paralelogramo Deformable**

Es uno de los tipos de suspensión más utilizados en el diseño de vehículos de competencia. Consta principalmente de dos brazos u horquillas, donde cada uno tiene dos puntos de unión hacia el chasis y uno con la mangueta.

Existe una variación de este tipo de suspensión, formada por brazos de diferente medida y no paralelos. En la posición estática del vehículo, es muy versátil, pues admite mayor cantidad de trabajo al diseñador, permitiendo un mejor control del camber de la rueda además de la ubicación del centro de balanceo.



*Figura 1.11 Suspensión de brazos de diferente medida y no paralelos, Renault R25 [9]*

#### **1.4.4 Métodos de accionamiento del muelle**

Tomando en cuenta únicamente a los muelles tipo helicoidal, Staniforth establece tres maneras de accionar los muelles: [9]

- Directamente sobre el eje, mangueta o brazo de suspensión.
- Por medio de un brazo oscilante.
- Push y pull rods.

A continuación analizaremos el tipo push/pull rod pues son los modelos más utilizados hoy en día para el diseño de suspensión de monoplazas.

#### **Push/ Pull Rod**

El principio de funcionamiento se basa en que, el movimiento de la rueda es transmitido hacia el amortiguador a través de una barra (push / pull) y un balancín, mejor conocido como rocker. La diferencia está en que en un tipo push rod, la barra trabaja en compresión, mientras que en un tipo pull rod la barra trabaja en tracción para accionar el muelle. En la Figura 1.12 mostramos la configuración utilizada en dos vehículos fórmula 1.



*Figura 1.12 Suspensión Pull Rod (Izquierda), Push Rod (Derecha) [10]*

#### **1.4.5 Elementos que interactúan con el sistema de suspensión**

##### **Chasis Tubular**

El chasis es la estructura encargada de llevar y salvaguardar al piloto, conecta todos los componentes principales como son el motor, sistemas de traslación, tren de fuerza motriz, y proporcionar los puntos de anclaje para los diferentes sistemas que conforman el vehículo. La estructura debe ser capaz de soportar el peso de todos los componentes del vehículo, así como transmitir y resistir sin fallar todas las cargas generadas durante las etapas de conducción en pistas como son la aceleración, frenado, transferencia de masas, etc.

Otros parámetros que se deben tener en cuenta son el peso y la economía, ya que una estructura liviana permitirá mejorar la potencia y el rendimiento del motor, disminuyendo el consumo de combustible que influirá notablemente en la competencia. En cuanto al costo de la estructura debe ser lo más económico sin que afecte su fiabilidad, para esto es necesario un análisis de los materiales y procesos para la construcción.



*Figura 1.13 Chasis Formula Student [11]*

## Dirección

La dirección es el conjunto de mecanismos cuya misión es la de orientar las ruedas delanteras para que el vehículo tome la trayectoria deseada por el conductor. Para que el piloto de un monoplaza no tenga que realizar esfuerzo en la orientación de las ruedas directrices, el vehículo dispone de una cremallera que facilita la conducción del vehículo.



*Figura 1.14 Cremallera Formula Student [12]*

## Rótulas

Todas las partes de la suspensión, especialmente los brazos de suspensión, deben estar conectadas fijamente con los demás componentes, es muy común conectarlas mediante rodamientos que permitan el movimiento en tres diferentes planos con el fin de adaptar los movimientos del sistema de suspensión.

Las rótulas son elementos muy versátiles para obtener estos movimientos, ofrecen facilidad de ensamble dentro del sistema, son de bajo peso y lo más importante permite realizar un ajuste rápido de longitud en los elementos sin ser necesario desarmarlas.



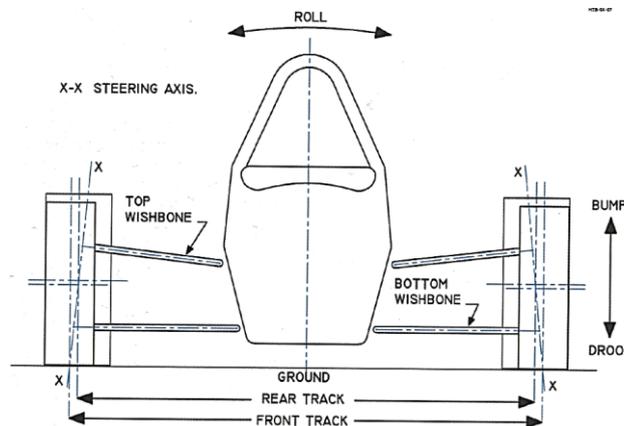
*Figura 1.15 Rótulas utilizadas para Formula Student [13]*

## 1.5 Geometría de la suspensión

Para el desarrollo del sistema de suspensión es necesario conocer algunos parámetros fundamentales para cubrir las demandas del diseño, para ello se ha recopilado la información necesaria para cubrir todos los puntos a tomar en cuenta en el diseño.

### 1.5.1 Ancho de vía (Track)

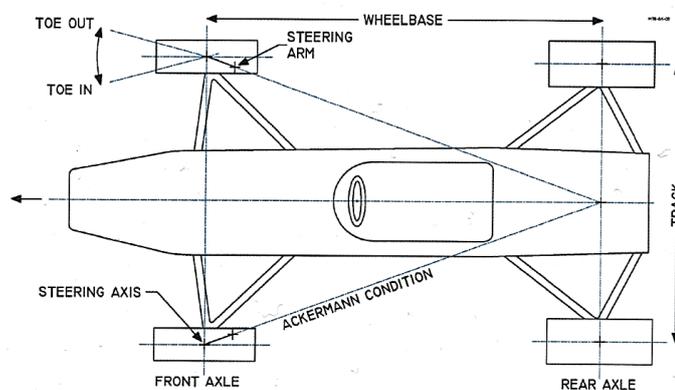
El ancho de vía es la distancia, en vista frontal, entre los centros de los neumáticos de un mismo eje, en un vehículo monoplaza no es necesario que el ancho de vía del eje delantero y del eje posterior sea igual como se muestra en la Figura 1.16:



**Figura 1.16** Ancho de vía (Track) [8]

### 1.5.2 Distancia entre ejes (Wheelbase)

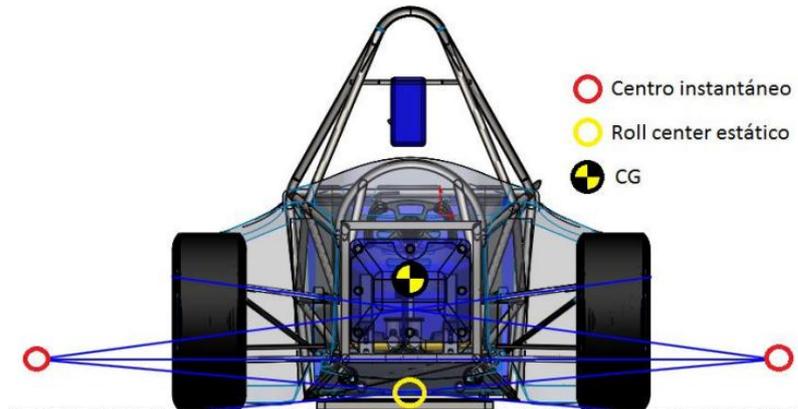
La distancia entre ejes es la distancia, en vista lateral, del centro del neumático del eje delantero al centro del neumático del eje posterior, se puede visualizar la distancia entre ejes (Wheelbase) en la Figura 1.17:



**Figura 1.17** Distancia entre ejes (Wheelbase) [8]

### 1.5.3 Centro de gravedad

Se denomina centro de gravedad al punto donde se concentran todas las fuerzas que actúan sobre la totalidad de la masa del cuerpo, como si se concentrase toda la masa en ese punto. De la ubicación del centro de gravedad tanto en el eje longitudinal como en su altura, va a depender en gran manera la estabilidad y comportamiento en curva, en frenada o aceleración del vehículo en pista.

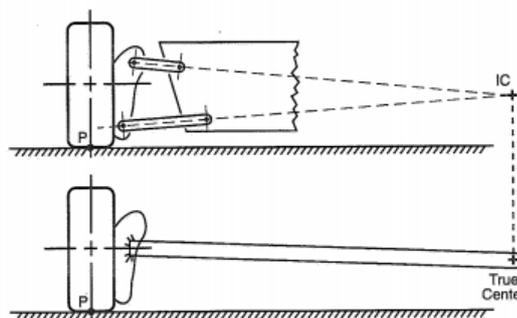


*Figura 1.18 Centro Instantáneo y Centro de Balanceo [14]*

La altura del centro de gravedad del vehículo, como se visualiza en la *Figura 1.18*, es el parámetro más importante al momento de diseñar el monoplace, entre más bajo se encuentre menor será la transferencia de pesos que se producen en la pista.

### 1.5.4 Centro instantáneo de rotación (Instant center)

El centro instantáneo de rotación (CIR) es el punto instantáneo en el cual se mueve la rueda, es decir se puede evaluar la trayectoria de la rueda por la rotación que tiene en el centro instantáneo. Los brazos de suspensión se los pueden reemplazar por un brazo virtual de control, lo cual facilita el estudio cinemático del sistema.

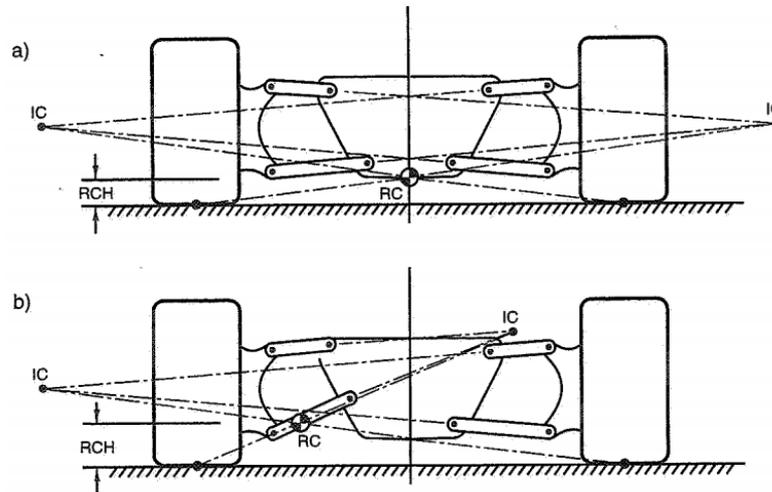


*Figura 1.19 Centro instantáneo de rotación [15]*

En la *Figura 1.19* se observa como dos brazos de suspensión pueden ser reemplazados por uno más largo. Este brazo se mueve en distintas posiciones durante el funcionamiento de la suspensión, por lo que el centro no se mantiene en una posición fija, por lo tanto el diseño de la geometría no solo establece todos los centros instantáneos en las posiciones requeridas en la altura de manejo, sino que también controla que tan rápido y en qué dirección se mueve con el recorrido de la suspensión. [15]

### 1.5.5 Centro de Balanceo (Roll Center)

Cuando un vehículo experimenta fuerzas centrífugas la masa suspendida entre los ejes delantero y posterior tienden a rotar alrededor del centro, el mismo que está localizado en un plano transversal a los ejes. Estos puntos se los denomina centros de balanceo y son los puntos en los cuales las fuerzas laterales generadas por los neumáticos y la pista van a actuar hacia el chasis. El centro de balanceo delantero y posterior por lo común se encuentra en diferentes lugares, como se observa en la *Figura 1.20*.

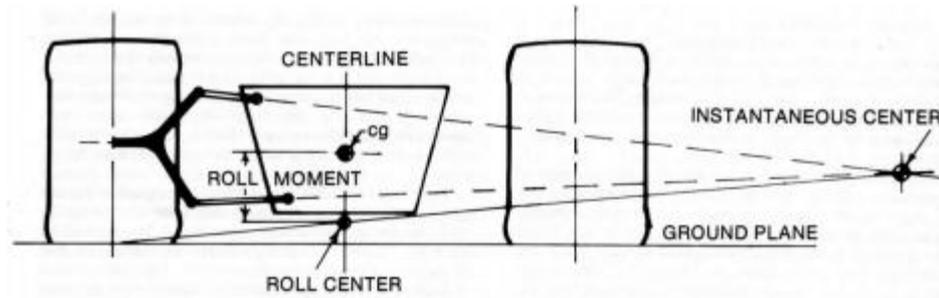


*Figura 1.20* Centro de Balanceo [15]

Las líneas inclinadas correspondientes a los brazos superior e inferior son extendidas hasta su intersección en el centro instantáneo. Desde este centro instantáneo una línea recta se dibuja de regreso hacia el punto ubicado en la mitad del neumático que está en contacto con el piso. En el punto en el cual esta línea se cruza con la línea central del vehículo se denomina el centro de balanceo. [15]

### 1.5.6 Momento de Balanceo

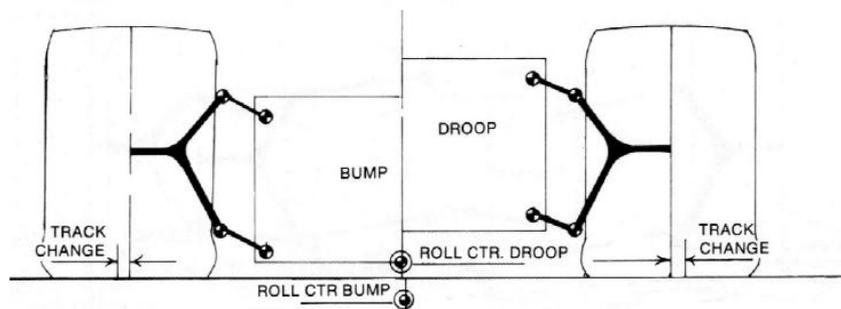
El momento de balanceo es la distancia, en el plano transversal del eje del neumático, entre el centro de gravedad y el centro de balanceo como se observa en la Figura 1.21.



*Figura 1.21 Determinación del centro de balanceo [15]*

### 1.5.7 Bote y rebote (bump and droop)

El bote y rebote son posiciones de una suspensión independiente bajo ciertos parámetros. El bote ocurre cuando las llantas golpean una irregularidad en la superficie de la calzada mientras que el rebote ocurre cuando la llanta cae dentro de una depresión en la superficie de la calzada. Este fenómeno se lo puede visualizar en la Figura 1.22, donde se observa que el centro de balanceo varía de posición frente al movimiento de los neumáticos.

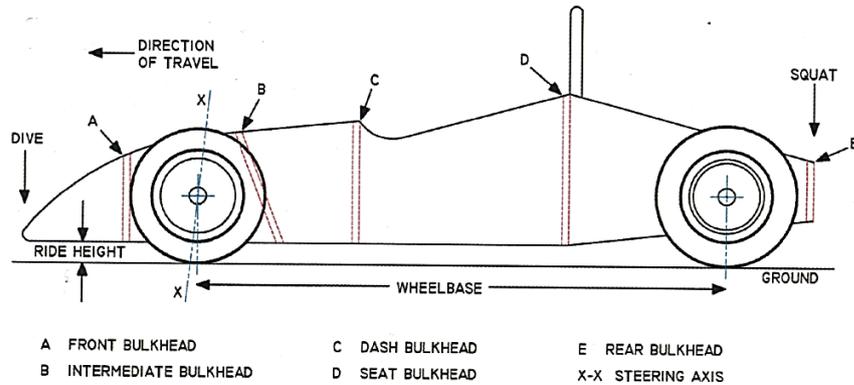


*Figura 1.22 Comportamiento de bote y rebote de una suspensión de doble brazo [15]*

### 1.5.8 Geometría Anti-levantamiento y Anti-hundimiento

La transferencia de pesos puede crear inestabilidad al forzar las suspensiones en momentos de gran aceleración, por lo que se emplea una disposición de los

elementos de la suspensión para minimizar el aplastamiento de los amortiguadores haciendo que se distribuya la fuerza entre estos y los brazos de suspensión, como se observa en la *Figura 1.23*:



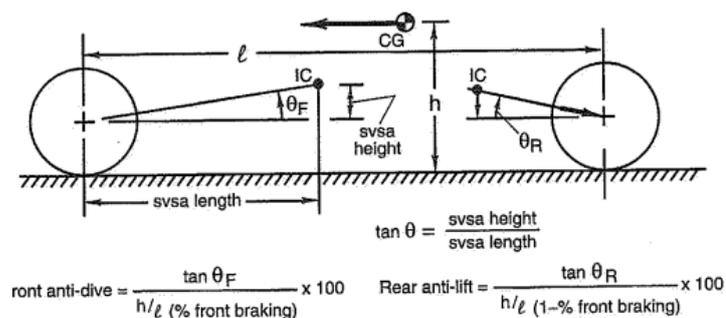
**Figura 1.23** Anti-dive (Izquierda), Anti-squat(Derecha). [8]

### 1.5.8.1 Anti-levantamiento (Anti-squat)

Cuando el vehículo es sometido a una aceleración brusca, debido a la transferencia de pesos este tiende a levantar su parte delantera, cargando de esta manera el eje posterior del vehículo. La distancia entre el centro de gravedad CG y el centro instantáneo CI generado por los brazos de suspensión posteriores define la magnitud del efecto anti-levantamiento como se observa en la *Figura 1.24*.

### 1.5.8.2 Anti-hundimiento (Anti-dive)

El anti-hundimiento es el encargado de evitar que la parte trasera del chasis se levante durante las frenadas debido a la transferencia de pesos. Se lo mide en porcentaje de la altura del centro instantáneo generado por los brazos de suspensión delanteros con respecto al centro de gravedad como se observa en la *Figura 1.24*.



**Figura 1.24** Geometría Anti-hundimiento [16]

## 1.5.9 Geometría de la Dirección

### 1.5.9.1 Angulo de Caída (Camber)

El ángulo de caída es el ángulo, en vista frontal, entre la vertical del neumático y el ángulo que forma la llanta con esta como se observa en la Figura 1.25; se considera positivo cuando la llanta apunta hacia el exterior del vehículo y negativo cuando apunta hacia el interior del vehículo. Se debe garantizar que el ángulo de caída no se vuelva positivo durante la conducción para utilizar la mayor tracción del neumático en curva.

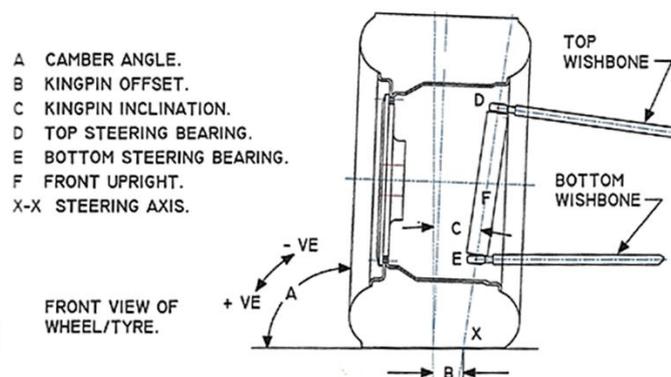


Figura 1.25 Ángulo de caída (Camber Angle) [8]

### 1.5.9.2 Tasa de cambio de la caída (Camber change rate)

Es la relación de cambio de caída por unidad de desplazamiento vertical de la rueda, la relación es inversamente proporcional a la distancia del centro de la rueda al centro instantáneo. La tasa de cambio de la caída del neumático se observa en la Figura 1.26.

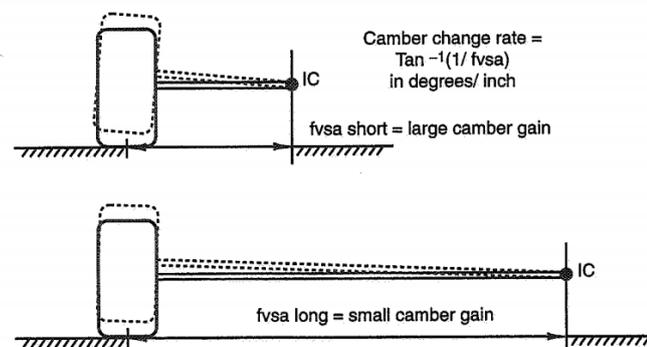
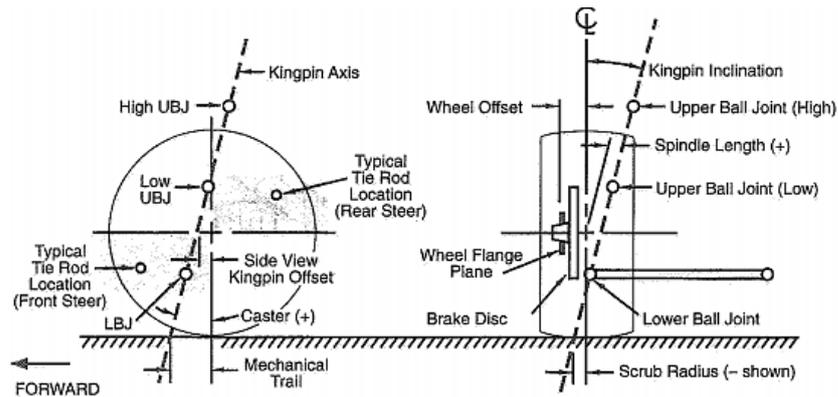


Figura 1.26 Ganancia de camber [16]

### 1.5.9.3 Kingpin

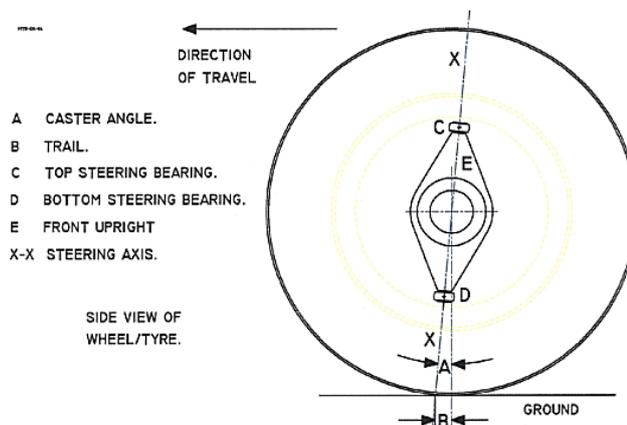
El kingpin es el ángulo, en vista frontal, comprendida entre la línea central del neumático y la línea que une las sujeciones de los brazos de suspensión como se observa en la Figura 1.27. Este ángulo se utiliza para evitar la flexión que se presenta en el eje de la llanta debido a la distancia entre el centro de la llanta y la línea de acción de la fuerza debido a la geometría de los brazos de control.



**Figura 1.27 Geometría Kingpin [16]**

### 1.5.9.4 Ángulo de Salida (Caster)

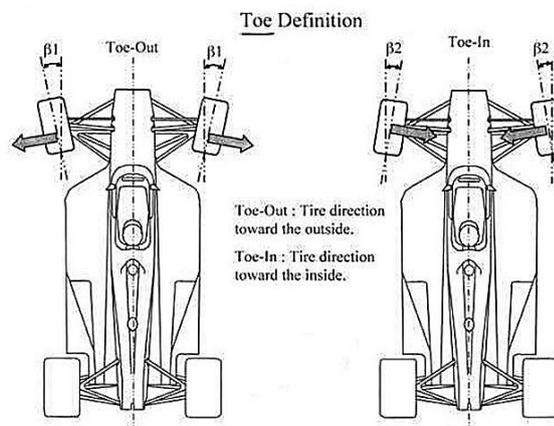
El ángulo de salida es el ángulo, en vista lateral, comprendido entre la línea de proyección de la sujeción de los brazos de control y la vertical del neumático, se considera positivo cuando apunta hacia el centro del vehículo. El ángulo de salida determina el punto de contacto del neumático con la pista, en el cual se van a aplicar las fuerzas laterales que generan el auto alineamiento de la llanta. El ángulo de salida se lo puede visualizar en la Figura 1.28:



**Figura 1.28 Ángulo de Salida (Caster) [8]**

### 1.5.9.5 Convergencia y divergencia (Toe in and Toe out)

El ángulo que forma el neumático con una línea paralela al plano longitudinal del vehículo visto desde arriba se denomina convergencia o divergencia. Cuando los neumáticos delanteros apuntan a un punto en el centro del vehículo se denomina ángulo de convergencia (Toe in) mientras que cuando los neumáticos apuntan en sentido contrario la una de la otra se denomina divergencia (Toe out) como se observa en la Figura 1.29. La convergencia de los neumáticos proveen una mejor estabilidad en línea recta, mientras que la divergencia puede ayudar a un mejor manejo por curvas, generalmente se opta por neumáticos convergentes.



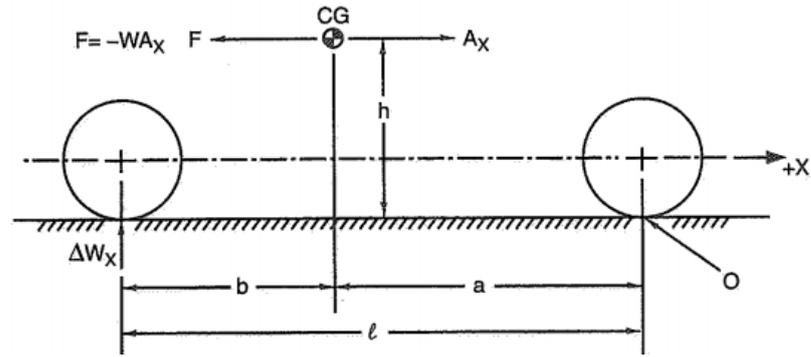
*Figura 1.29 Divergencia (izquierda), Convergencia (derecha) [17]*

### Transferencia de pesos dinámica

La transferencia de pesos es la carga transferida de una rueda a otra debido a los momentos que se generan en el centro de gravedad del vehículo o su centro de balanceo en aceleración en un sentido o en otro [15].

### Transferencia de pesos longitudinal

La transferencia de pesos longitudinal es el resultado de la aceleración de la masa del frente del vehículo hacia la parte posterior o viceversa bajo aceleración y frenado respectivamente. El peso total del vehículo no cambia, la carga se transfiere de las ruedas de un extremo del vehículo hacia otro [15].



**Figura 1.30** Transferencia longitudinal de peso [16]

A continuación se tiene la fórmula fórmula para calcular la transferencia longitudinal de pesos del vehículo según [16]:

$$W_x = \frac{W A_x h}{l}$$

En donde:

$W_x$  = Transferencia de peso longitudinal

$W$  = Peso del vehiculo

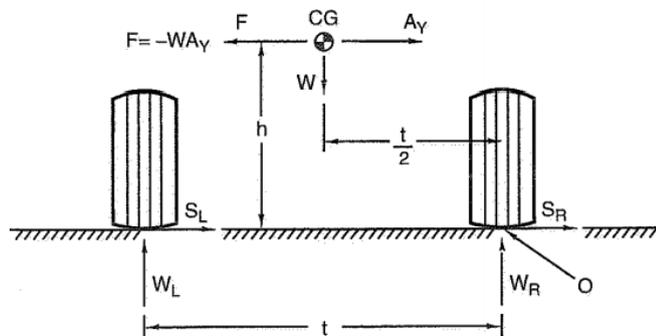
$A_x$  = Aceleracion longitudinal

$h$  = Altura del centro de gravedad

$l$  = Distancia entre ejes

### Transferencia de pesos lateral

La transferencia de pesos lateral mantiene el mismo principio que la transferencia de pesos longitudinal, pero en este caso la masa de un lado del vehículo se transfiere al otro lado debido a una aceleración lateral.



**Figura 1.31** Transferencia Lateral de Peso [16]

A continuación se tiene la fórmula para calcular la transferencia longitudinal de pesos del vehículo según [16]:

$$W_L = \frac{W A_y h}{t}$$

En donde:

$W_L =$  *Transferencia de Peso*

$W =$  *Peso del Vehículo*

$A_y =$  *Aceleración Lateral*

$h =$  *Altura del centro de gravedad*

$t =$  *Ancho de vía*

## 1.6 Sumario

En este capítulo se revisan los fundamentos teóricos y técnicos que debe cumplir el sistema de suspensión de un monoplaza formula Student, los que permiten un correcto análisis del tipo de suspensiones utilizadas en esta competencia.

La competencia Formula Student es una competencia a nivel mundial entre universidades, las cuales diseñan, construyen y desarrollan un vehículo monoplaza para cumplir con pruebas estáticas y dinámicas establecidas por la organización.

El reglamento habla sobre los requerimientos que deben cumplir la suspensión y sus componentes durante las pruebas presentes en la competencia; especialmente en la parte de la seguridad del vehículo.

El sistema de suspensión de un vehículo debe cumplir funciones como: mantener una correcta altura del vehículo durante la conducción, reducir el efecto de las fuerzas de choque de la suspensión, mantener una correcta alineación de las ruedas, soportar el peso del vehículo, mantener los neumáticos en contacto con la carretera, controlar la dirección de movimiento del vehículo.

En el caso de un monoplaza la suspensión es del tipo push o pull rod, accionado por medio de un pivote que hace actuar al conjunto muelle amortiguador, permitiendo que el sistema sea compacto y además permita una facilidad en el ensamble.

Los parámetros dinámicos de la suspensión proveen el conocimiento básico sobre la funcionabilidad del sistema de suspensión tipo push y pull rod, además son el punto de partida para el desarrollo y diseño de la suspensión.

La información presentada en este capítulo servirá para realizar el diseño del sistema de suspensión en el capítulo siguiente.

# CAPÍTULO II

## DISEÑO DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN

### 2.1 Introducción

En este capítulo se realiza el diseño y análisis estructural de los elementos que conforman el sistema de suspensión de un monoplaza formula Student.

Se establece una metodología de diseño que permite aplicar diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficientes detalles que permitan su realización, con esto se definen parámetros en el diseño y desarrollo del sistema de suspensión.

El sistema de suspensión de un vehículo monoplaza debe cumplir diferentes funciones, para ello se diseña el sistema con la finalidad de tener: un ancho de vía y distancia entre ejes que ayuden a mantener la estabilidad en pista, ubicación correcta de los brazos de suspensión y ubicación correcta de los amortiguadores y balancines.

Se realiza un análisis por elementos finitos para dimensionar correctamente los elementos de la suspensión que van a ser construidos en el sistema de suspensión como son los brazos de suspensión, el balancín y los bujes.

Se determina por medio de un análisis cinemático el comportamiento del vehículo en pista, con lo cual se determinara la posición del centro de balanceo en diferentes posiciones y además se verificará si los centros instantáneos permiten un cambio de camber aceptable en las ruedas.

El diseño encontrado en este capítulo se utilizará para la construcción del sistema de suspensión.

### 2.2 Metodología de diseño

El diseño de ingeniería consiste en el proceso de *“aplicar diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficientes detalles que permitan su realización.”* Norton [18]

Para la realización adecuada de un proceso de diseño, es necesario definir con cuidado el problema al que se le busca solución, a través de un método de preliminar de ingeniería, que garantiza una correcta solución al problema. A continuación se enumeran diez pasos utilizados por Norton [18] a seguir para un proceso de diseño:

1. Identificación de la necesidad
2. Investigación preliminar
3. Planteamiento de objetivo
4. Especificaciones de desempeño
5. Ideación e invención
6. Análisis
7. Selección
8. Diseño detallado
9. Creación de prototipos y pruebas
10. Producción

Es importante señalar que Norton no define al proceso detallado anteriormente como un proceso a seguir de un modo lineal, sino que se trata de un proceso iterativo; donde podrá ser necesario regresar a un paso previo para definir otras posibles soluciones.

### **2.2.1 Identificación de la necesidad**

En este primer paso se define lo que se necesita diseñar, es decir lo que el consumidor requiere que se resuelva, por lo general no se dan mayores detalles del producto requerido, y no existirá un planteamiento estructurado del problema

### **2.2.2 Investigación preliminar**

Esta fase es la más importante del proceso, es una investigación breve con el fin de reunir información de los aspectos pertinentes del problema. Así mismo se investiga si el problema u otro similar ha sido resuelto antes, pues este podría ser la solución más económica, por tanto se vuelve necesario realizar una búsqueda del estado del arte relacionado con el problema.

### **2.2.3 Planteamiento de objetivos**

Una vez entendido el problema se procede a replantearlo en forma de objetivos coherentes, con tres características a saber: ser claro, conciso y general para expresar la solución. De manera que se obtenga una visualización funcional y así evitar limitaciones innecesarias en el diseño.

### **2.2.4 Especificaciones de desempeño**

Las especificaciones de desempeño no deben ser confundidas con especificaciones de diseño, mientras las especificaciones de desempeño definen lo que el sistema debe hacer, las especificaciones de diseño definen como lo hará. De manera que no es prudente especificar como se lograrán los objetivos planteados.

Las especificaciones de desempeño tienen como objetivo, definir y limitar el problema de la manera más completa y general posible, para que una vez terminado sea probado en cuanto cumpla con las especificaciones de diseño.

### **2.2.5 Ideación e innovación**

Es la fase más difícil del proceso, donde se requiere en gran medida de la creatividad del diseñador. El objetivo es obtener la mayor cantidad posible de potenciales diseños, sin importar la calidad de estas ideas, pues pueden generar nuevas ideas o sugerir otras soluciones reales y prácticas.

Esta fase es realizada por un grupo de personas, aquí se registran todas las sugerencias sin importar lo absurdas que puedan ser las ideas presentadas. Si se trabaja de manera individual, se puede usar analogías entre el problema y otros contextos físicos, o incluso definir el verbo de acción en el enunciado del problema con el uso de sinónimos.

### **2.2.6 Análisis**

Una vez estructurado el problema, se aplican técnicas de análisis para examinar el diseño y su desempeño. Aquí irán apareciendo algunos problemas, por lo que se requerirá de tantas iteraciones como sea necesario para garantizar el éxito del diseño.

### 2.2.7 Selección

Una vez que se tienen potenciales diseños factibles, el mejor pasa a un diseño detallado, creación de prototipo y pruebas en el mismo. Esta fase además incluye una comparación entre las soluciones disponibles. Por tanto una matriz de decisión ayuda a identificar la mejor solución al considerar varios factores sistemáticamente.

En la figura 2.1, se muestra un modelo de matriz de decisión propuesta por Norton [18], donde cada diseño ocupa una fila en la matriz. Las columnas muestran los criterios de evaluación de los diseños, que deben que ser apropiados para el problema; además, cada criterio tiene asignado un factor de ponderación para medir su importancia. El cuerpo de la matriz se llena de números para clasificar a cada diseño en una escala conveniente y subjetiva, luego cada calificación se multiplica por los factores de ponderación, y los productos son sumados para cada diseño. De esta manera se toma una mejor decisión en cuanto al posible mejor diseño.

	<i>Costo</i>	<i>Seguridad</i>	<i>Desempeño</i>	<i>Confiabilidad</i>	<i>RANGO</i>
<i>Factor de ponderación</i>	.35	.30	.15	.20	1.0
Diseño 1	3 1.05	6 1.80	4 .60	9 1.80	5.3
Diseño 2	4 1.40	2 .60	7 1.05	2 .40	3.5
Diseño 3	1 .35	9 2.70	4 .60	5 1.00	4.7
Diseño 4	9 3.15	1 .30	6 .90	7 1.40	5.8
Diseño 5	7 2.45	4 1.20	2 .30	6 1.20	5.2

*Figura 2.1 Matriz de decisión [18]*

### 2.2.8 Diseño detallado

Se incluye un conjunto completo de dibujos, ensambles o archivos CAD detallados, por cada pieza utilizada en el diseño. Cada dibujo debe tener todas las especificaciones necesarias para la fabricación de la pieza. Con esto se construyen modelos de prototipos para experimentos físicos, donde es muy probable que las pruebas muestren fallas y por lo tanto se requiera más iteraciones.

### **2.2.9 Creación de prototipos y pruebas**

Para verificar la factibilidad de un diseño, es necesario construir y probar el diseño a través de un modelo físico del prototipo. Si bien existen otros modelos, que puede ser muy útiles, no representa completa y precisamente al sistema físico real como lo haría un prototipo.

Para reducir el costo, se pueden elaborar prototipos a escala, pero estos traen complicaciones, pues no representan a la magnitud apropiada los parámetros físicos a los que se someterá el dispositivo, por lo que puede llevar a un comportamiento diferente al del sistema real, resultando en un análisis incorrecto.

Probar el prototipo ayuda a observar su funcionamiento real, además permite utilizar instrumentos adecuados para medir con precisión su desplazamiento, velocidad, aceleración, fuerza, y además realizar otras pruebas donde se puedan controlar las condiciones en las va a funcionar.

### **2.2.10 Producción**

Esta fase consiste en la manufactura de una versión final del diseño, que luego de un determinado tiempo, está listo para producirse en grandes o pequeñas cantidades. Para evitar la producción de dispositivos defectuosos habrá que tener cuidado en especial en los primeros pasos del proceso de diseño para garantizar que cumpla los objetivos deseados.

Finalmente, para un problema de diseño, no existe una solución correcta o única, pues existirán tantas soluciones como personas dispuestas a aplicar un proceso de diseño al problema. Habrá mejores soluciones, muchas que funcionen y otras que no; para determinar las soluciones potenciales se requiere de un análisis profundo, con tantos análisis posibles antes de construir el dispositivo.

En adelante se realiza el diseño del sistema de suspensión basándonos en el proceso antes mencionado.

## **2.3 Aplicación de la metodología de diseño**

A continuación se aplica la metodología de diseño, tratada en la sección anterior, al diseño sistema de suspensión.

### **2.3.1 Identificación de la necesidad**

Con la introducción del proyecto Formula Student por parte de la Universidad Politécnica Salesiana, se crea la necesidad del desarrollo de un sistema de suspensión delantero y posterior adecuado para un vehículo monoplace. El sistema debe concluir con cada uno de los eventos de la competencia, y cumplir el reglamento establecido por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) y el Instituto de Ingenieros Mecánicos (ImechE).

**“Lo que se necesita es diseñar y construir el sistema de suspensión delantero y posterior, que cumpla con todas las condiciones necesarias para la competencia”.**

### **2.3.2 Investigación preliminar**

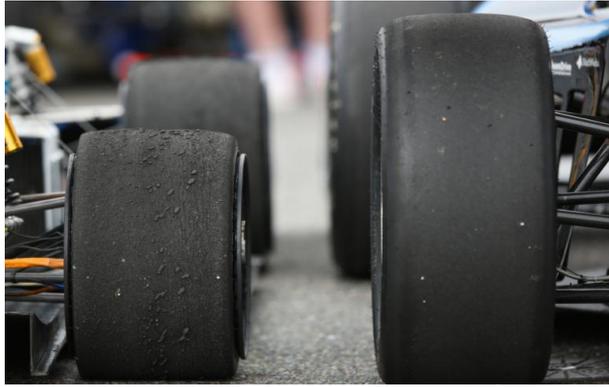
Adicional a la información proporcionada en el capítulo uno, se realiza una recopilación del estado del arte en cuanto a sistemas de suspensión utilizados en Formula Student.

#### **2.3.2.1 Estado del arte**

A continuación se realiza un breve análisis de los últimos sistemas y elementos utilizados en la competencia.

#### **2.3.2.2 Neumáticos:**

Si bien la utilización de neumáticos rin 13” aún es constante, existe una tendencia creciente hacia el uso del rin 10”. En cuanto a marcas, Hoosier es la más utilizada con el compuesto R25B, pero el equipo DUT Racing para la temporada 2014, diseñó y junto a la marca Apollo construyó sus propios neumáticos como se observa en la figura 2.2.



*Figura 2.2 Neumáticos Formula Student [4]*

### **2.3.2.3 Aros:**

Con la tendencia a la reducción de peso, los participantes desarrollan sus propios aros en fibra de carbono. Por otra parte existen fabricantes que construyen aros en aleaciones de aluminio, específicos para Formula Student y según las especificaciones requeridas por cada equipo, tal es el caso de marcas como Braid y Keiser.



*Figura 2.3 Aros en fibra de carbono [19]*

### **2.3.2.4 Amortiguadores**

El elegido por equipos de punta es el Ohlins TTX25 MkII el cual utiliza tecnología de doble tubo en un empaque pequeño, posee rótulas de 8mm en los anclajes del amortiguador para facilitar el funcionamiento en distintos planos y posee cuatro ajustes para el funcionamiento del amortiguador.



*Figura 2.4 Amortiguador Ohlins TTX25 [4]*

### **2.3.2.5 Brazos de suspensión**

En los últimos años, tomando en cuenta la tendencia de reducción de peso, ha disminuido el uso de tubos de acero o aluminio. En lugar de estos, los equipos con recursos utilizan tubos de fibra de carbono para la fabricación de los brazos de suspensión de este tipo de vehículos.

### **2.3.2.6 Balancín (Rocker)**

El balancín es la pieza que transmite la fuerza generada por el neumático hacia el amortiguador, se busca que sea resistente y ligero. Para ello se han llegado a utilizar mecanizados de aluminio y acero; pero sin duda alguna el mejor resultado se obtuvo en este rocker de titanio mecanizado.



*Figura 2.5 Rocker de titanio [20]*

### **2.3.2.7 Bujes**

Para obtener un acople correcto entre los brazos de suspensión y las manguetas, se utiliza un mecanizado de piezas en aluminio, facilitando el ensamble de los brazos de suspensión y permitiendo reducir el peso del monoplaza.



*Figura 2.6 Bujes mecanizados DUT Racing [19]*

### **2.3.3 Planteamiento de objetivo**

El objetivo es diseñar y construir el sistema de suspensión para un vehículo monoplace, su diseño debe tomar en cuenta parámetros como: geometría general del vehículo, distribución de peso, tipo de suspensión empleada y las características de sus elementos. Además de resistir a los esfuerzos generados durante todos los eventos de la competencia. Asimismo, cumplir con el reglamento establecido por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) y el Instituto de Ingenieros Mecánicos (ImechE) como organizadores del evento.

### **2.3.4 Especificaciones de desempeño**

Como base para las especificaciones de desempeño tomaremos al reglamento de la competencia, especialmente los artículos que regulan al sistema de suspensión. Es importante recalcar que estas especificaciones muestran lo que el diseño del sistema debe hacer y no como lo debe hacer.

- El vehículo debe tener una distancia entre ejes de al menos 1525 mm (60 pulgadas).
- El ancho de vía mínimo del vehículo (delantero o posterior) no debe ser menos que el 75% de la distancia entre ejes.
- El vehículo debe estar equipado con un sistema de suspensión totalmente operativo con amortiguadores delanteros y posteriores, con recorrido de la rueda utilizable de al menos 50.7 mm (2

pulgadas), 25.4 mm (1 pulgada) de bote y 25.4 mm (1 pulgada) de rebote, con el conductor sentado.

- Las ruedas del vehículo deben tener un diámetro de al menos 203.2 mm (8 pulgadas) o más.
- El vehículo no debería volcarse a un ángulo de inclinación de sesenta grados (60°) respecto a la horizontal, lo cual corresponde a 1.7 G's.
- Todos los elementos de fijación roscados empleados en la estructura del vehículo deben cumplir o superar, SAE grado 5, Grado 8.8 métrico o especificaciones AN/MS
- Debe existir un mínimo de dos hilos de proyección que se visualicen desde cualquier tuerca de bloqueo.
- Todas las rótulas esféricas y rodamientos esféricos en la dirección o suspensión deben estar en cortante doble o tener la cabeza de un tornillo/perno o una arandela con un diámetro exterior que es más grande que el diámetro interior de la carcasa del rodamiento.
- Las rótulas utilizadas para ajustar las distancias, deben tener una contratuerca para evitar que se aflojen.
- Todo perno crítico y otros sujetadores sobre la dirección, el frenado, la seguridad del conductor y la suspensión deben ser asegurados del aflojamiento involuntario por el empleo de mecanismos de cierre positivos.
- Los neumáticos pueden ser de cualquier tamaño o tipo slicks o ranurado.
- Todos los puntos de anclaje de los elementos de la suspensión deben ser visibles para la inspección técnica, ya sea por apreciación directa o mediante el retiro de cubiertas.
- La distancia al suelo debe ser suficiente para prevenir que cualquier parte del vehículo, aparte de los neumáticos, entre en contacto con el piso durante los eventos en pista.
- Resistir los esfuerzos a los que se someterá durante los eventos de la competencia.
- El sistema de suspensión debe ser lo más liviano posible.

- Cumplir con las restricciones del diseño del chasis y otros sistemas.

### **2.3.5 Ideación e invención**

Una vez identificadas las necesidades del sistema a diseñar, se proponen ideas y conceptos de solución que permitan satisfacer dichas necesidades (especificaciones de desempeño).

A continuación se presentan los diferentes conceptos de solución al sistema de suspensión en general y a cada uno de sus elementos.

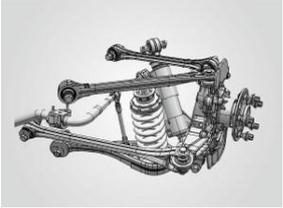
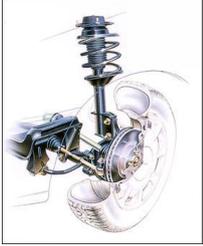
#### **Conceptos de solución para el tipo de suspensión a utilizar:**

El sistema de suspensión está constituido por los elementos que unen el chasis con las ruedas y permiten absorber de forma directa las irregularidades del terreno por el cual transitan, además es responsable de la maniobrabilidad del vehículo, estabilidad y confort.

Los tres conceptos propuestos son los siguientes, y se detallan en la tabla 2.1:

- Concepto 1: paralelogramo deformable.
- Concepto 2: Suspensión multilink.
- Concepto 3: Suspensión de McPherson

*Tabla 2.1 Conceptos de solución para el tipo de sistema de suspensión*

Concepto de Solución	Paralelogramo deformable	Multilink	McPherson
Sistema de suspensión			
	Consta principalmente de dos brazos u horquillas, donde cada uno tiene dos puntos de unión hacia el chasis y uno con la mangueta.	Utiliza 5 brazos de suspensión, donde el muelle y amortiguador están separados haciéndola más compleja y costosa.	Consta de un brazo oscilante que une el chasis con la mangueta, esta a su vez se une al amortiguador vertical.

Milliken y Kasprzak [5] proponen las siguientes consideraciones básicas para la selección del tipo de suspensión a utilizar:

- Espacio disponible: en conjunto con los demás sistemas del vehículo, cuanto espacio existe para alojar el sistema de suspensión.
- Eficiencia estructural: para una dada resistencia o rigidez, las estructuras en tensión o compresión son más livianas que las estructuras en cortante o torsión.
- Rigidez de unión: siempre los puntos fuertes del chasis son elegidos para coincidir con el diseño de la suspensión.
- Masa no suspendida: lo más mínima posible, como requerimiento general para reducir la variación de carga del neumático.

*Tabla 2.2 Matriz de decisión para el sistema de suspensión*

	<b>Espacio disponible</b>	<b>Eficiencia estructural</b>	<b>Rigidez de unión</b>	<b>Masa no suspendida</b>	<b>Rango</b>
<b>Factor de ponderación</b>	0.3	0.4	0.2	0.1	1
<b>Paralelogramo deformable</b>	6 1.8	8 3.2	8 1.6	9 0.9	7.5
<b>Multilink</b>	6 1.8	7 2.8	8 1.6	7 0.7	6.9
<b>McPherson</b>	4 1.2	5 2	5 1	4 0.4	4.6

Con base en el análisis realizado se determina que la solución adecuada para el sistema de suspensión a utilizar es el paralelogramo deformable, pues se adapta mejor al espacio disponible, las restricciones de otros sistemas del vehículo y a las consideraciones antes mencionadas.

### **Conceptos de solución para el método de accionamiento del muelle:**

Una vez elegido el tipo de sistema a utilizar, se realiza la selección del método de accionamiento del muelle que permite transmitir el movimiento de la rueda hacia el conjunto resorte amortiguador. Para esto tomamos las opciones establecidas por Staniforth [9]:

- Concepto 1: Directamente sobre el eje, mangueta o brazo de suspensión.
- Concepto 2: Push rod.
- Concepto 3: Pull rod.

*Tabla 2.3 Concepto de solución al accionamiento del muelle*

<b>Concepto de Solución</b>	<b>Directo</b>	<b>Push rod</b>	<b>Pull rod</b>
<b>Accionamiento del muelle</b>			
	El resorte y amortiguador están colocados directamente sobre la mangueta o brazo de suspensión.	Actúa por una barra en compresión desde el brazo inferior al balancín, el mismo que transmite el movimiento al muelle.	Actúa por una barra en tensión desde el brazo superior al balancín, el mismo que transmite el movimiento al muelle.

*Tabla 2.4 Matriz de decisión para el accionamiento del muelle*

	<b>Espacio disponible</b>	<b>Eficiencia estructural</b>	<b>Capacidad de ajuste</b>	<b>Libertad de diseño</b>	<b>RANGO</b>
<b>Factor de ponderación</b>	0.4	0.3	0.15	0.15	<b>1</b>
<b>Directo</b>	3 1.2	3 0.9	4 0.6	5 0.75	3.45
<b>Push rod</b>	8 3.2	7 2.1	8 1.2	9 1.35	7.85
<b>Pull rod</b>	6 2.4	6 1.8	8 1.2	9 1.35	6.75

De esta manera se determina que, el sistema push rod resulta adecuado, pues se ajusta mejor a la concepción inicial del vehículo, en especial al espacio disponible en el chasis; por tanto, permite mayor libertad para variar las condiciones geométricas de la suspensión. Además el ajuste es más rápido para las diferentes condiciones de la competencia.

#### **Conceptos de solución para los neumáticos a utilizar:**

Para la selección de neumáticos, se restringe a la utilización de neumáticos específicos para competencias Formula Student, aun cuando la disponibilidad en el mercado local es nula, lo que aumentará el costo de los mismos. Por otra parte con estos neumáticos mejora el rendimiento del vehículo, mejor agarre, el peso en comparación a los neumáticos del medio es mucho menor. En la tabla 2.5 se detallan las características de cada uno:

- Concepto 1: 6.0/18.0-R10
- Concepto 2: 19.5 x 7.5-R10
- Concepto 3: 20.5 x 7.0-R13

**Tabla 2.5** Concepto de solución para los neumáticos

Concepto de Solución	6.0/18.0-10	19.5 x 7.5-10	20.5 x 7.0-13
Neumáticos Hoosier			
	Slick Peso: 3,62 kg Compuesto: LC0	Slick Peso: 4,98 kg Compuesto: R25B	Slick Peso: 4,98 kg Compuesto: R25B

**Tabla 2.6** Matriz de decisión para la selección de neumáticos

	Espacio disponible	Peso	Libertad de diseño	Rango
Factor de ponderación	0.30	0.25	0.30	1
6.0/18.0-10	5 / 1.5	6.5 / 1.63	4 / 1,20	4,33
19.5 x 7.5-10	5 / 1,5	5 / 1.25	4 / 1,20	3,95
20.5 x 7.0-13	7 / 2.1	5 / 1,25	6 / 1,80	5,15

Es necesario recalcar que, ante la falta de acceso a información específica sobre cada tipo de neumáticos, como la proporcionada por *FSAE tyre test consortium*, se decide con base en los parámetros antes mencionados. Al ser la primera participación como equipo, el rin 13” permite una mayor libertad de diseño para los componentes como frenos, mangueta, dirección. Finalmente el neumático a utilizar es: Hoosier 20.5 X 7.0 R13 en compuesto R25B.

### Conceptos de solución para los aros a utilizar:

Se define al aro como la parte metálica o compuesto, que aloja al neumático. Para la selección tomamos las siguientes opciones:

- Concepto 1: Aros tipo formula del mercado local.
- Concepto 2: Aros Braid específicos para Formula Student.
- Concepto 3: Aros de fibra de carbono.

*Tabla 2.7 Concepto de solución a los aros*

Concepto de Solución	Mercado local	Braid	Fibra de carbono
Aros			

La selección de aros se realiza con base en los siguientes parámetros:

- Disponibilidad en el mercado local.
- Peso.
- Capacidad de ajuste al diseño de la suspensión.
- Conocimiento tecnológico.

*Tabla 2.8 Matriz de decisión para la selección de aros*

	Disponibilidad	Peso	Ajuste	Tecnología disponible	Rango
<b>Factor de ponderación</b>	0.25	0.35	0.25	0.15	1
<b>Mercado local</b>	9 2.25	3 1.05	4 1.0	6 0.90	5.20
<b>Braid</b>	3 0.75	7 2.45	8 2.0	6 0.90	6.10
<b>Fibra de carbono</b>	1 0.25	9 3.15	8 2.0	1 0.15	5.55

Se intenta diseñar una suspensión lo más ligera posible, donde los aros de fibra de carbono resultan ideales, pero fabricar estos aros está fuera del alcance del proyecto, pues en el medio no existe la disponibilidad de materiales y de tecnología para realizar este proceso.

La decisión final fue por los aros Braid, que frente a los aros del mercado local, su menor peso y la capacidad de ajustarse al diseño de la suspensión son factores que se consideran importantes para la decisión, dado que estos aros fueron fabricados según las siguientes especificaciones enviadas al fabricante:

- **Braid Formrace** 7 in x 13in
- **Offset:** +5 mm
- **Diámetro interno:** 2,5 in
- **Peso final:** 3,25 kg

#### **Conceptos de solución para la selección de amortiguadores:**

Son dispositivos para controlar la oscilación natural de un resorte, usualmente constan de un pistón forzando a un gas o líquido a pasar a través de una o más válvulas. Debe amortiguar las masas suspendida y no suspendida del vehículo.

Los tres conceptos propuestos son:

- Concepto 1: Ohlins TTX25
- Concepto 2: Manitou Swinger
- Concepto 3: Kaz Tech Shocks 7800

*Tabla 2.9 Conceptos de solución para la selección de amortiguadores*

Concepto de Solución	Ohlins TTX25	Manitou Swinger	Kaz Tech Shocks 7800
			
	<p><b>Longitud:</b> 200 mm  <b>Recorrido:</b> 57 mm  <b>Peso:</b> 448 g sin muelle  <b>Rótula esférica</b>  <b>ID = 8 mm</b>  <b>Ancho esfera = 8 mm</b>  <b>OD = 15 mm</b></p>	<p><b>Longitud:</b> 190 mm  <b>Recorrido:</b> 63mm  <b>Peso:</b> 600 g                      Ajuste de compresión y rebote</p>	<p><b>Longitud:</b> 207 mm  <b>Recorrido:</b> 50 o 75 mm  <b>Peso:</b> 465 g sin muelle  <b>Rótula esférica</b>  <b>ID = 8 mm</b>  <b>Ancho esfera = 8 mm</b></p>

*Tabla 2.10 Matriz de decisión para la selección de amortiguadores*

	Disponibilidad	Costo	Capacidad de ajuste	Conocimiento	Rango
<b>Factor de ponderación</b>	0.2	0.3	0.2	0.3	1.0
Ohlins TTX25	4 / 0.8	3 / 0.9	7 / 1,40	3 / 0.9	4.00
Manitou Swinger	5 / 1	6 / 1.8	4 / 0.80	4 / 1,2	4.80
Kaz Tech Shocks 7800	3 / 0,6	3 / 0.90	7 / 1,40	3 / 0.9	3.80

En este caso se opta por los amortiguadores Manitou Swinger, dado el costo y la disponibilidad, además la poca experiencia al momento de elegirlos fue determinante ya que quienes trabajan en el medio quienes ayudaron con su experiencia.

### Conceptos de solución para los balancines (rocker):

Se selecciona el material del cual se construirán los balancines del sistema de suspensión cuando se realice el diseño de los mismos.

Los tres conceptos propuestos son:

- Concepto 1: chapa metálica ASTM A36
- Concepto 2: Mecanizado en aluminio 7075
- Concepto 3: Mecanizado en aleación de acero AISI 4140

*Tabla 2.11 Conceptos de solución para la fabricación de los balancines*

Concepto de Solución	Chapa metálica	Aluminio mecanizado	Acero mecanizado
			
Características del material	<b>ASTM A36</b> Densidad: 7,85 g/cm <sup>3</sup> Resistencia a la tracción 250Mpa	<b>Aluminio 7075-T6</b> Densidad: 2.81 g/cm <sup>3</sup> Resistencia a la tracción 572 Mpa	<b>AISI 4140</b> Densidad: 7.84 g/cm <sup>3</sup> Resistencia a la tracción: 700MPa

*Tabla 2.12 Matriz de decisión para la selección del material de los balancines*

	Disponibilidad del material	Costo	Peso	Disponibilidad de herramientas	Rango
<b>Factor de ponderación</b>	0,30	0,25	0,25	0,20	1
<b>Chapa metálica</b>	8 2,40	8 2,00	7 1,75	8 1,60	7,75
<b>Aluminio mecanizado</b>	2 0,60	3 0,75	8 2,00	5 1,00	4,35
<b>Acero mecanizado</b>	4 1,20	4 1,00	6 1,50	5 1,00	4,70

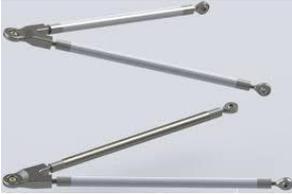
Se determina que la chapa metálica, es la solución más viable, por ser la económica al realizarla en corte por agua, que permite mejor precisión, y está disponible en el medio local.

### Conceptos de solución para el material de los brazos de suspensión:

La construcción de los brazos de suspensión se realiza considerando los siguientes conceptos propuestos y descritos en la tabla 2.13:

- Concepto 1: tubos de acero.
- Concepto 2: Tubos de aluminio.
- Concepto 3: Tubos fibra de carbono.

*Tabla 2.13 Conceptos de solución para el material de los brazos de suspensión.*

Concepto de Solución	Acero	Aluminio	Fibra de carbono
			

*Tabla 2.14 Matriz de decisión para la selección del material de los brazos de suspensión*

	Disponibilidad del material	Costo	Peso	Disponibilidad de herramientas	Rango
<b>Factor de ponderación</b>	0,30	0,30	0,20	0,20	1,0
<b>Acero</b>	9 2,70	9 2,70	3 0,60	8 1,60	7,60
<b>Aluminio</b>	3 0,90	4 1,20	6 1,20	5 1,00	4,30
<b>Fibra de carbono</b>	1 0,30	1 0,30	9 1,80	1 0,20	2,60

Finalmente el material a utilizar para los brazos de suspensión es el acero, dado que es más accesible por ser producido localmente, lo que reduce en gran medida el costo frente a los dos conceptos disponibles.

### Conceptos de solución para el método de unión de la suspensión al chasis:

Los anclajes de unión entre los brazos de suspensión y el chasis del vehículo son elegidos entre los siguientes propuestos:

Los tres conceptos propuestos son:

- Concepto 1: Placas de chapa metálica.
- Concepto 2: Perfil de acero.
- Concepto 3: Acero mecanizado.

*Tabla 2.15 Conceptos de solución a la unión chasis-suspensión.*

Concepto de Solución	Chapa metálica	Perfil de acero	Acero mecanizado
			

*Tabla 2.16 Matriz de decisión para la selección del método de unión chasis-suspensión.*

	Disponibilidad del material	Costo	Precisión al ensamblar	Acceso a máquinas y herramientas	Rango
<b>Factor de ponderación</b>	0,40	0,20	0,25	0,15	1
<b>Chapa metálica</b>	8 3,20	5 1,00	8 2,00	6 0,90	7,10
<b>Perfil de acero</b>	6 2,40	8 1,60	7 1,75	8 1,20	6,95
<b>Acero mecanizado</b>	4 1,60	3 0,60	6 1,50	3 0,45	4,15

El concepto de la chapa metálica dada la mayor precisión que permite al ensamblar el sistema de suspensión, pues se utiliza corte por agua para su fabricación, reduciendo las desviaciones al momento del ensamble.

### Conceptos de solución para el material de los bujes de suspensión:

Se selecciona el material del cual se construirán los bujes y elementos de unión de partes del sistema de suspensión como rockers, brazos de suspensión, bieleta de dirección.

Los tres conceptos propuestos son:

- Concepto 1: AISI 1018
- Concepto 2: Aluminio 7075
- Concepto 3: AISI 4140

**Tabla 2.17** Conceptos de solución para la fabricación de bujes de la suspensión.

Concepto de Solución	AISI 1018	Aluminio 7075
Características del material	<b>AISI 1018</b> Densidad: 7.87 g/ cm <sup>3</sup> Resistencia a la tracción: 440 MPa	<b>Aluminio 7075-T6</b> Densidad: 2.81 g/ cm <sup>3</sup> Resistencia a la tracción 572 Mpa

**Tabla 2.18** Matriz de decisión para la selección del material de los bujes de suspensión.

	Disponibilidad del material	Costo	Peso	Facilidad de unión	Rango
<b>Factor de ponderación</b>	0,30	0,25	0,25	0,20	1.0
<b>AISI 1018</b>	8 2,40	8 2,00	7 1,75	8 1,60	7,75
<b>Aluminio 7075</b>	2 0,60	3 0,75	8 2,00	5 1,00	4,35

Se determina que el acero AISI 1018, es la solución más viable, ya que permite unir los bujes con las partes de la suspensión por medio de soldadura, además es la económica por su disponibilidad en el medio local. Por otra parte el mecanizado del material presenta mayor facilidad en el acero escogido.

**Conceptos de solución para el material de los pernos de anclaje del amortiguador y balancín:**

El material del que se construyen los pernos para el anclaje del balancín y amortiguador, es de gran importancia, pues aquí actúan las fuerzas de mayor magnitud de la suspensión. Además al estar sometidos a una fuerza cortante simple requieren de mayor resistencia mecánica.

Los tres conceptos propuestos son:

- Concepto 1: AISI 4340
- Concepto 2: AISI 1018

*Tabla 2.19 Conceptos de solución para la fabricación de bujes de la suspensión.*

<b>Concepto de Solución</b>	<b>AISI 1018</b>	<b>AISI 4340</b>
Características del material	<b>AISI 1018</b> Densidad: 7.87 g/ cm <sup>3</sup> Resistencia a la tracción: 440 MPa	<b>AISI 4340</b> Densidad: 7.85 g/ cm <sup>3</sup> Resistencia a la tracción 745 Mpa

*Tabla 2.20 Matriz de decisión para la selección del material de los anclajes amortiguador balancín.*

	<b>Disponibilidad del material</b>	<b>Resistencia mecánica</b>	<b>Maquinabilidad</b>	<b>Soldabilidad</b>	<b>Rango</b>
<b>Factor de ponderación</b>	0,30	0,40	0,20	0,20	1.0
<b>AISI 1018</b>	8,00 1,60	4,40 1,76	7,60 1,52	7,00 1,40	6,28
<b>AISI 4340</b>	8,00 1,60	7,45 2,98	5,00 1,00	6,00 1,20	6,78

Se determina que el acero AISI 4340, es la solución adecuada. Siendo un material disponible en el medio, aun cuando su maquinabilidad y soldabilidad es menor, brinda mayor resistencia mecánica en alrededor del 69% sobre el acero de transmisión (AISI 1018).

## 2.4 Diseño de la geometría de la suspensión

La geometría de la suspensión se diseña de tal manera que cumpla con el reglamento Formula SAE y brinde el mejor comportamiento del vehículo en pista. Los elementos de la suspensión deben resistir todas las cargas a las que va a estar sometido el monoplaza con la finalidad de que sus elementos no fallen durante las pruebas dinámicas.

Primero se selecciona la distancia entre los ejes del vehículo y el ancho de vía, para ello se realiza una recopilación de los datos de monoplazas de otros equipos en años anteriores obteniendo diferentes valores de tiempo por vuelta [21].

*Tabla 2.21 Tiempos de vuelta para diferentes distancias entre ejes. [21]*

<b>Distancia entre Ejes</b>	<b>Tiempo de Vuelta (s)</b>
1300	11,44
1400	11,41
1500	11,38
1600	11,36
1700	11,34
1800	11,32
1900	11,31

Al incrementar la distancia entre ejes incrementa la capacidad del frenado, mientras que al disminuirla incrementa el agarre en aceleración. La tabla 2.21 muestra los beneficios de incrementar la distancia entre ejes pero no la desventaja del aumento de pesos y mayores cargas en el chasis.

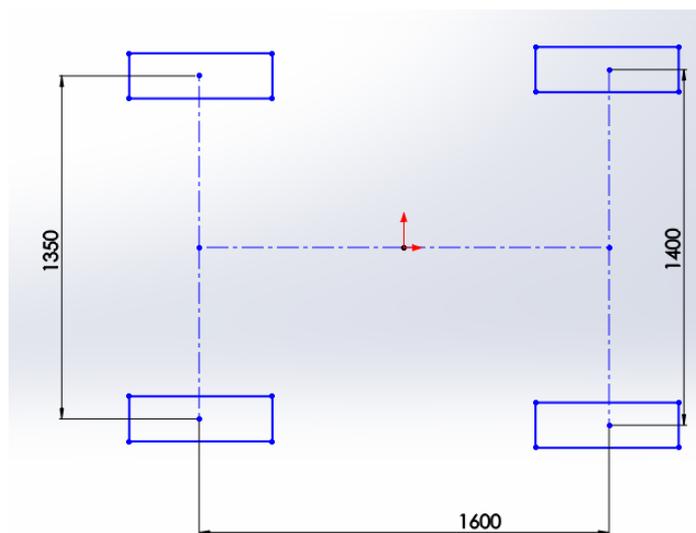
Al incrementar la capacidad de frenado permite más tiempo de aceleración en velocidades elevadas antes que haya una reducción de la misma para ingresar a una curva lo que permite mayor velocidades por un periodo de tiempo más corto. Se establece una distancia entre ejes de 1600 mm que es mayor a 1525mm que es la mínima requerida.

**Tabla 2.22** Tiempo de vuelta para diferente ancho de vía. [21]

Ancho de vía	Tiempo de Vuelta (s)
1200	11,37
1233	11,36
1245	11,35
1300	11,34
1400	11,32
1500	11,29
1600	11,28
1700	11,26

En la tabla 2.22 se observa que el incrementar el ancho de vía se obtiene un mejor rendimiento del vehículo en curva, debido a que a mayor ancho de vía menor tiempo en la misma. De la tabla se observa que incrementar el ancho de vía de 1100 mm a 1700 mm se reduce en 1,3% el tiempo lo cual no es significativo tomando en cuenta el aumento de peso y el ancho del vehículo, lo que hace más difícil de manejar el monoplaça por pista.

En la investigación se observa que el ancho de vía posterior es menor que el delantero para obtener mayor maniobrabilidad en curvas cerradas y además tener mayor adherencia en las ruedas posteriores a la salida de la curva. Se establece un ancho de vía delantero de 1400 mm y posterior de 1350 mm por ser el primer año.



**Figura 2.7** Distancia entre ejes y anchos de vía posterior y delantero

## 2.4.1 Diseño de la geometría de la suspensión en vista frontal

Se propone el diseño de la suspensión en vista frontal para determinar la posición de los elementos, tomando en cuenta ciertos parámetros geométricos que debe cumplir el sistema con la finalidad de tener un buen funcionamiento.

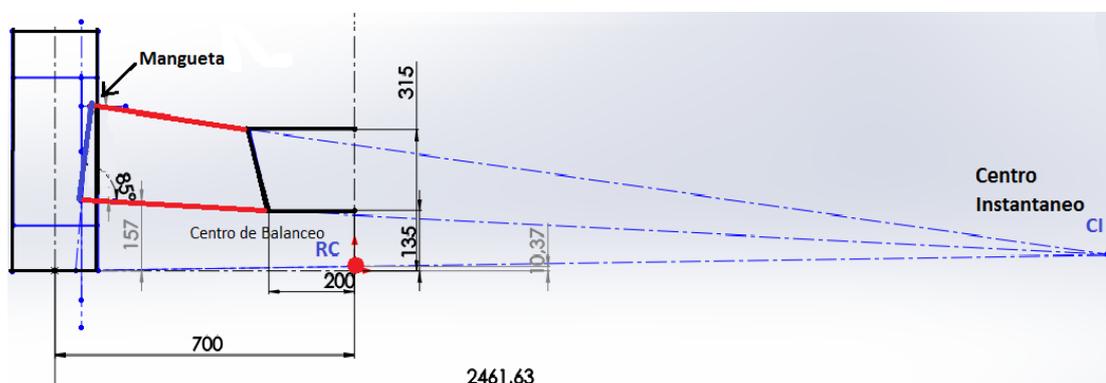
### 2.4.1.1 Posición de los brazos de suspensión

Existen varios aspectos que se deben tomar en cuenta al momento de diseñar la suspensión en vista frontal, estos son los centros instantáneos, la ganancia del camber y la posición del centro de balanceo.

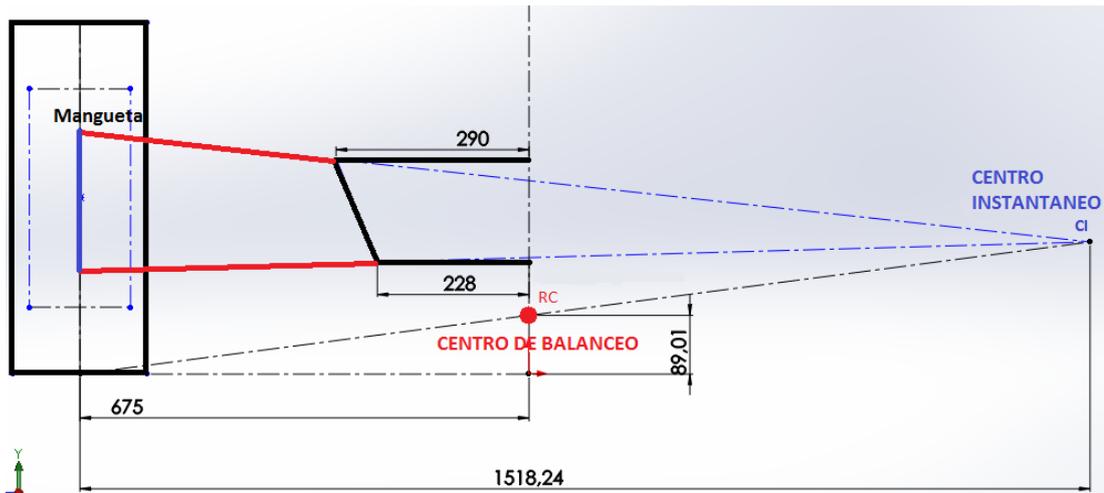
En el diseño de estos parámetros se toma en cuenta la posición de los brazos de suspensión debido a que estos determinan factores importantes en el diseño de la suspensión, este estudio se lo realiza con un trabajo en conjunto con el equipo de chasis y manguetas para determinar los anclajes entre elementos.

En vista frontal se determina la posición de los brazos de suspensión, para ello se parte de los puntos de anclaje de la mangueta y el chasis; se determina que los brazos inferiores serán más largos que los brazos superiores con la finalidad de que la tasa de cambio del camber sea progresiva y mantener el centro de balanceo lo más bajo posible en el eje delantero.

En el eje posterior se determina que los brazos inferiores serán más largos que los superiores, manteniendo un centro de balanceo más alto y garantizando una tasa de cambio del camber progresiva.



*Figura 2.8 Centro Instantáneo (CI) y Centro de Balanceo (RC) del eje delantero*



**Figura 2.9** Centro Instantáneo (CI) y Centro de Balanceo (RC) del eje posterior

Con esta configuración de los brazos de suspensión se determina que: los centros instantáneos de la parte delantera y posterior son de 2461,63 mm y 1518,24mm respectivamente, al igual que la altura sobre el suelo de los centros de balanceo generados son de 10,37 mm y 89,01 mm respectivamente.

Se determina la tasa de cambio del camber en las ruedas de los ejes mediante la siguiente fórmula [16]:

$$\text{Tasa de Cambio del Camber} = \text{Tan}^{-1} \left( \frac{1}{\text{Distancia al Centro Instantaneo}} \right)$$

Distancia al centro instantáneo delantero:

$$\text{Tasa de Cambio del Camber} = \text{Tan}^{-1} \left( \frac{1}{2461,63} \right)$$

$$\text{Tasa de Cambio del Camber} = 0,02327 \text{ } ^\circ/\text{mm}$$

$$\text{Tasa de Cambio del Camber} = 0,6 \text{ } ^\circ/\text{in}$$

Se determina que la tasa de cambio del camber es de 0,6°/in, lo que indica que en los 60 mm de recorrido del neumático el cambio total de camber en la rueda será de 1,42 °/in, lo cual demuestra que al partir de -1,5 grados de camber estático permitirá que nuestra llanta no genere un ángulo de camber positivo.

Distancia al centro instantáneo posterior:

$$\text{Tasa de Cambio del Camber} = \text{Tan}^{-1} \left( \frac{1}{1518} \right)$$

$$\text{Tasa de Cambio del Camber} = 0,0377 \text{ } ^\circ/\text{mm}$$

$$\text{Tasa de Cambio del Camber} = 0,96 \text{ } ^\circ/\text{in}$$

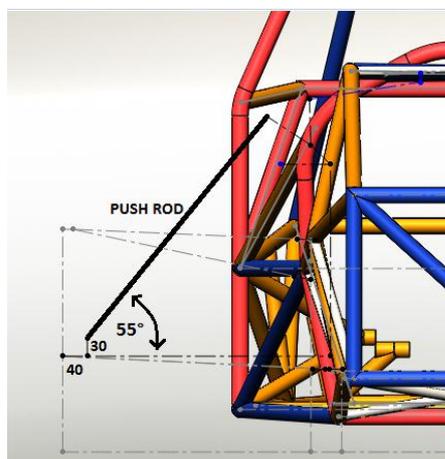
Se determina que la tasa de cambio del camber en el eje posterior es de  $0,96^{\circ}/\text{in}$ , lo que indica que en los 60 mm de recorrido del neumático el cambio total de camber en la rueda será de  $2,27^{\circ}/\text{in}$ .

Con este valor, se determina que el camber estático de  $-1,5$  grados, permitirá que la llanta llegue a un mínimo de  $0,77$  grados de camber positivo, siendo un valor aceptable para generar buena tracción en el eje posterior del vehículo.

#### 2.4.1.2 Posición del Push rod

Para la ubicación del push rod en el plano frontal se toman en cuenta dos factores, primero que la posición de anclaje en los brazos inferiores esté lo más cerca de la mangueta con la finalidad de que las fuerzas estén bien repartidas hacia la misma, y segundo que permita un buen accionar del balancín dentro del sistema.

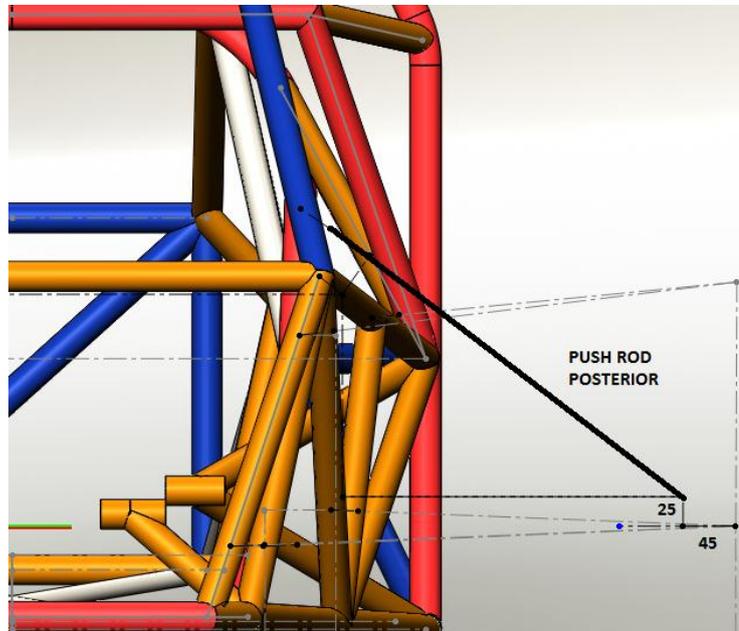
Para ello se determina que la posición del anclaje del push rod en la parte delantera se encuentra a 40 mm del anclaje del brazo inferior con la mangueta, luego se dirige hacia la parte de los soportes del arco principal delantero del chasis donde se ubican el balancín y amortiguador. La disposición se puede observar en la siguiente figura:



*Figura 2.10 Ubicación del push rod delantero en vista frontal*

Como se observa en la figura 2.10 el punto de anclaje del push rod se ubica a 40 mm de la mangueta y con un ángulo de 55 grados el cual permite que el balancín actúe lo más perpendicular al push rod para que las fuerzas sean transmitidas de mejor manera.

Para la parte posterior se determina de la misma manera, el anclaje de la parte inferior se ubica a 40 mm del anclaje del brazo inferior con la mangueta y luego se dirige hacia la parte del chasis donde se encuentra anclado el motor, donde se ubican el balancín y amortiguador, la disposición se puede observar en la siguiente figura:



*Figura 2.11 Ubicación del push rod posterior en vista posterior*

## **2.4.2 Diseño de la geometría de la suspensión en vista lateral**

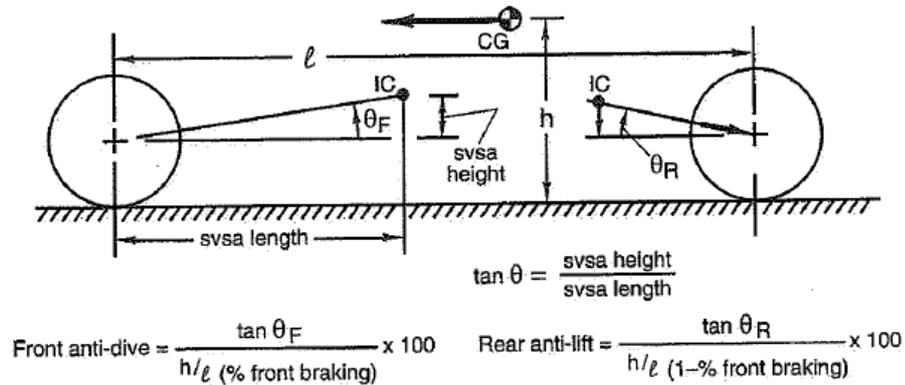
A continuación se propone el diseño de la suspensión en vista frontal para determinar la posición de los elementos, tomando en cuenta ciertos parámetros geométricos que debe cumplir el sistema con la finalidad de un buen funcionamiento.

### **2.4.2.1 Posición de los brazos de suspensión**

Para el diseño de la suspensión en vista lateral, se toman en cuenta tres aspectos fundamentales: los centros instantáneos formados por los brazos de suspensión, el anti-hundimiento y anti-levantamiento del vehículo.

En el diseño, se determinan los puntos de anclaje en la mangueta y en el chasis conjuntamente con los equipos respectivos, partiendo desde los ángulos que se le da a la mangueta en vista lateral y tomando en cuenta los puntos nodales en el chasis para una buena distribución de esfuerzos en el mismo.

Como se observa en la siguiente figura, el anti-hundimiento y anti-levantamiento aplicados en un vehículo permiten, que un porcentaje de las fuerzas generadas en aceleración y frenada, se transmitan hacia los brazos de suspensión evitando que actúen directamente sobre los muelles.



**Figura 2.12** Anti-levantamiento y anti-hundimiento de la suspensión [16]

Para establecer la cantidad de anti hundimiento y anti levantamiento de la suspensión se determina con el siguiente cálculo la posición requerida para ubicar los brazos:

Se requiere un anti-hundimiento en la parte delantera del 20%, valor determinado por investigación bibliográfica [21], se procede a calcular el ángulo, en vista lateral, al que deben estar dirigidos los brazos de suspensión con la finalidad de tener un centro instantáneo que cumpla con el requerimiento:

$$\text{Antihundimiento} = \frac{\tan \theta_F * l}{h * (\% \text{frenado delantero})} * 100$$

$$\tan \theta_F = \frac{(\% \text{ Antihundimiento}) * h * (\% \text{frenado delantero})}{l}$$

En donde:

***l***: Distancia entre ejes = 1600 mm

***h***: Altura del CG = 317 mm

**%Antihundimiento requerido**: 20%

**% Frenado delantero**: 60%

Reemplazando:

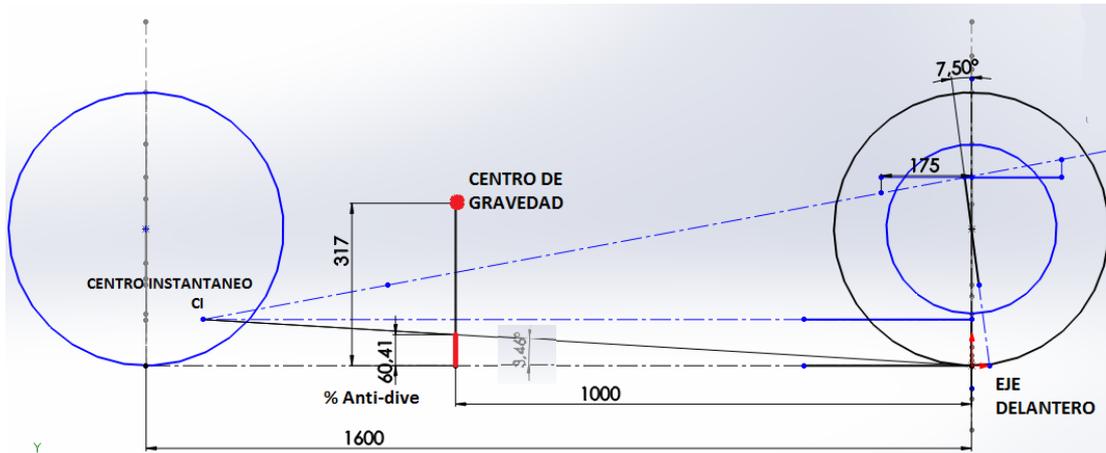
$$\tan \theta_F = \frac{0,20 * 317 \text{ mm} * 0,60}{1600 \text{ mm}}$$

$$\tan \theta_F = \frac{0,20 * 317mm * 0,60}{1600mm}$$

$$\tan \theta_F = 0,0238rad$$

$$\theta_F = \text{Tan}^{-1}0,0238rad$$

$$\theta_F = 1,36^\circ$$



**Figura 2.13** Anti-hundimiento de la suspensión

Como se observa en la figura, se coloca el brazo superior delantero con una inclinación, este brazo produce un centro instantáneo cuya prolongación genera un porcentaje de anti-hundimiento de 60,41 mm con respecto a los 317 mm del centro de gravedad, lo cual significa un 19,05%.

Se determina un Anti levantamiento en la parte posterior del 25%, por lo tanto se procede a calcular el ángulo, en vista lateral, al que deben estar dirigidos los brazos de suspensión del eje posterior para determinar la posición del centro instantáneo:

$$\text{Antilevantamiento} = \frac{\tan \theta_R * l}{h * (1 - \%frenado\ delantero)} * 100$$

$$\tan \theta_R = \frac{(\% \text{Antilevantamiento}) * h * (\%frenado\ posterior)}{l}$$

En donde:

***l***: Distancia entre ejes = 1600 mm

***h***: Altura del CG = 317 mm

**%Antilevantamiento requerido**: 25%

**% Frenado delantero**: 40%

Reemplazando:

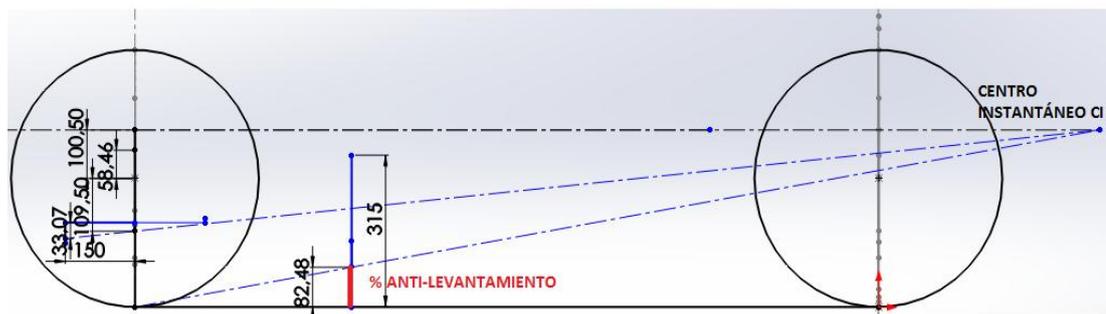
$$\tan \theta_R = \frac{0,25 * 317mm * 0,40}{1600mm}$$

$$\tan \theta_R = \frac{0,25 * 317mm * 0,40}{1600mm}$$

$$\tan \theta_R = 0,0198rad$$

$$\theta_R = \text{Tan}^{-1}0,0198rad$$

$$\theta_R = 1,13^\circ$$



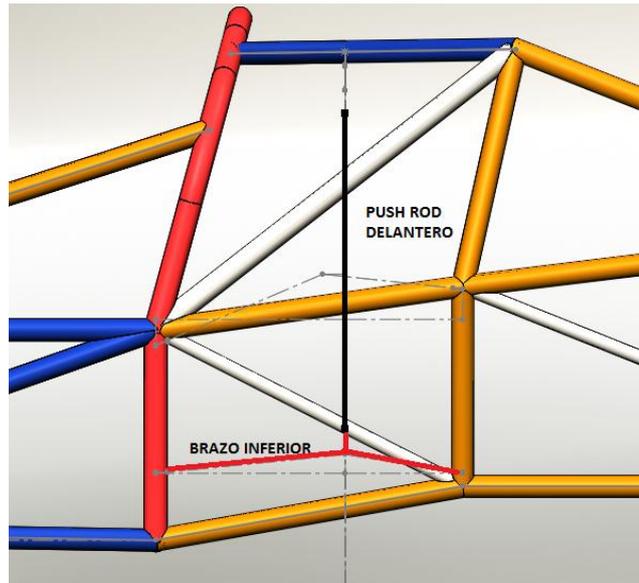
**Figura 2.14** Anti-levantamiento de la suspensión

Como se observa en la figura, se coloca el brazo inferior posterior con una inclinación, este brazo produce un centro instantáneo cuya prolongación genera un porcentaje de anti-levantamiento de 82,48 mm con respecto a los 317 mm del centro de gravedad, lo cual significa un 26%.

### **Posición del push rod delantero y posterior**

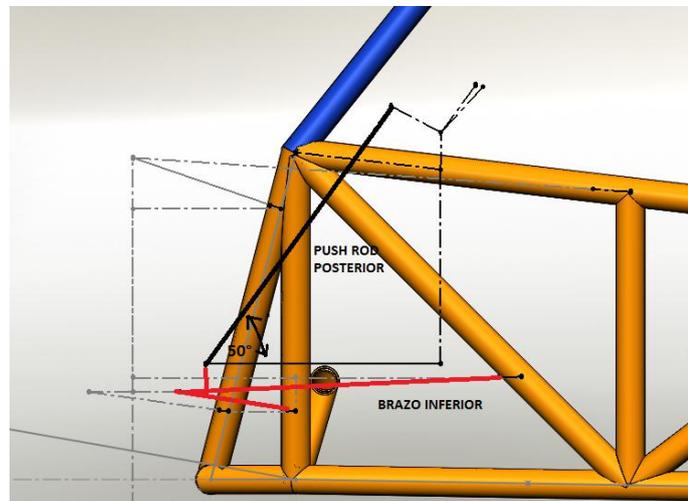
Para la ubicación del push en la vista lateral se toman en cuenta dos factores, primero que la dirección del push rod sea de tal manera que permita un actuar perpendicular con la rueda y segundo que permita un buen accionar del balancín dentro del sistema.

En la parte delantera se ubica el push de tal manera que esté perpendicular a la rueda, con la finalidad de que el actuar del mismo sea de forma sencilla; además se dirige hacia la parte superior del chasis donde se une con el balancín y el amortiguador, la disposición se puede observar en la siguiente figura:



*Figura 2.15 Vista lateral del push rod delantero*

En el eje posterior debido a que los amortiguadores no se ubican en línea recta al eje posterior, no se puede ubicar el push de forma perpendicular, además se encuentran los paliers del diferencial dificultando el diseño, por lo cual se ubica el push con una inclinación de  $50^\circ$  hacia la parte delantera de la siguiente manera:

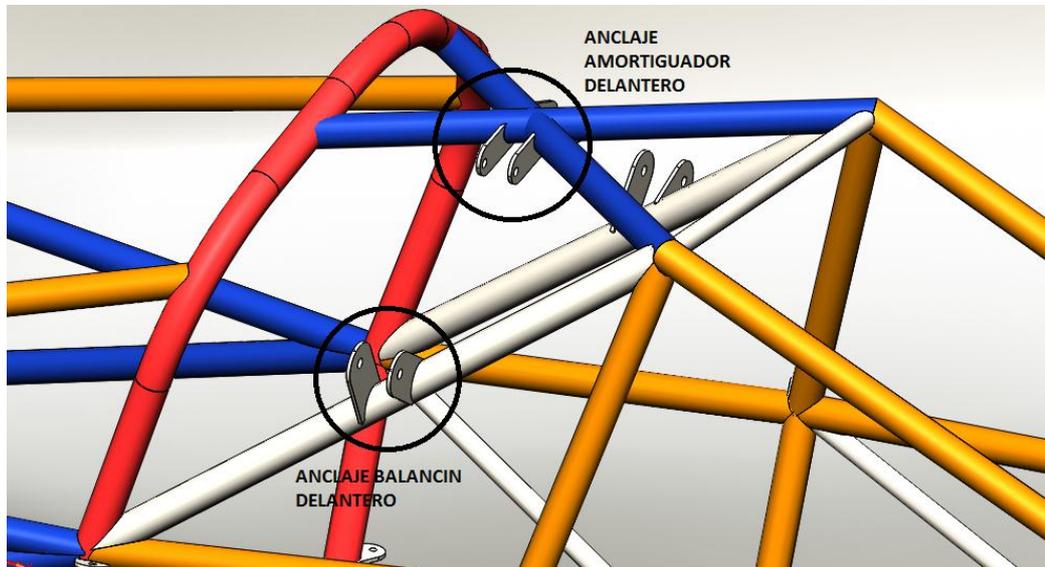


*Figura 2.16 Vista lateral del push rod posterior*

### **2.4.3 Posición de los balancines y amortiguadores**

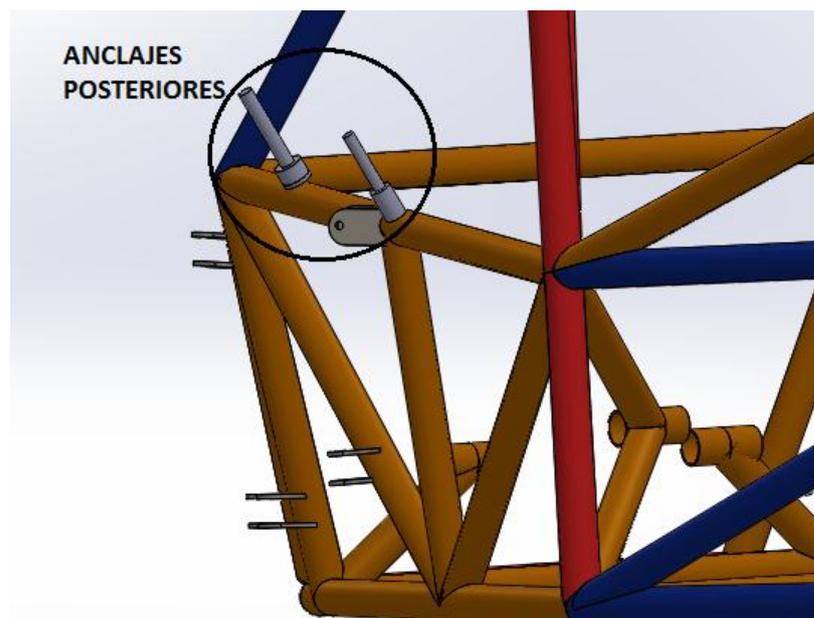
Para la ubicación de los balancines con el amortiguador se ha tomado en cuenta dos factores: primero que la parte del chasis donde va a ser ubicado el amortiguador y el balancín sea resistente y segundo que la posición de los anclajes permita actuar al amortiguador y al balancín en un mismo plano.

Mediante un trabajo conjunto con el equipo de chasis se ubican los anclajes de los amortiguadores y el balancín delanteros en la parte superior del chasis, justo en la triangulación de los soportes del arco principal delantero para un buen reparto de las fuerzas en el chasis como se observa en la figura:



*Figura 2.17 Soportes del balancín y amortiguador delantero*

Para la parte posterior debido a que el push rod tiene otra posición y no está en un ángulo perpendicular, se opta por ubicar anclajes soldados en el chasis, de tal manera que tengan el ángulo correcto para un buen funcionamiento del balancín y el amortiguador.



*Figura 2.18 Soportes del balancín posterior*

#### 2.4.4 Balancín

Para transferir la carga desde el push rod hacia los amortiguadores se utiliza un balancín, este balancín es diseñado de tal manera que cumpla una relación de movimiento entre el recorrido de la rueda y el recorrido del amortiguador para un buen funcionamiento del sistema.

Las reglas de la competencia establecen un recorrido de la llanta de mínimo 50.8 mm (2 pulgadas) y los amortiguadores Manitou Swinger tienen un recorrido de 63mm. Para el diseño donde se usa un recorrido del neumático de 60mm, la relación de movimiento es:

$$MR = \frac{WT}{ST}$$

En donde:

*WT = Recorrido de la llanta*

*ST = Recorrido del resorte*

*MR = Relacion de movimiento*

$$MR = \frac{63}{60}$$

$$MR = 1,05$$

Para el diseño del balancín se toma en cuenta la relación de movimiento tanto para la parte delantera como para la posterior, se calcula el movimiento para el rebote requerido en el diseño, para ello se encuentra la distancia que recorre el resorte con el peso del vehículo.

$$s(m) = \frac{W(N)}{k\left(\frac{N}{m}\right)}$$

Para la parte delantera se utilizan resortes de 28,25 N/m (250 lb/in) y para la parte posterior se utilizan resortes de 22,6 N/m (200 lb/in), este valor se determina por estudio bibliográfico.

Recorrido del resorte con el peso del eje delantero.

$$s(m) = \frac{\left(\frac{193,88}{2} kg\right) * 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right)}{\frac{(250 * 4,4482) * 1000}{1 * 30} \left(\frac{N}{m}\right)}$$
$$s(m) = 25,65mm$$

Recorrido del resorte con el peso del eje posterior

$$s(m) = \frac{\left(\frac{176,12}{2} kg\right) * 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right)}{\frac{(200 * 4,4482) * 1000}{1 * 30} \left(\frac{N}{m}\right)}$$
$$s(m) = 29,13mm$$

### **Relaciones de movimiento**

La relación de movimiento es la relación que hay entre el recorrido del neumático y el recorrido del resorte, esta relación determina las dimensiones a utilizar en el balancín para un correcto actuar del sistema de suspensión.

La relación de movimiento se calcula a partir de la relación del rebote del neumático (30mm) y la distancia que recorre el amortiguador con el peso del vehículo para cada neumático.

#### **Relación de movimiento en el eje delantero:**

$$\text{Relación de movimiento} = \frac{\text{Mínimo rebote del recorrido del neumático}}{\text{Recorrido del resorte}}$$

$$\text{Relación de movimiento} = \frac{30}{25,65}$$

$$\text{Relación de movimiento} = 1,17$$

#### **Relación de movimiento en el eje posterior:**

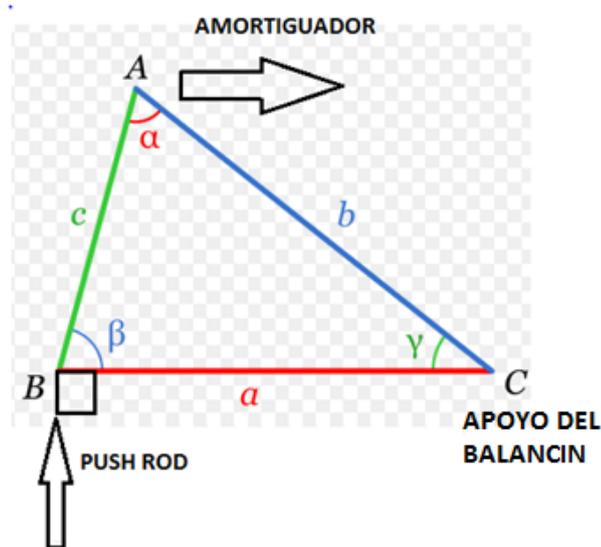
$$\text{Relación de movimiento} = \frac{\text{Mínimo rebote del recorrido del neumático}}{\text{Recorrido del resorte}}$$

$$\text{Relación de movimiento} = \frac{30}{29,13}$$

$$\text{Relación de movimiento} = 1,03$$

Se requieren relaciones de movimiento de 1,17 en el eje delantero y de 1,03 en el eje posterior para que el movimiento de recorrido de la rueda sea el requerido por el diseño.

Para el diseño del balancín delantero se utilizan las relaciones de los triángulos formados por el push y el balancín el cual es de  $55^\circ$  como se observa en la figura, se establece un valor de 75 mm al lado b que va conectado hacia el amortiguador, por lo tanto debido a una relación de 1,17 que debe tener el balancín se obtiene un valor de 87,75; el resto de valores se calcula mediante relaciones como se observa en la figura:



**Figura 2.19** Geometría del balancín delantero

$$\frac{a}{\text{Sen } \alpha} = \frac{b}{\text{Sen } \beta} = \frac{c}{\text{Sen } \gamma}$$

En donde:

$$a = \text{lado del push} = 87,7$$

$$b = \text{lado del amortiguador} = 75$$

$$\beta = \text{Ángulo que forma el balancín con el rocker} = 55^\circ$$

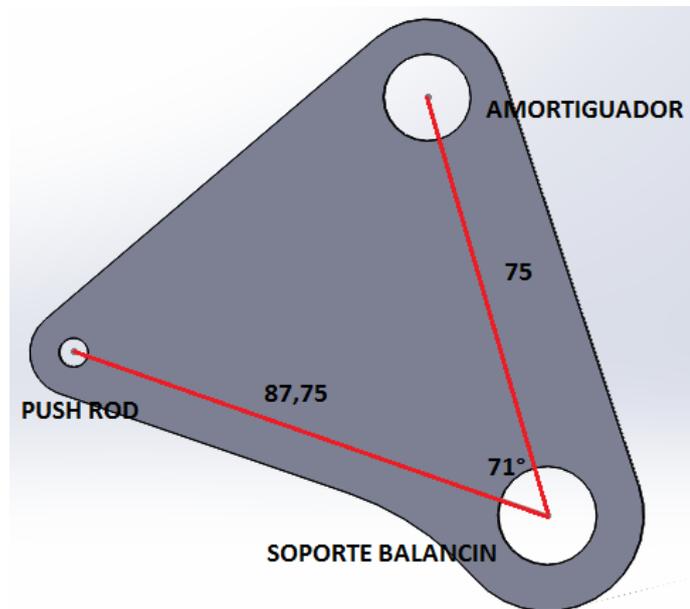
$$\frac{b}{\text{Sen } \beta} = \frac{c}{\text{Sen } \gamma}$$

Reemplazando

$$\frac{75}{\text{Sen } 55^\circ} = \frac{87,75}{\text{Sen } \gamma}$$

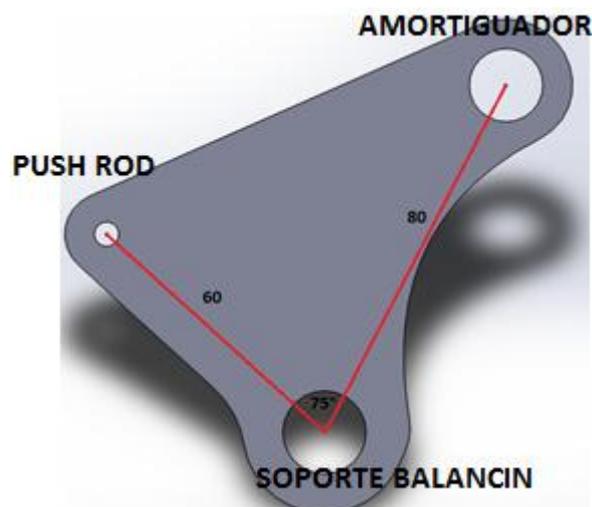
$$\gamma = 71^\circ$$

Por lo tanto se requiere un ángulo de  $71^\circ$  para obtener la relación de movimiento deseada en el eje delantero.



*Figura 2.20* Balancín delantero

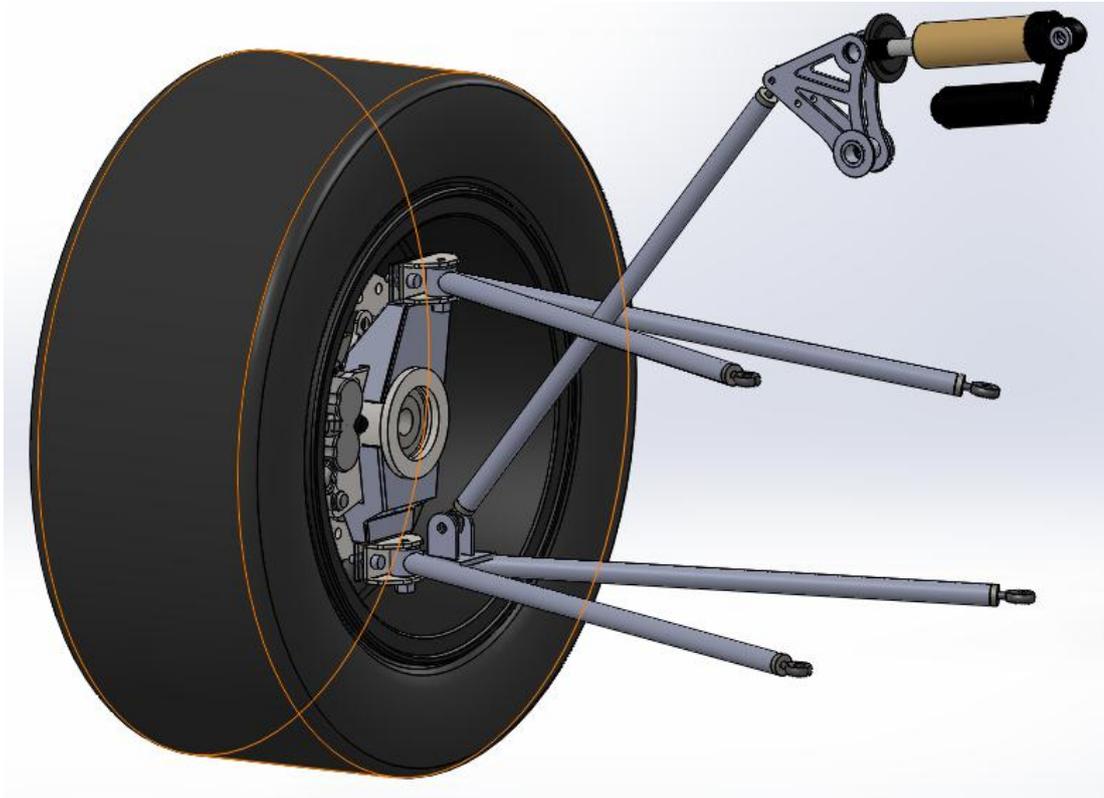
Para el diseño del balancín posterior debido a que no se trabaja en un solo plano, no se pueden realizar los mismos cálculos para obtener las dimensiones del balancín. Para el eje posterior se establece un balancín capaz de cumplir con el recorrido de la llanta y a la vez el máximo recorrido del amortiguador por medio de SolidWorks, obteniendo los siguientes resultados.



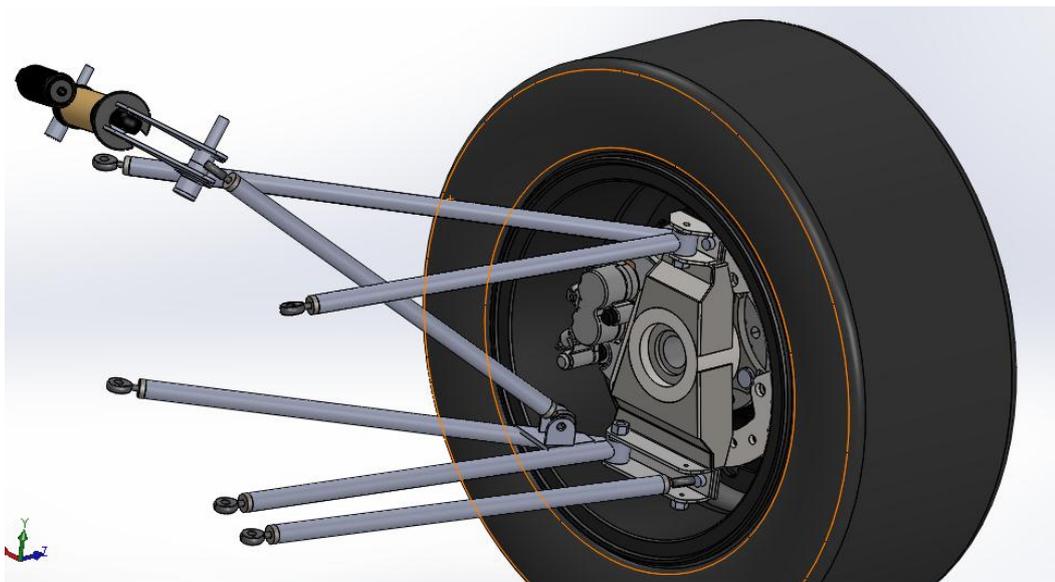
*Figura 2.21* Balancín posterior

### 2.4.5 Ensamble en 3D

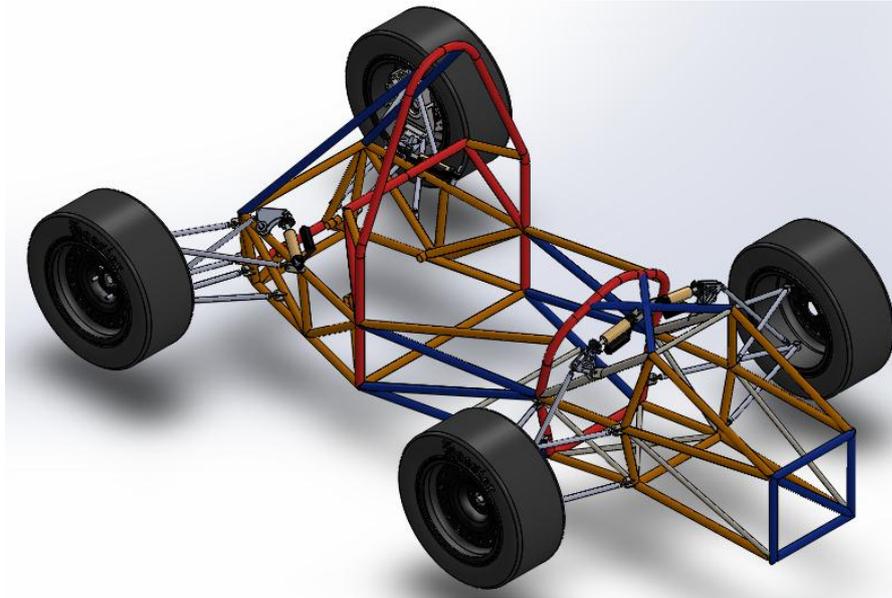
Una vez determinada la dimensión y posición de todos los elementos del sistema, se realiza el ensamble en 3D de la suspensión con la finalidad de observar que no haya ninguna interferencia entre los elementos.



*Figura 2.22 Ensamble del sistema de suspensión delantera en la rueda derecha*



*Figura 2.23 Ensamble del sistema de suspensión posterior en la rueda derecha*



*Figura 2.24* Ensamble del sistema de suspensión con la estructura tubular del chasis

Se observa que ninguno de los elementos interfiere entre sí, con lo cual se procede a realizar el análisis de cargas en cada uno de los componentes con la finalidad de determinar los materiales y dimensiones de cada componente.

## **2.5 Análisis de cargas en el sistema de suspensión**

Debido a las fuerzas presentes en el sistema de suspensión, este puede llegar a fallar, debido a esto se debe analizar cuidadosamente las fuerzas que se generan dentro de la pista como son: transferencia de masas, antivuelco, fuerzas lateral y obstáculo. Determinar estas fuerzas servirá para el análisis por medio de elementos finitos para el diseño de los elementos.

### **2.5.1 Ubicación del centro de gravedad**

Para determinar la ubicación del centro de gravedad, se trabajó conjuntamente con el equipo de chasis [22] y se determina que la ubicación del centro de gravedad es la siguiente:

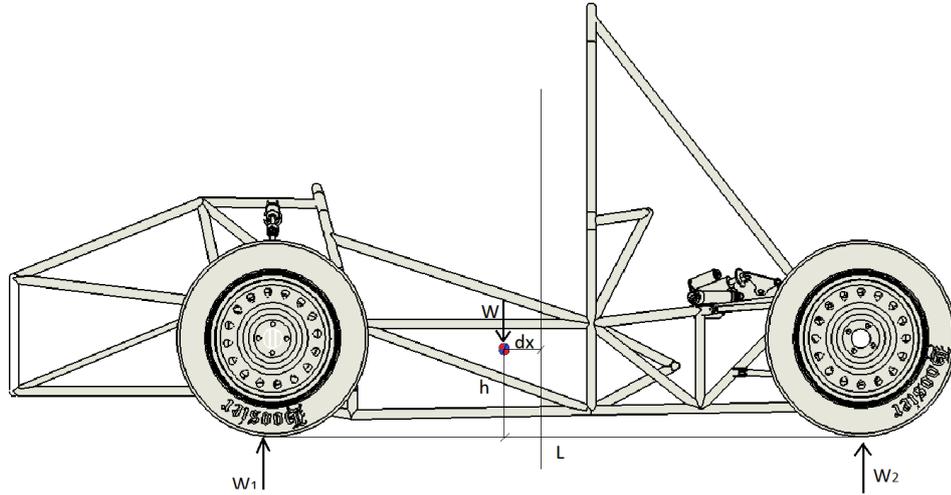
Altura del centro de gravedad:

$$h = 317.4 \text{ mm}$$

Ubicación longitudinal del centro de gravedad:

$$dx = 38.65 \text{ mm}$$

Con base en datos obtenidos de la ubicación del centro de gravedad, se calcula la repartición de masas en los ejes del vehículo. Para ello se utiliza solo la coordenada en el eje x, considerando el diagrama de cuerpo libre del vehículo como se muestra en la figura:



**Figura 2.25** Distribución de masas del vehículo

$$\sum MA = 0 \quad \curvearrow +$$

$$W_2 * b - W \left( \frac{l}{2} - dx \right) = 0$$

$$\sum MB = 0 \quad \curvearrow +$$

$$-W_1 * b + W \left( \frac{l}{2} + dx \right) = 0$$

Despejando  $W_1$  y  $W_2$  obtenemos:

$$W_1 = \frac{W}{2} + \frac{W * dx}{l}$$

$$W_2 = \frac{W}{2} - \frac{W * dx}{l}$$

En donde:

$W_1$  : Distribución de masas en el eje delantero

$W_2$  : Distribución de masas en el eje posterior

$W$  : Peso del vehículo = 100%

$l$  : Distancia entre ejes = 1600 mm

$dx$  : Ubicación longitudinal del CG desde el eje neutro = 38.65mm

Reemplazando en las ecuaciones:

$$W_1 = \frac{100\%}{2} + \frac{100\% * 38.65mm}{1600mm} = 52.4\%$$

$$W_2 = \frac{100\%}{2} - \frac{100\% * 38.65mm}{1600mm} = 47.6\%$$

La distribución de masas en el eje delantero es de 52,4% y en el eje posterior es de 47,6%, es importante recalcar que esta distribución es el porcentaje de masa en cada eje partiendo desde las masas principales del vehículo.

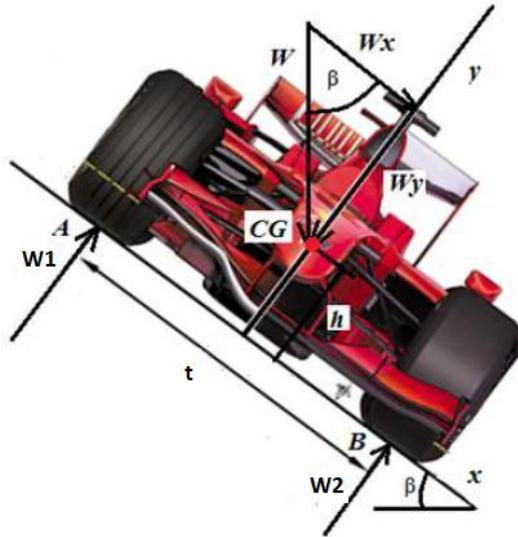
Para un valor establecido de peso del vehículo de 370 kg obtenemos que 193.88 kg se ubican en el eje delantero y 176.12 kg en el eje posterior.

### **2.5.2 Cálculo antivuelco**

Una vez ubicada la altura del centro de gravedad, se procede a realizar los cálculos para verificar que el vehículo pueda cumplir con la prueba de inclinación establecida por el Reglamento FSAE.

Para la prueba de inclinación se coloca el vehículo sobre una plataforma y se lo inclina a 60 grados con respecto al piso, con lo cual se simula una aceleración lateral de 1,75g.

La prueba de inclinación permite garantizar la estabilidad del vehículo en curva, además permite realizar una nueva distribución de masas en caso del fallo de la misma, para ello se realiza un diagrama de cuerpo libre seguido de un cálculo estático como se observa en la figura:



**Figura 2.26** Análisis de cargas en la prueba de inclinación

$$\sum MB = 0 \quad \curvearrowright +$$

$$W_y * \frac{t}{2} - W_x * h - W_1 * t = 0$$

$$W * \cos\beta * \frac{t}{2} - W * \sin\beta * h - W_1 * t = 0$$

Para que exista vuelco, se necesita que  $W_1$  sea 0, despejando  $\beta$  tenemos:

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{t}{2 * h}\right)$$

En donde:

**t:** Ancho de vía = 1400 mm

**h:** Altura del CG = 317 mm

**$\beta$ :** Inclinación máxima

Reemplazando en la ecuación se tiene:

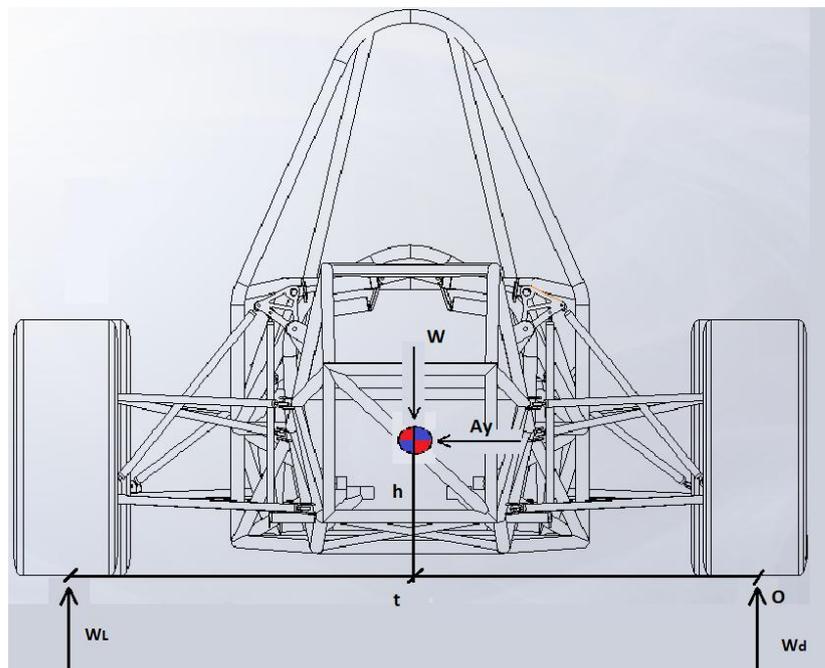
$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{1400\text{mm}}{2 * 317\text{mm}}\right) = 62.63^\circ$$

Se verifica que el vehículo resiste los 62,63 grados antes de volcar, por lo cual con la distribución de masas obtenidas se establece que el vehículo pasa la prueba satisfactoriamente.

### 2.5.3 Transferencia de masa lateral

Cuando el vehículo pasa por una curva, se presenta una fuerza centrífuga que hace que la masa del monoplaza se transfiera del lado interno de la curva al exterior, es importante saber qué cantidad de masa se transfiere para poder determinar los materiales para la construcción de los elementos.

Se realizan los cálculos asumiendo un peso del vehículo y piloto ( $W$ ) de 370 Kg, y la distribución se la realiza para el eje delantero con un valor de  $W_d$  193.88kg:



**Figura 2.27** Transferencia de masa lateral

$$\sum M_o = 0 \quad \curvearrow +$$

$$W_L * t = W_d \frac{t}{2} + W_d * A_y * h = 0$$

$$W_L = \frac{W_d}{2} + \frac{W_d * A_y * h}{t}$$

En donde:

**t:** Ancho de vía = 1400 mm

**h:** Altura del CG = 317 mm

**$W_L$ :** Peso en el eje exterior

**$A_y$ :** Aceleración Lateral = 1.75g

Reemplazando:

$$W_L = \frac{193.88}{2} + \frac{193.88 * 1.75 * 317}{1400}$$
$$W_L = 103.85 \text{ kg}$$

El total de peso en la rueda exterior de la curva es de 103,85 kg para una aceleración de 1.75 g.

#### 2.5.4 Transferencia de masa longitudinal

Cuando el monoplaza se somete a una gran aceleración se crea una fuerza que hace que la masa del monoplaza se transfiera de un eje al otro, esta aceleración se produce al momento de frenar y acelerar el vehículo, es importante saber la cantidad de masa transferida para determinar los materiales para la construcción de los elementos.

Se realiza los cálculos asumiendo un peso del vehículo W de 370 Kg, y la distribución se la realiza para el eje delantero con un valor de  $W_d$  193.88kg y el eje posterior de  $W_t$  176,12 kg. Para realizar el cálculo se toman los valores de una aceleración negativa la cual equivale al detener un vehículo de 100 Km/h en 3s:

$$-a = \frac{v_f - v_0}{t}$$

En donde:

$a = \text{desaceleracion.}$

$$V_0 = \text{Velocidad inicial} = \frac{100\text{Km}}{h} = 27,77 \frac{m}{s}$$

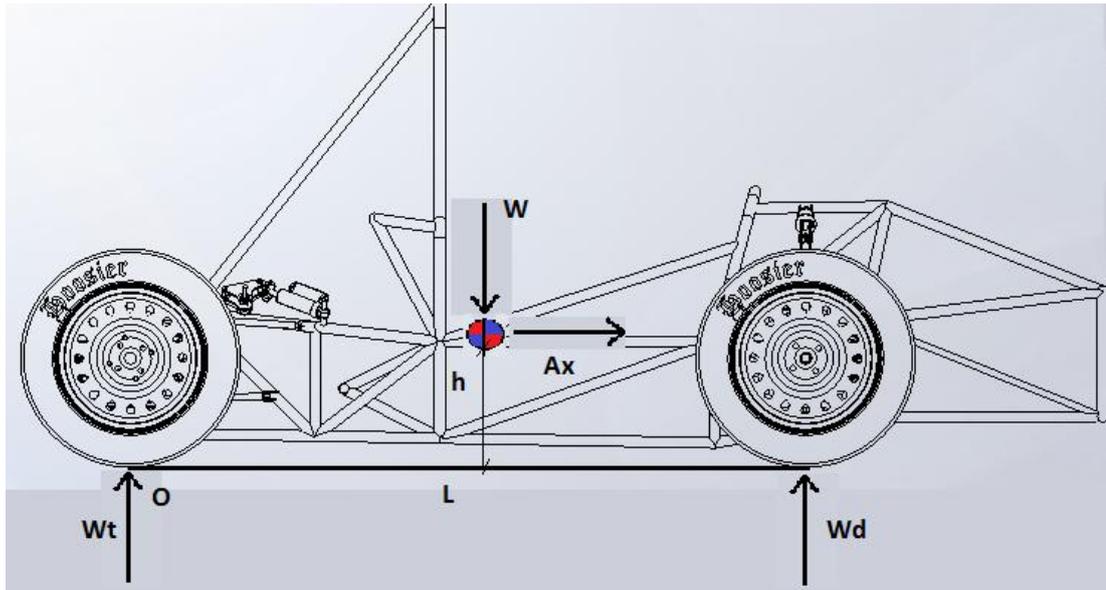
$$V_f = \text{Velocidad final} = 0\text{m/s}$$

$$t = \text{tiempo} = 3 \text{ s}$$

Reemplazando se obtiene:

$$-a = \frac{0 - 27,77}{3} = 9,25 \frac{m}{s^2}$$

$$-a = 0,94g$$



**Figura 2.28** Transferencia de masa longitudinal

$$\sum M_o = 0 \quad \curvearrow +$$

$$dW_d * l = W * Ax * h$$

$$dW_d = \frac{W * Ax * h}{l}$$

En donde:

***l***: Distancia entre ejes = 1600 mm

***h***: Altura del CG = 317 mm

***dW<sub>d</sub>*** : Incremento de peso en el eje delantero

***A<sub>x</sub>***: Aceleracion Lateral = 0,94g

Reemplazando:

$$dW_L = \frac{370kg * 0.94 * 317mm}{1600mm}$$

$$dW_L = 68,90 kg$$

Por lo tanto se determina que el peso transferido del eje posterior al delantero al momento del frenado es de 68,90kg, lo cual da un total de 262,78 kg en el eje delantero, es decir 131,39 kg en cada rueda.

### 2.5.5 Aceleración lateral

La fuerza centrífuga generada por el paso del vehículo en curva genera una fuerza lateral en la rueda del vehículo que debe ser calculada para realizar el análisis de las cargas en el sistema.

Para encontrar la fuerza centrífuga del vehículo se considera una velocidad de 50 Km/h y un radio de curva de 13,5 metros.

$$F_{lateral} = m \frac{v^2}{r}$$

En donde:

$$F_{lateral} = \text{Fuerza Lateral}$$

$$v = \text{velocidad del vehículo} = 50 \text{ Km/h}$$

$$r = \text{radio de la curva} = 13 \text{ m}$$

$$m = \text{masa del vehículo} = 370 \text{ kg}$$

Reemplazando:

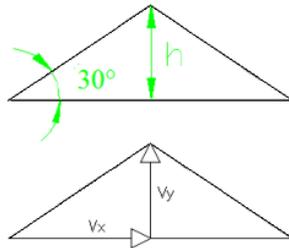
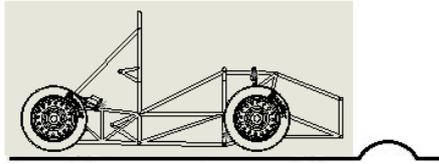
$$F_{lateral} = 370 \text{ kg} \frac{(13,88 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{13 \text{ m}}$$

$$F_{lateral} = 5483 \text{ N}$$

Se obtiene una fuerza lateral en la rueda de 5483N, por lo tanto la fuerza lateral generada entre la calzada y cada neumático sería de 1370 N.

### 2.5.6 Obstáculo

Para determinar las fuerzas que actúan en el sistema de suspensión cuando el vehículo pasa sobre un obstáculo, se considera una velocidad de 50 Km/h, y además los neumáticos se mantienen en contacto con la superficie en todo momento, un obstáculo de forma triangular con una pendiente de 30° y altura de 20cm para simplificar el cálculo.



**Figura 2.29** Obstáculo en pista [23]

$$v_x * \tan(20) = v_y$$

Fórmula para determinar la aceleración vertical:

$$v_x^2 = v_y^2 + 2a_y * h$$

$$v_x^2 = 0 \text{ m/s}$$

$$a_y = \frac{v_y^2}{2h}$$

En donde:

$$v_y = \text{velocidad del vehículo} = 13,88 \text{ m/s}$$

$$v_y = \text{velocidad en direccion y} = 8,01 \text{ m/s}$$

$$v_{ay} = \text{velocidad final en direccion y} = 0 \text{ m/s}$$

$$a_y = \text{aceleracion vertical}$$

$$h = \text{altura del obstaculo} = 0,20 \text{ m}$$

Reemplazando:

$$a_y = \frac{8,01^2}{2 * 0,20\text{m}}$$

$$a_y = 160 \text{ m/s}^2$$

La fuerza generada en los neumáticos seria:

$$F_{eje} = 0,2 m_{eje} * a_y [2.14]$$

$$F_{eje} = 0,2 * 193 \text{ Kg} * 160\text{m/s}^2$$

$$F_{eje} = 6176 \text{ N}$$

Por lo tanto la fuerza en un neumático al pasar por un obstáculo seria de 6176 N

### 2.5.7 Distribución de fuerzas en los brazos de suspensión

Se determina el valor de los esfuerzos en los brazos de suspensión en el caso crítico, es decir se simula un vehículo frenando en curva sobre un obstáculo, con lo cual se obtiene una fuerza lateral de 1370N, un valor de la rueda de 131,39 kg (1288,93N) de transferencia de masas longitudinal más 103kg (1010 N) de transferencia de masa transversal y más 6176N de fuerza generada por el obstáculo.

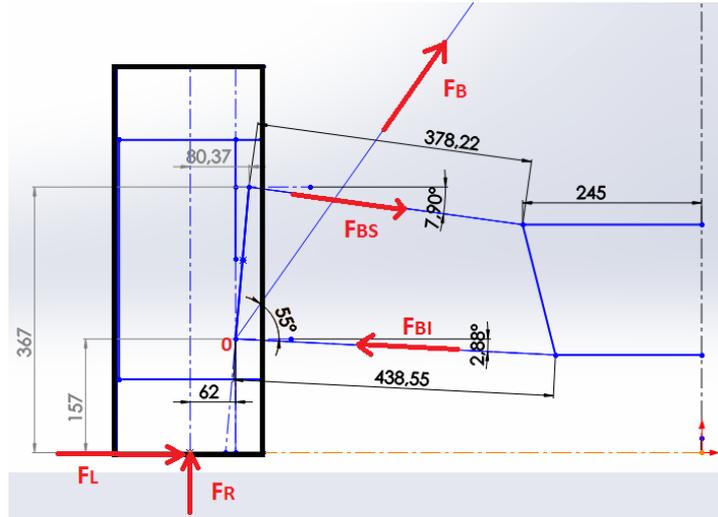


Figura 2.30 Fuerzas en los brazos de suspensión

$$+\uparrow \sum F_z = 0$$

$$+\uparrow \sum F_z = F_R - F_{BI} \text{sen}(-2,88) + F_B \text{sen}(55) - F_{BS} \text{sen}(7,9)$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0$$

$$+\uparrow \sum F_y = F_L - F_{BI} \text{cos}(-2,88) + F_B \text{cos}(55) + F_{BS} \text{cos}(7,9)$$

$$+\cup \sum M_O = 0$$

$$+\cup \sum M_O = -F_R(0,062) + F_L(0,157) - F_{BS} \text{cos}(7,9) * (0,367 - 0,157)$$

En donde:

$$F_R = \text{Fuerza de la rueda} = 8476 \text{ N}$$

$$F_L = \text{Fuerza lateral} = 1370 \text{ N}$$

$$F_B = \text{Fuerza en el balancín}$$

$$F_{BS} = \text{Fuerza en el brazo superior}$$

$$F_{BI} = \text{Fuerza en el brazo inferior}$$

Resolviendo se obtiene:

$$F_B = \text{Fuerza en el balancín} = 9969N$$

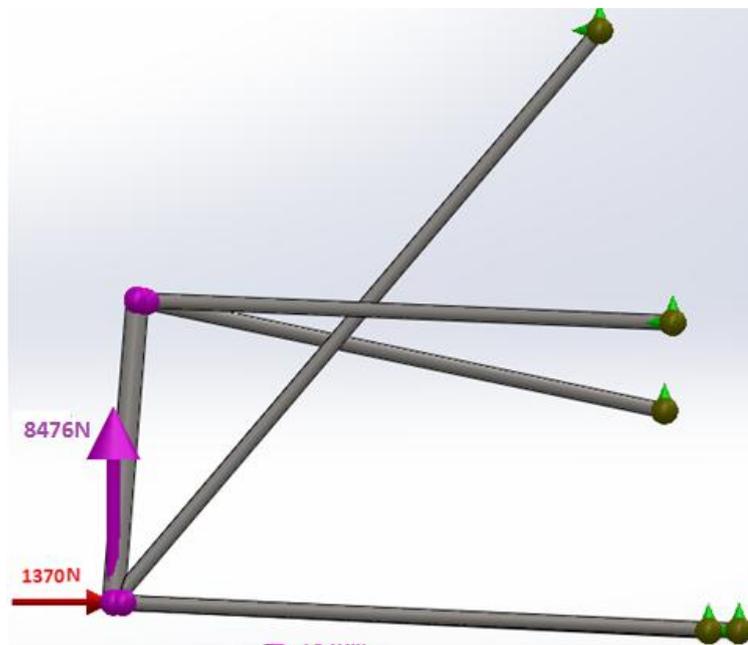
$$F_{BS} = \text{Fuerza en el brazo superior} = 3400 N$$

$$F_{BI} = \text{Fuerza en el brazo inferior} = 1956N$$

Debido a que la suspensión posterior tiene una geometría complicada para el análisis de fuerzas, se ha optado por la utilización del programa SolidWorks para determinar las cargas presentes en el sistema.

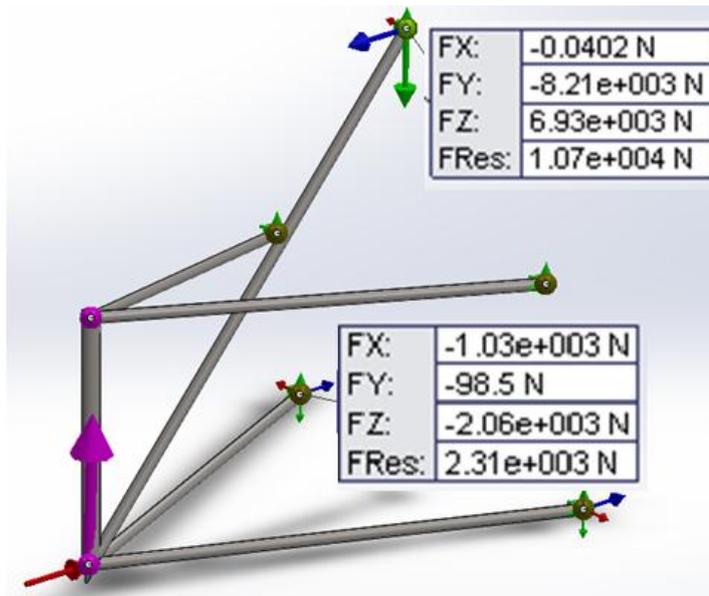
### 2.5.8 Determinación de fuerzas en los brazos de suspensión por medio de SolidWorks

Una vez realizado el cálculo se verifica que el valor de las fuerzas obtenidas es el correcto, para ello se utiliza el programa Solidworks y se realiza un análisis estático en la estructura formada por los brazos de suspensión y el push rod, aplicando las fuerzas presentes en el neumático como se puede observar en la siguiente figura:



**Figura 2.31** Análisis de fuerzas en la suspensión delantera derecha

Por medio del análisis de tensión y con la herramienta de fuerzas resultantes en el programa SolidWorks, se pudo encontrar el valor de la fuerza resultante en cada brazo de suspensión y en el push rod, obteniendo los siguientes valores:



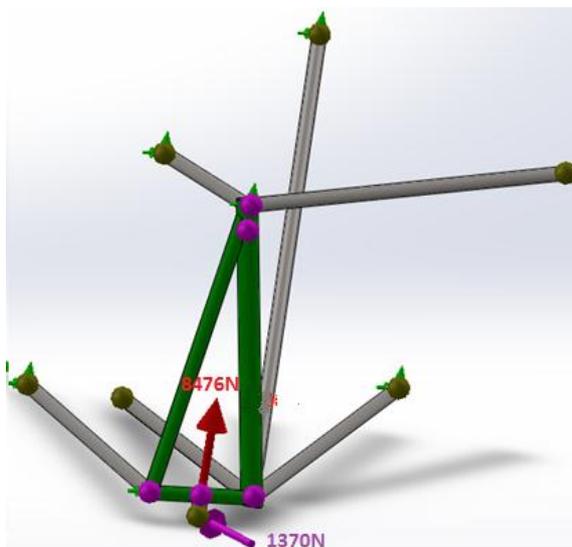
**Figura 2.32** Resultado del análisis de fuerzas suspensión delantera derecha

$$F_B = \text{Fuerza en el balancín} = 10700N$$

$$F_{BS} = \text{Fuerza en el brazo superior} = 2300 N$$

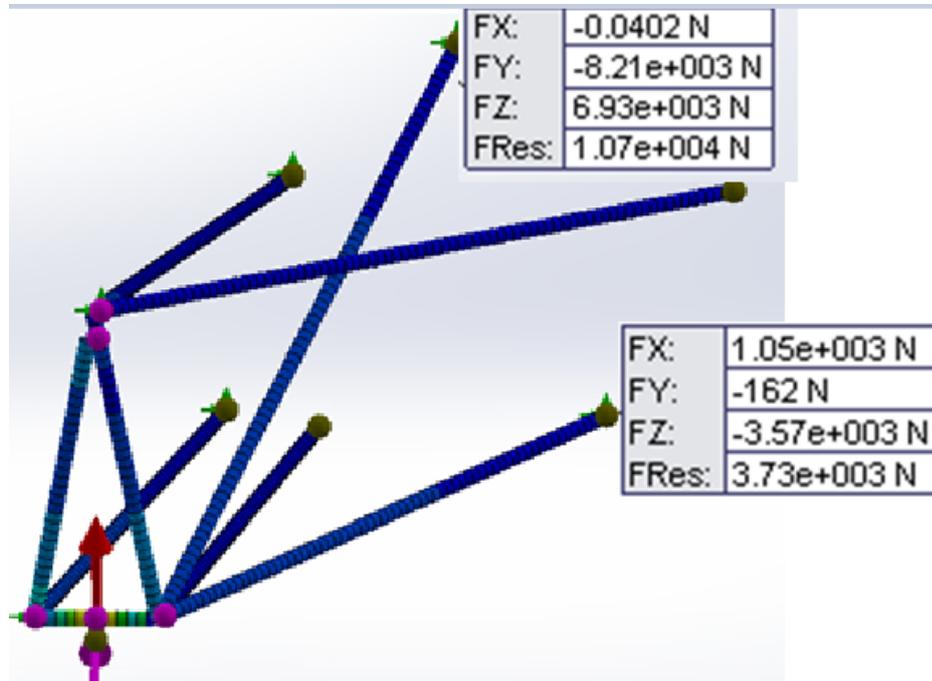
$$F_{BI} = \text{Fuerza en el brazo inferior} = 3730N$$

Para la suspensión posterior, debido a que no se encuentra en un solo plano, se realiza el análisis de las fuerzas por medio de Solidworks, para ello se realiza una estructura que representa la suspensión posterior y se aplican las cargas presentes en el neumático como se puede observar en la siguiente figura:



**Figura 2.33** Análisis de fuerzas suspensión posterior derecha

Por medio del análisis de tensión y con la herramienta de fuerzas resultantes del programa, se pudo encontrar el valor de la fuerza resultante en cada brazo de suspensión posterior y en el push rod, obteniendo los siguientes valores:



*Figura 2.34 Resultados del análisis de fuerzas suspensión posterior derecha*

$$F_B = \text{Fuerza en el balancín} = 11000N$$

$$F_{BS} = \text{Fuerza en el brazo superior} = 2500 N$$

$$F_{BI} = \text{Fuerza en el brazo inferior} = 3800N$$

### 2.5.9 Cálculo de los brazos de suspensión

Una vez determinadas las fuerzas presentes en los brazos de suspensión se procede a hacer el cálculo para el espesor de tubos de acero AISI 1018 que tenemos en el mercado, el catálogo de tubos se lo encuentra en el anexo 2.

Para el cálculo se utilizara la fórmula de esfuerzo axial:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Y además se utiliza el área de un círculo hueco para el cálculo de los tubos:

$$A = \pi(r_{ext}^2 - r_{int}^2)$$

Una vez determinado esto se utiliza el factor de seguridad para escoger el tubo que mejor se adapte al requerimiento. Tomando en cuenta el caso más crítico que es el de 3800 N de esfuerzo axial se ha determinado por medio de una tabla el espesor del tubo a utilizar para los brazos de suspensión, teniendo como resultado lo siguiente:

**Tabla 2.23** Cálculo del diámetro del tubo para la construcción del push rod

Tubo							
Diámetro Exterior (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Carga axial (N)	Esfuerzo Normal (Pa)	Esfuerzo de cedencia (Pa)	FS
15,88	0,6	28,80	2,88E-05	3700	1,28E+08	370000000	2,9
	0,75	35,65	3,56E-05	3700	1,04E+08	370000000	3,6
	0,95	44,56	4,46E-05	3700	8,30E+07	370000000	4,5
	1,1	51,07	5,11E-05	3700	7,24E+07	370000000	5,1
	1,5	67,76	6,78E-05	3700	5,46E+07	370000000	6,8
19,05	0,6	34,78	3,48E-05	3700	1,06E+08	370000000	3,5
	0,75	43,12	4,31E-05	3700	8,58E+07	370000000	4,3
	0,95	54,02	5,40E-05	3700	6,85E+07	370000000	5,4
	1,1	62,03	6,20E-05	3700	5,96E+07	370000000	6,2
	1,5	82,70	8,27E-05	3700	4,47E+07	370000000	8,3

Debido a que en el medio local no se cuenta con tubos de menor espesor a 1 mm se ha determinado que el tubo a utilizar para la construcción de los brazos será de un diámetro de 5/8 de pulgada (15,88mm) con un espesor de 1,1 mm que brinda un factor de seguridad de 5,1.

### 2.5.10 Cálculo de los push rod

Se realiza el mismo procedimiento de análisis que los brazos de suspensión, para el push rod se utiliza el caso más crítico en que se encuentra el vehículo, que es 11000N de esfuerzo axial a lo largo del tubo, por medio de una tabla se determina el espesor del tubo para la construcción, teniendo como resultado lo siguiente:

**Tabla 2.24** Cálculo del diámetro del tubo para la construcción del push rod

Tubo							
Diámetro Exterior (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Carga axial (N)	Esfuerzo Normal (Pa)	Esfuerzo de cedencia (Pa)	FS
15,88	0,6	28,80	2,88E-05	11000	3,82E+08	370000000	1,0
	0,75	35,65	3,56E-05	11000	3,09E+08	370000000	1,2
	0,95	44,56	4,46E-05	11000	2,47E+08	370000000	1,5
	1,1	51,07	5,11E-05	11000	2,15E+08	370000000	1,7
	1,5	67,76	6,78E-05	11000	1,62E+08	370000000	2,3
19,05	0,6	34,78	3,48E-05	11000	3,16E+08	370000000	1,2
	0,75	43,12	4,31E-05	11000	2,55E+08	370000000	1,5
	0,95	54,02	5,40E-05	11000	2,04E+08	370000000	1,8
	1,1	62,03	6,20E-05	11000	1,77E+08	370000000	2,1
	1,5	82,70	8,27E-05	11000	1,33E+08	370000000	2,8

Debido a que en el medio local no se cuenta con tubos de menor espesor a 1 mm se ha determinado que el tubo a utilizar para la construcción de los brazos será de un diámetro de 3/4 de pulgada (19,05mm) con un espesor de 1,5 mm que brinda un factor de seguridad de 2,1; se selecciona este tubo y no el de 5/8 debido a que este presenta mayor inercia y ayuda a evitar el pandeo en el tubo.

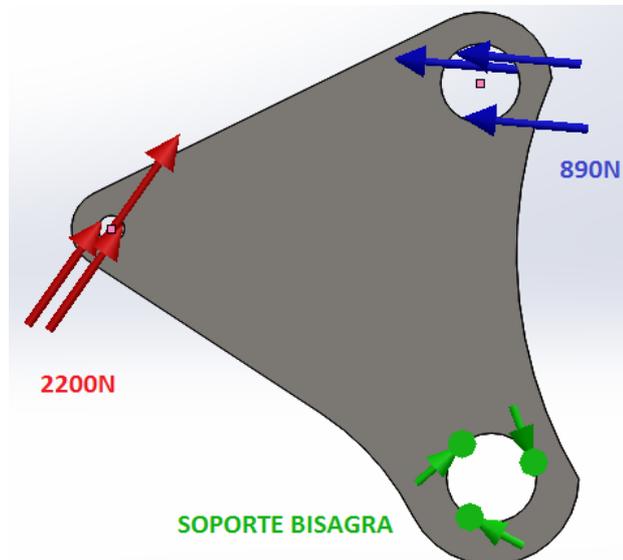
### 2.5.11 Análisis estructural de los balancines

Una vez determinadas las dimensiones de los brazos de suspensión se procede a realizar el análisis de los balancines dentro del sistema, para ello realizamos las siguientes suposiciones:

- La posición del balancín será la del máximo recorrido del amortiguador con el resorte completamente comprimido.
- La fuerza generada por el resorte será igual a su máximo recorrido, para la parte delantera se generará una fuerza de 890 N y para la parte posterior será de 835 N.
- Se colocará un soporte tipo bisagra en el lugar donde conecta el balancín con los soportes.
- La fuerza generada por los neumáticos será de 2200 N para cada balancín, que es la fuerza que se genera en el neumático durante el frenado en curva.

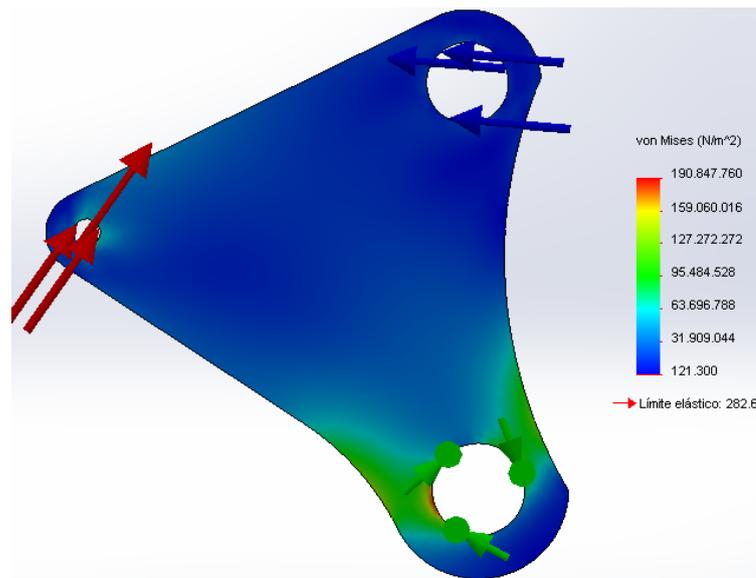
## Balancín Delantero

Se realiza el análisis para el balancín delantero aplicando las cargas como se muestra en la siguiente figura:



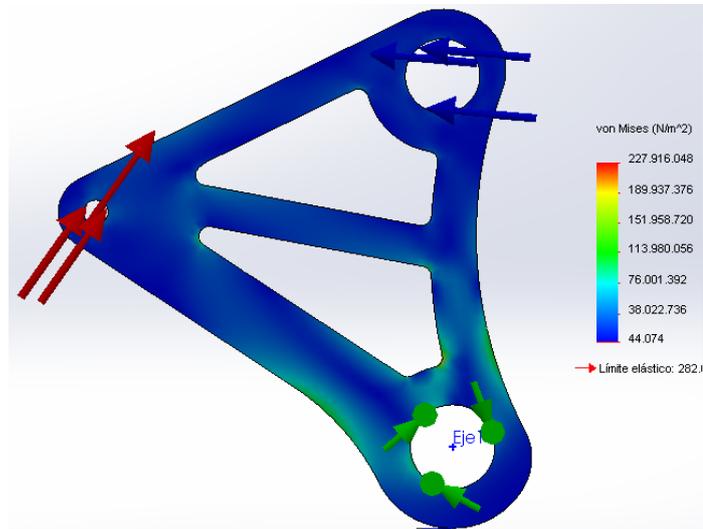
*Figura 2.35 Balancín delantero aplicando cargas*

Al ejecutar el análisis por elementos finitos se observa que el factor de seguridad del elemento se encuentra en 2,02; además las tensiones de Von Mises permiten observar la distribución de los esfuerzos dentro de los elementos como se muestra en las siguientes figuras:



*Figura 2.36 Resultados de tensión de Von Mises balancín delantero*

Al determinar que en la parte central del balancín no se producen esfuerzos elevados, se procede a hacer reducción de peso del balancín, obteniendo los siguientes resultados:

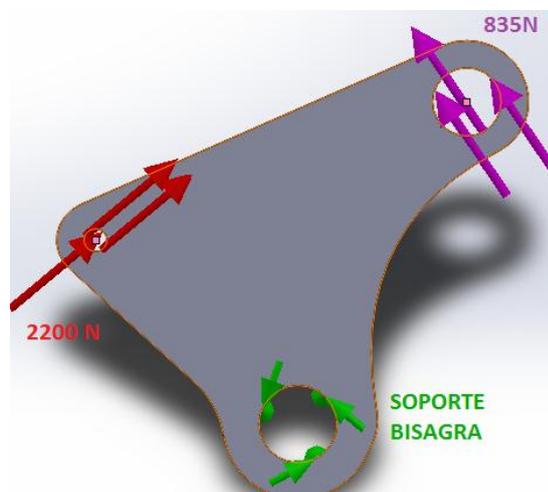


*Figura 2.37 Resultados de tensión de Von Mises del balancín delantero con reducción de peso*

Como se observa en los análisis el balancín soporta las cargas generadas en el vehículo, obteniendo un factor de seguridad de 1,24 lo que garantiza que el elemento va a resistir las cargas de funcionamiento.

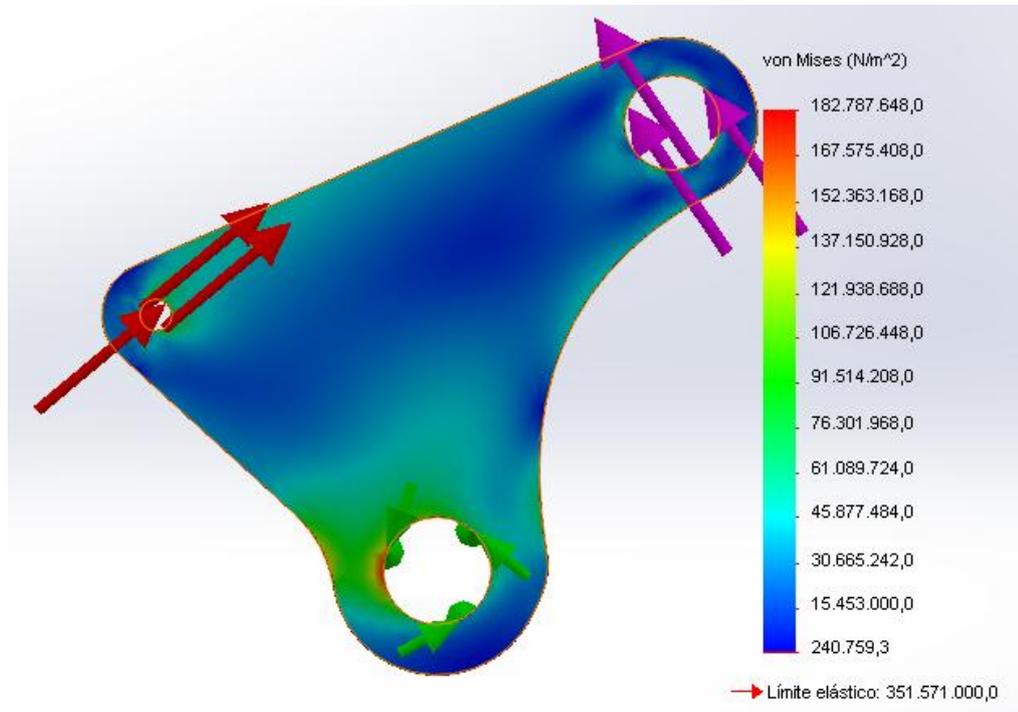
### **Balancín Posterior**

Se realiza el análisis para el balancín posterior aplicando las cargas como se muestra en la siguiente figura:



*Figura 2.38 Balancín posterior aplicando cargas*

Al ejecutar el análisis por elementos finitos se observa que el factor de seguridad del elemento se encuentra en 1,92; además las tensiones de Von Mises permiten observar la distribución de los esfuerzos dentro de los elementos como se muestra en las siguientes figuras:



*Figura 2.39 Resultados de tensión de Von Mises balancín posterior*

Por razones de tiempo no se pudo realizar la reducción de peso del rocker posterior, por lo que se sugiere hacerlo en trabajos futuros.

## 2.6 Simulación de movimiento de la suspensión

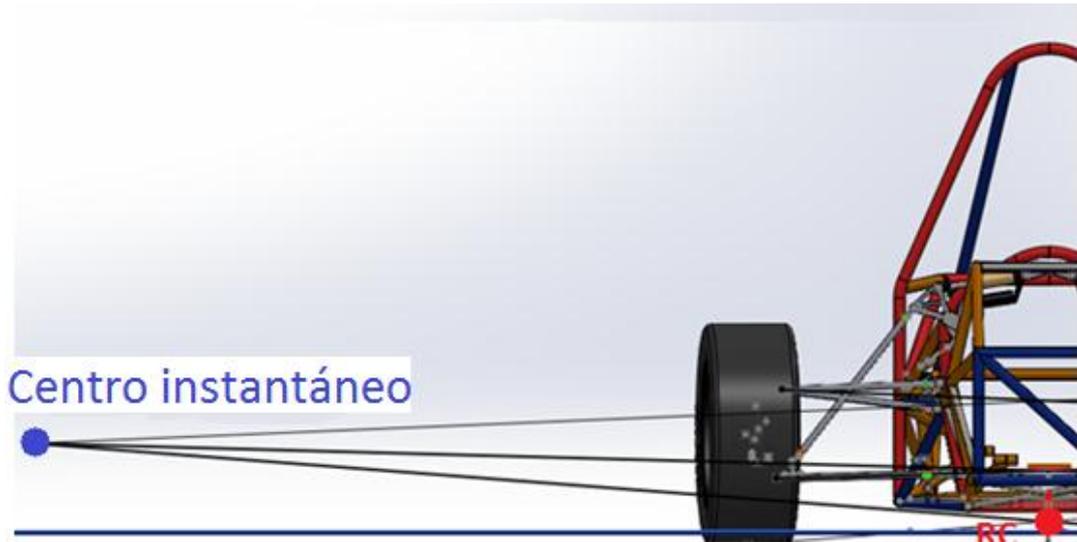
La simulación de movimiento permite observar el comportamiento del camber en la llanta y la ubicación del centro de balanceo en el vehículo, con la finalidad de determinar si estos parámetros estarán dentro de lo establecido durante el funcionamiento. Para ello se realiza el siguiente estudio:

### 2.6.1 Ubicación del centro de balanceo de la suspensión delantera

Se determina la ubicación del centro de balanceo en la suspensión delantera, realizando un croquis con diferentes posiciones de acuerdo al funcionamiento de la suspensión, como se observa en la siguiente figura:



*Figura 2.40 Centros instantáneos de la suspensión delantera*



*Figura 2.41 Ubicación del centro instantáneo en diferentes momentos para la suspensión delantera*



*Figura 2.42 Altura del centro de balanceo en diferentes momentos, con la suspensión delantera en funcionamiento*

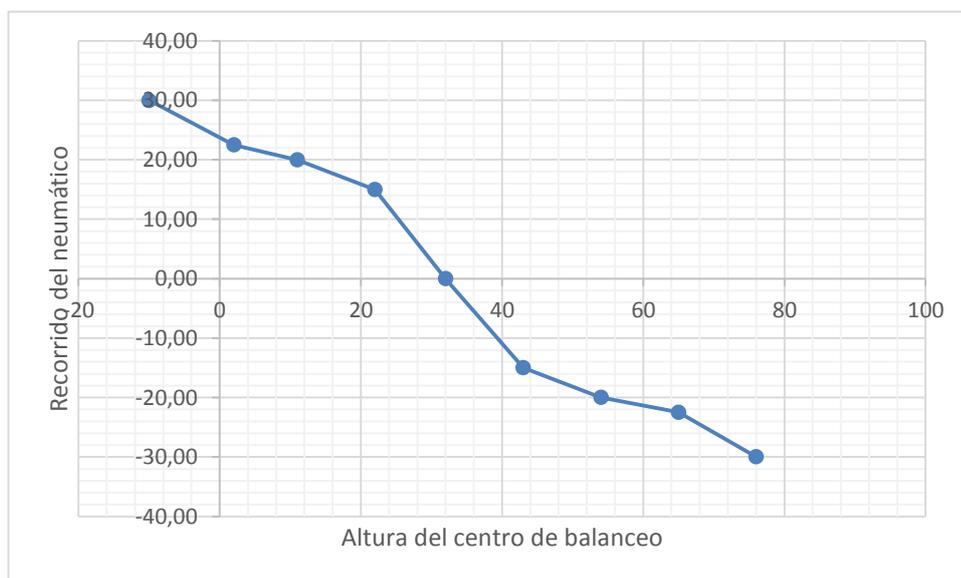
Para el análisis se toman medidas de acuerdo al movimiento vertical del neumático, comenzando desde la posición más baja hasta la altura máxima que es la altura del

neumático con la máxima compresión del resorte. Se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 2.25** Valores del centro instantáneo y camber en diferentes etapas de funcionamiento de la suspensión delantera

Recorrido del neumático (mm)	Centro de balanceo (mm)	Camber (°/in)
-29,97	76	-0,55
-22,48	65	-0,41
-19,98	54	-0,27
-14,99	43	-0,12
0,00	32	0,03
14,99	22	0,18
19,98	11	0,33
22,48	2	0,49
29,97	-10	0,65

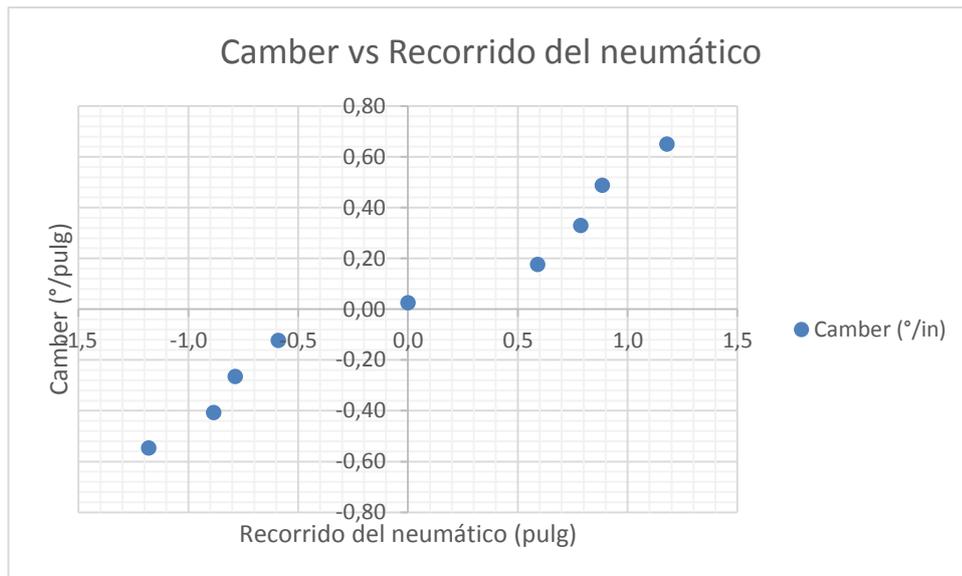
Con los datos obtenidos se procede a realizar las gráficas correspondientes con la finalidad de observar el comportamiento de la suspensión delantera.



**Figura 2.43** Gráfica de la altura del centro de balanceo vs el recorrido del neumático

Como se observa en la gráfica conforme los neumáticos van bajando desde su posición más alta a la más baja, se va incrementando la altura del centro de balanceo, este fenómeno se puede generar en una frenada brusca.

Se observa que el centro de balanceo alcanza un mínimo de 10 mm bajo el suelo, lo cual podría generar un efecto de *jacking* en la suspensión. Debido a que en la práctica el resorte no va a llegar a esa posición debido a un tope en el amortiguador, se determina que la disposición de brazos de suspensión es correcta para el buen funcionamiento del sistema.

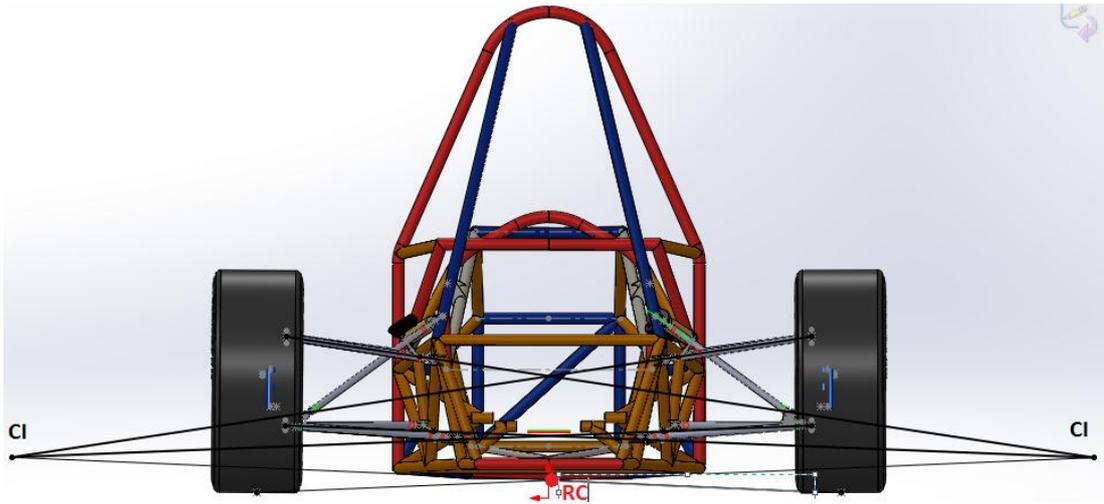


**Figura 2.44** Gráfica del camber vs el recorrido del neumático

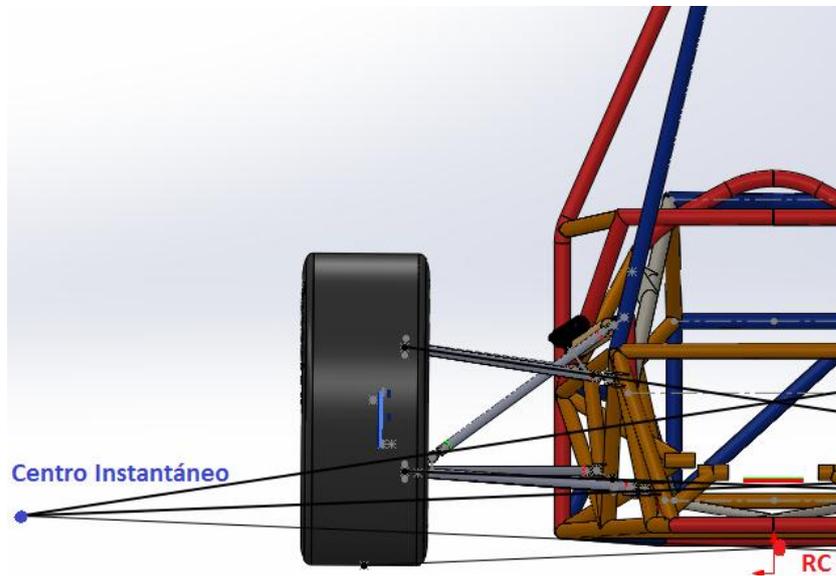
Como se observa en la gráfica del camber vs el recorrido del neumático, el camber cambia desde un ángulo negativo a un positivo, el máximo cambio del camber es de 1,2 °/in, por lo que se determina que el ángulo estático de -1,5 será lo suficiente para mantener el camber del neumático en un valor negativo.

### 2.6.2 Ubicación del centro de balanceo de la suspensión posterior

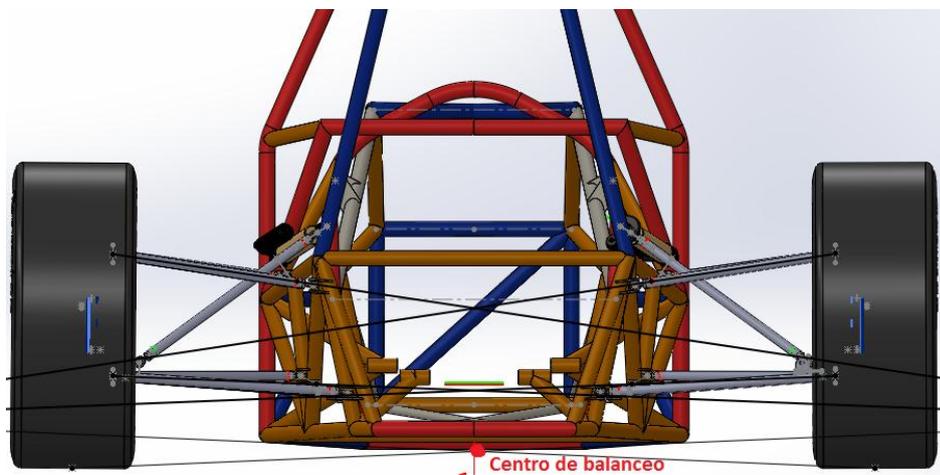
Se determina la ubicación del centro de balanceo en la suspensión posterior, realizando un croquis con diferentes posiciones de acuerdo al funcionamiento de la suspensión, como se observa en la siguiente figura:



**Figura 2.45** Centros instantáneos de la suspensión posterior



**Figura 2.46** Ubicación del centro instantáneo en diferentes momentos para la suspensión posterior



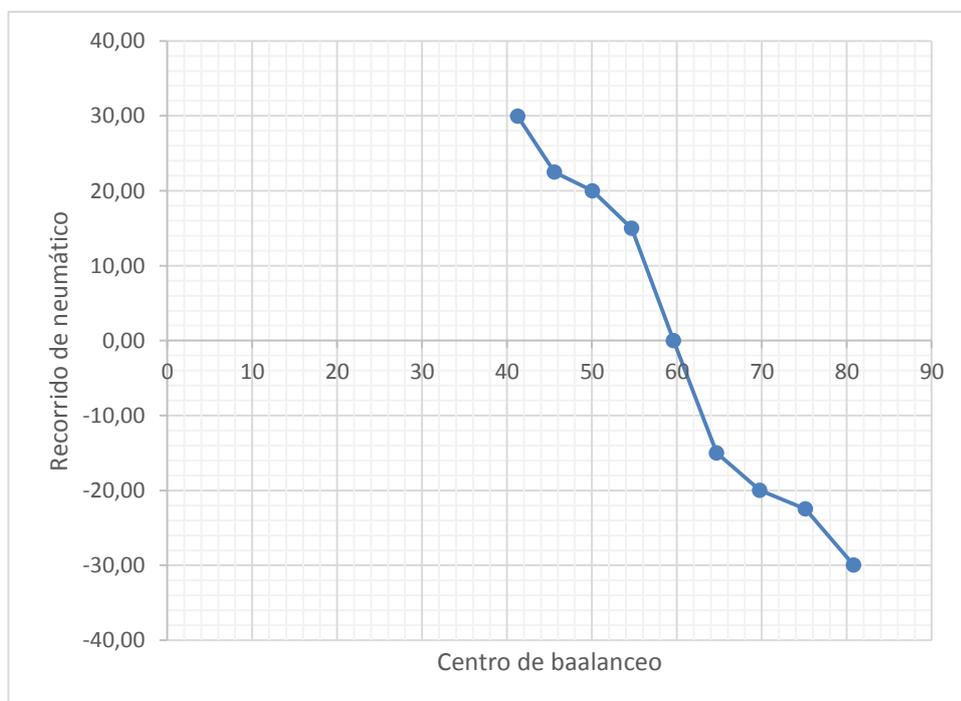
**Figura 2.47** Altura del centro de balanceo en diferentes momentos, con la suspensión posterior en funcionamiento

Para el análisis se van tomando medidas de acuerdo al movimiento vertical del neumático, comenzando desde la posición más baja hasta la altura máxima que es la altura del neumático con la máxima compresión del resorte. Se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 2.26** Valores del centro instantáneo y camber en diferentes etapas de funcionamiento de la suspensión posterior

Recorrido del neumático (mm)	Centro de balanceo (mm)	Camber (°/in)
-29,97	80,81	-0,73
-22,48	75,14	-0,66
-19,98	69,76	-0,48
-14,99	64,67	-0,20
0,00	59,6	-0,03
14,99	54,68	0,14
19,98	50,05	0,31
22,48	45,58	0,40
29,97	41,26	0,57

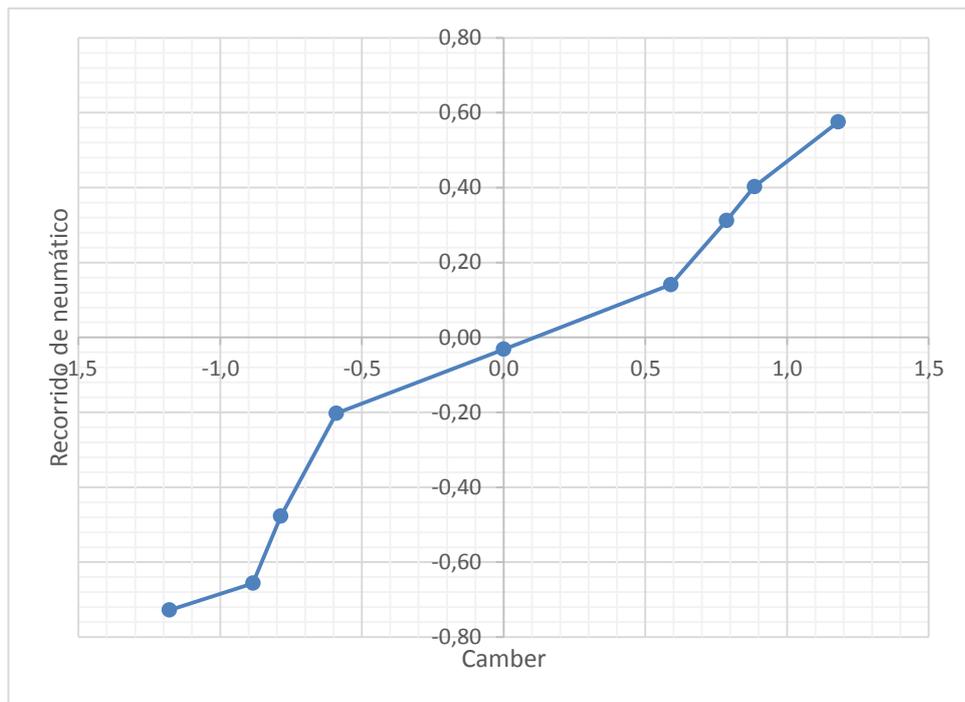
Con los datos obtenidos se procede a realizar las gráficas correspondientes con la finalidad de observar el comportamiento de la suspensión delantera.



**Figura 2.48** Gráfica de la altura del centro de balanceo vs el recorrido del neumático

Como se observa en la gráfica conforme los neumáticos van bajando desde su posición más alta a la más baja, la altura del centro de balanceo va disminuyendo, este fenómeno se puede generar en una frenada brusca.

Se observa que el centro de balanceo alcanza un mínimo de 30 mm sobre el nivel del suelo, lo cual indica que no se generan efectos negativos en el funcionamiento.



**Figura 2.49** Gráfica del camber vs el recorrido del neumático

Como se observa en la gráfica del camber vs el recorrido del neumático, el camber va cambiando desde un ángulo negativo a un positivo, el máximo cambio del camber es de  $1,3^\circ/\text{in}$ , por lo que se determina que el ángulo estático de  $-1,5$  será lo suficiente para mantener el camber del neumático en un valor negativo en la suspensión posterior.

## 2.7 Frecuencias Naturales

En un sistema de suspensión existen dos frecuencias de resonancia no amortiguadas, Milliken y Kasprzak [5] las establecen como las frecuencias naturales de las masas suspendidas y no suspendidas.

Sus ecuaciones son:

### 2.7.1 Masa suspendida

$$\omega_n(s) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(K_W * K_T)/(K_W + K_T)}{M_s}}$$

Dónde:

- $\omega_n(s)$ , es la frecuencia natural de la masa suspendida (Hz).
- $K_W$ , es el Wheel rate.
- $K_T$ , representa el índice de rigidez de los neumáticos.
- $M_s$ , la masa suspendida.

### 2.7.2 Masa no suspendida

$$\omega_n(us) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_W + K_T}{M_{us}}}$$

Dónde:

- $\omega_n(us)$ , es la frecuencia natural de la masa no suspendida (Hz).
- $K_T$ , representa el índice de rigidez de los neumáticos.
- $M_{us}$ , la masa suspendida.

Aplicando las ecuaciones con los siguientes datos,

$K_W = 25000 \text{ N/m}$ , de una relación de movimiento 1 a 1.

$K_T = 185000 \text{ N/m}$ , valor correspondiente a los datos del fabricante de los neumáticos, véase anexo 1.

$M_s = 76,75 \text{ Kg}$ , correspondientes a un cuarto del vehículo.

$M_{us} = 15 \text{ kg}$

Se obtienen los siguientes resultados,

La masa suspendida tiene una frecuencia natural de 2.67 Hz, mientras que la masa no suspendida tiene una frecuencia de 18.83 Hz.

*Milliken y Kasprzak* [5], muestran una tabla con los datos acerca de las específicos de para este tipo de vehículos; establecen frecuencias de 2.5 – 3.5 Hz para la masa suspendida y de 15-19 Hz para la masa no suspendida, por lo que el vehículo está dentro del rango establecido.

## 2.8 Sumario

En este capítulo se realizó el diseño y análisis estructural de los elementos que conforman el sistema de suspensión de un monoplaza formula Student.

La metodología de diseño permite aplicar diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficientes detalles que permitan su realización, con esto se pudo definir ciertos aspectos para el diseño y desarrollo del sistema de suspensión.

Se aplicó la metodología de Norton para establecer los elementos y materiales a utilizar en el sistema de suspensión, partiendo desde el estado del arte de los sistemas de suspensión de universidades de élite en la competencia Formula Student.

Se realizó el diseño del sistema con la finalidad de tener: un ancho de vía y distancia entre ejes que ayuden a mantener la estabilidad en pista, y una ubicación correcta de los brazos de suspensión para evitar el anti-hundimiento y anti-levantamiento del vehículo.

Se obtuvo una buena ubicación de los centros de balanceo delantero y posterior que permitan un adecuado rendimiento del vehículo dentro de pista y al mismo tiempo que permita la ubicación de los centros instantáneos de tal manera que el cambio de camber en los neumáticos no sea excesivo.

Se analizó las fuerzas que se presentan en el sistema de suspensión para determinar los momentos críticos de funcionamiento del vehículo, para ello se realizó un análisis de transferencia de masas y paso por obstáculo.

Se realizó un análisis por elementos finitos para dimensionar correctamente los rockers de la suspensión.

## CAPÍTULO III

# CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN

### 3.1 Introducción

En este capítulo se presenta el proceso de construcción y montaje de la suspensión en el vehículo.

Inicialmente se revisan brevemente los procesos de manufactura utilizados para la construcción de la suspensión, tales como, mecanizado, corte por agua a presión, y el proceso de soldadura a utilizar.

A continuación se realiza una descripción de la construcción de cada elemento para finalmente ser unido al chasis, así como el proceso a seguir para realizar el ensamble final de la suspensión.

Finalmente se elaboran tablas de los costos de los elementos, materiales y procesos involucrados durante la construcción y montaje del sistema de suspensión.

### 3.2 Procesos con arranque de viruta

#### 3.2.1 Mecanizado

Es un proceso de mecanizado donde con el uso de una herramienta se separa el material excesivo de una pieza hasta lograr la forma y tamaño deseado. Este proceso, dependiendo de la máquina-herramienta utilizada, permite obtener exactitud de milésimas de milímetro además de excelentes acabados en las superficies.

Existen tres movimientos necesarios para el mecanizado:

- **Corte:** es el movimiento con el que la herramienta penetra en el material. Se define como la velocidad lineal que tiene la parte periférica de la pieza y que está en contacto con la herramienta. Se expresa en metro por minuto (m/min).
- **Rotación.-** es la velocidad con la que rota el cabezal del torno y está expresada en revoluciones por minuto (rpm).

- **Avance.**- es una velocidad relativa entre la pieza y la herramienta, define la velocidad con la que progresa el corte.

### **Refrigerante**

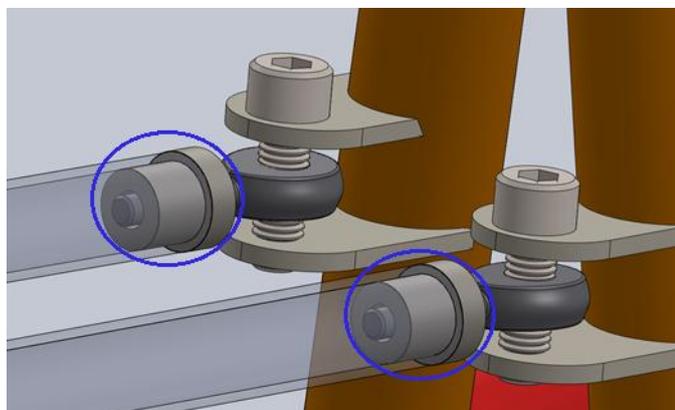
Es un agente importante, especialmente para taladrados, roscados y mandrinados. Además es importante cuando se trabaja con materiales blandos como el aluminio y el acero de bajo contenido de carbono; así se obtiene mejor acabado superficial además de duración de la herramienta de corte.

Hoy en día existe una tendencia para efectuar el mecanizado sin el uso de refrigerante, siempre que el material y sobretodo la calidad de la herramienta lo permita. Sin embargo, la maquinaria debe ser capaz de absorber el calor producido por el mecanizado, para lo que se incorporan circuitos internos de refrigeración por aceite o aire.

Por tanto es muy importante conocer el tipo de operación, los materiales, la calidad final requerida en la pieza y la maquinaria a utilizar para verificar el uso o no de taladrina o refrigerante durante la operación.

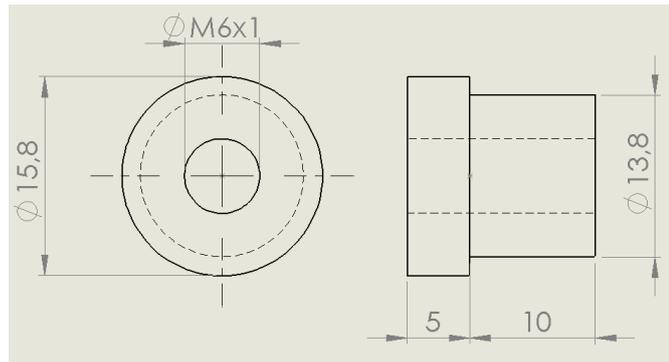
### **3.2.2 Construcción de bujes de los brazos de suspensión**

Para los elementos de unión o bujes, se realiza el mecanizado en el torno de acuerdo a las medidas específicas de cada elemento, aquí es importante la precisión y el acabado de cada uno para garantizar un correcto ajuste, facilidad de ensamble y además evitar deformaciones durante el mismo.

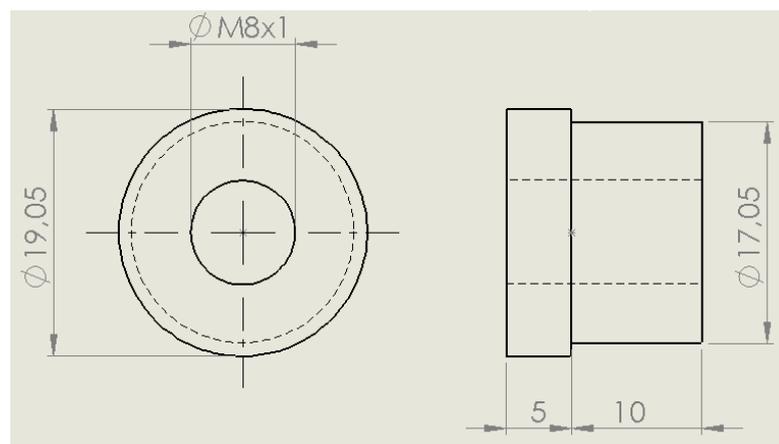


*Figura 3.1 Bujes de sujeción suspensión-chasis*

Para la construcción de estas partes se utilizan varios cilindros de 19,2 mm de diámetro por 250mm de longitud; se realiza el mecanizado hasta lograr las piezas finales que tendrán las dimensiones que se muestran en la figura 3.2, que forman parte de los elementos de unión de los brazos de suspensión al chasis. Para el caso de los push rods, se construyen los bujes según las medidas especificadas en la figura 3.3.



**Figura 3.2** Plano de construcción de los bujes de los brazos de suspensión



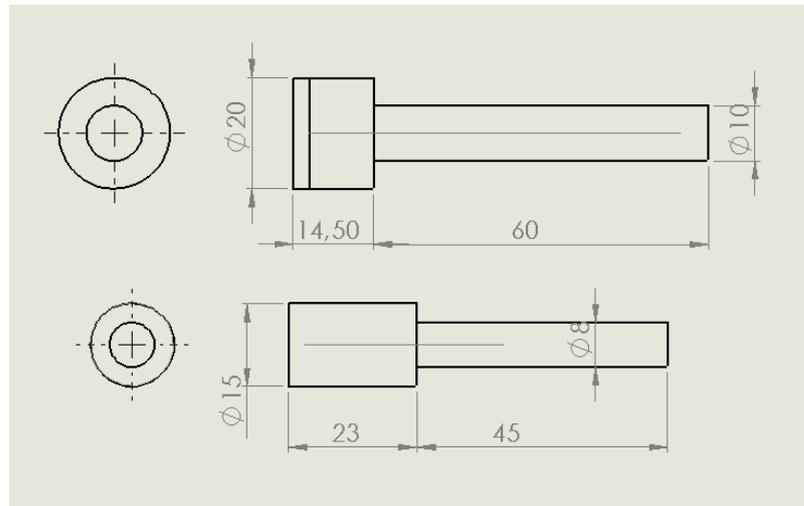
**Figura 3.3** Planos de construcción de los bujes de los push rods

Para los elementos que necesiten ser roscados, dependiendo del tipo de rosca, se la realiza con un machuelo o en el torno, utilizando la herramienta del tamaño adecuado.

Utilizando el torno, se fabrican los bujes de los demás elementos de la suspensión, como balancines (rockers), y bujes para sujeción de las rótulas que conectan los brazos con la mangueta.

### 3.2.3 Construcción de los pernos de pivote del balancín y anclaje del amortiguador

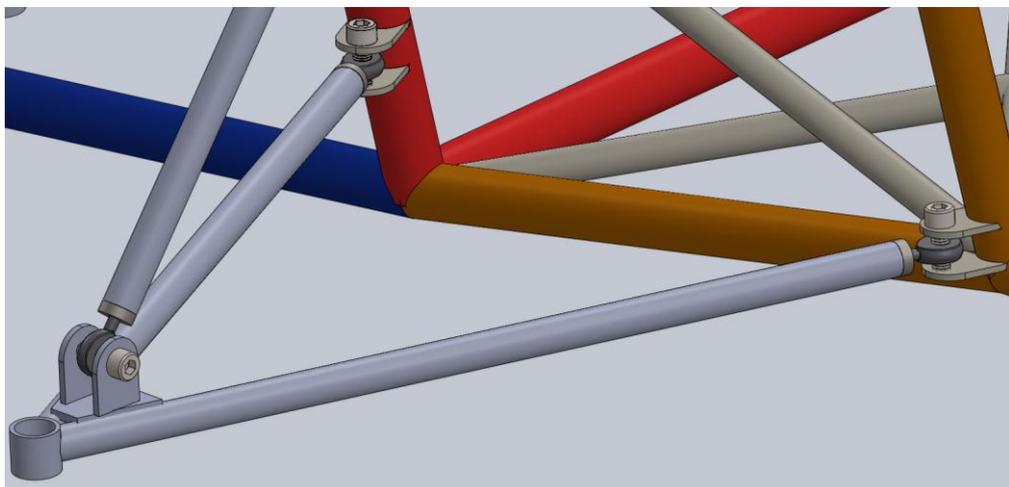
Estos elementos permiten colocar el balancín para que así pueda transmitir las fuerzas provenientes del push rod hacia el amortiguador, y pueda sostener a este último durante sus carreras de trabajo.



*Figura 3.4 Pivote de balancín (arriba) anclaje de amortiguador (abajo)*

Para estos elementos se utiliza el acero AISI 4330, iniciando con cilindros de 25,4mm para el soporte del balancín y de 19,05mm para el anclaje del amortiguador. Finalmente se realiza la rosca que permite la sujeción del balancín en el pivote, a través de una tuerca de seguridad.

### 3.2.4 Construcción de los brazos de suspensión

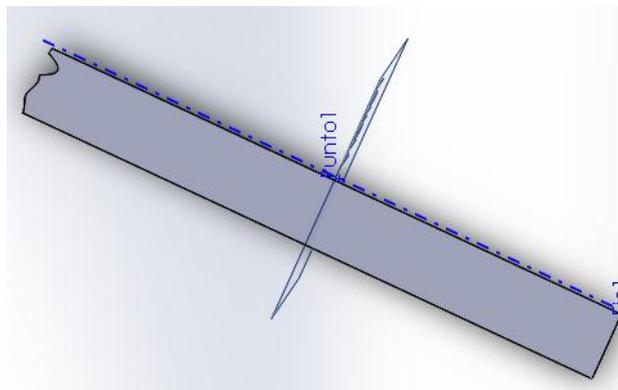


*Figura 3.5 Modelado en CAD del brazo de suspensión delantero.*

Para la construcción de los brazos de suspensión, se utiliza el método de corte en forma de boca de pescado, el cual permite un mejor acople entre los elementos que forman cada uno de los brazos.

### 3.2.5 Preparación de plantillas

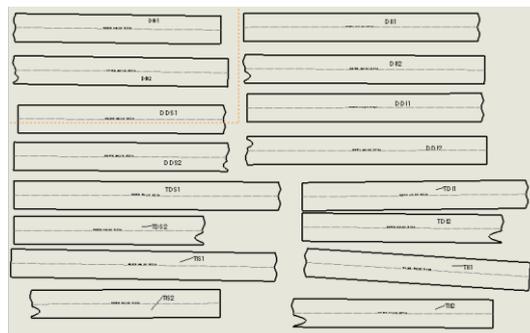
Una vez definido el modelo final en SolidWorks, se utiliza la herramienta de chapa metálica, que permite obtener plantillas planas de cada uno de los brazos de suspensión. Estas plantillas sirven para realizar los cortes de boca de pescado en cada uno de los tubos para la fabricación de los brazos de suspensión.



*Figura 3.6* Plantilla extendida de un brazo de suspensión

### 3.2.6 Corte de los brazos de suspensión

Se prepara el material realizando el corte de cada tubo con la longitud adecuada de acuerdo a su posición en el sistema; para esto se utiliza una máquina de corte con disco, que permite un corte preciso a  $90^\circ$  para la sujeción con los bujes. Las plantillas se imprimen en papel, luego se unen a cada tubo, para rotular cada elemento y proceder al corte.



*Figura 3.7* Plantilla final de los brazos de suspensión

El corte detallado de cada elemento se realiza con una sierra, lo más cercano posible a la marca realizada con la plantilla, en las formas más complicadas se utilizan limas de diferentes geometrías para aumentar la precisión en el corte.



*Figura 3.8 Corte del tubo finalizado*

### **3.3 Procesos sin arranque de viruta**

#### **3.3.1 Corte mediante chorro de agua a presión**

Es un proceso mecánico, que permite cortar el material con el uso de un chorro de agua a gran velocidad, puede contener partículas abrasivas que permiten cortar materiales duros como: metales, piedras, cerámica o materiales compuestos.

Este proceso ofrece grandes ventajas, como evitar que el material se vea afectado por el calor existente en otros procesos de corte, evita estrés mecánico de las piezas, permite realizar geometrías muy complejas y detalladas, reduce la pérdida de material debido al corte, etc.

#### **3.3.2 Preparación de las placas**

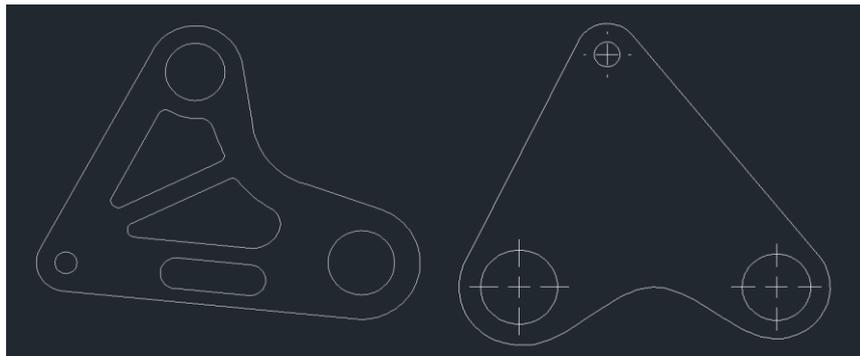
Varios elementos de la suspensión como balancines, placas de unión al chasis y unión de los brazos inferiores con push rods, se fabrican en chapa metálica por medio de corte por agua.



**Figura 3.9** Modelado en CAD del balancin posterior

Para el proceso de corte de las placas, al modelo final se lo envía en formato 2D, como se observa en la figura 3.10, junto con el material a una empresa local que presta el servicio de corte con chorro de agua. Es importante señalar que al momento de realizar corte para agujeros donde irán pernos o pasadores, se envié con dimensiones menores en 0,3 mm aproximadamente, ya que la máquina no realiza un corte recto, sino tiene un ligero ángulo.

Se debe tomar en cuenta el orden en el que se han colocado los elementos, pues luego del corte es necesario conocer cuál es su ubicación correcta para el ensamble. Para el caso de los balancines al ser formados por dos placas idénticas cada uno, únicamente se necesita enviar un modelo de la parte posterior y uno de la parte delantera.



**Figura 3.10** Modelado en 2D de los balancines para corte por chorro de agua.



*Figura 3.11 Balancín delantero ensamblado en el vehículo.*

### **3.4 Procesos de soldadura**

#### **3.4.1 Soldadura MIG**

Es un proceso que establece un arco eléctrico entre la pieza a soldar y el electrodo, que es un hilo continuo. La protección del arco se realiza mediante un gas activo (MAG) o en este caso inerte (MIG).

Entre las características del procedimiento de soldadura MIG están:

- Fuente de calor: por arco eléctrico.
- Electrodo: consumible.
- Tipo de protección: por gas inerte.
- Material de aporte: externo con electrodo consumible.

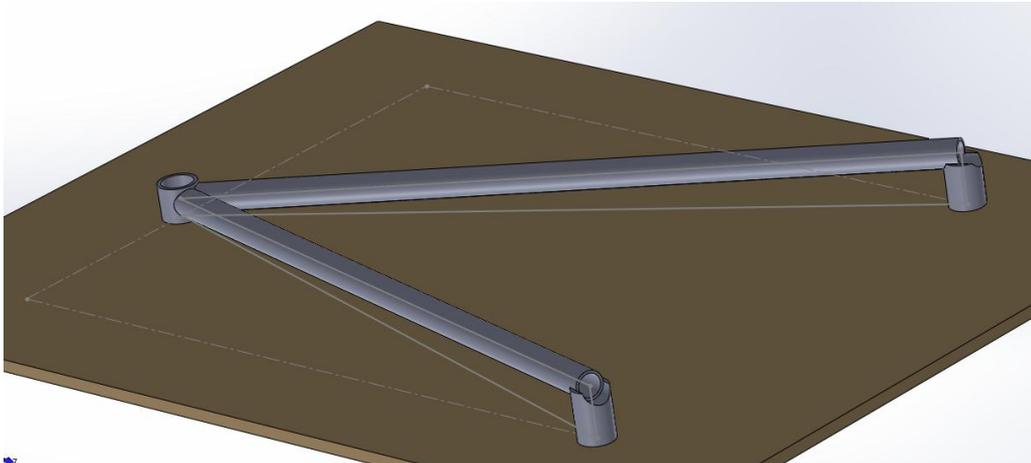
Este proceso es más frecuentemente utilizado dada su productividad y facilidad de automatización. Además por su flexibilidad, pues permite soldar aceros de baja aleación, inoxidable, aluminio, cobre, en espesores desde los 0.5mm y en varias posiciones. Por su protección por gas, se garantiza cordones de soldadura continuos, uniformes y libres de impurezas.

Los parámetros a tener en cuenta para este proceso son: la velocidad de alimentación del hilo, su diámetro, el voltaje a utilizar y el caudal de salida del gas.

Al producir cordones gruesos, presentan mayor temperatura, por lo que se debe usar soldadura por puntos y así evitar que el calor altere las propiedades del material.

### 3.4.2 Soldadura de los brazos de suspensión

Con todos los elementos listos, se procede a su soldadura para formar cada parte de la suspensión. Se usa plantillas para colocar cada parte y así asegurar que no exista desviación excesiva que podría alterar el comportamiento geométrico de la suspensión.



*Figura 3.12* Plantilla para soldadura elaborada en SolidWorks

Finalmente luego de preparar los materiales y sujetarlos con ayuda de bridas para evitar que se muevan, se procede a la soldadura de cada brazo de suspensión.



*Figura 3.13* Proceso de soldadura de brazos de suspensión

### 3.5 Soldadura de los anclajes de la suspensión

Para ensamblar la suspensión al chasis, es necesario tener los puntos de anclaje soldados. Para esto se inicia con la alineación del mismo con respecto al piso, para así tener referencias más precisas. A continuación se marcan puntos de referencia de cada placa de sujeción, para garantizar que los puntos estén lo más precisos posibles. Se utiliza un alineador laser.



*Figura 3.14 Alineación del chasis con ayuda de láser.*



*Figura 3.15 Puntos de referencia para la suspensión realizados en el chasis*

Cuando la posición de cada placa es la correcta se realizan dos puntos iniciales de soldadura para que permanezcan fijas y proceder con mayor comodidad al cordón de soldadura. Se debe tomar en cuenta la temperatura al momento de soldar, pues como se explicó anteriormente las propiedades del material cambian, llegando a debilitar

elementos del chasis, además de variar ligeramente la alineación de las placas de sujeción.

Una vez que todos los elementos de sujeción están unidos al chasis, se realiza una limpieza de las salpicaduras propias de la soldadura, para ser pintados y luego proceder a ensamblar los brazos, rockers y amortiguadores; utilizando pernos, arandelas y tuercas requeridas por el reglamento de la competencia.

### **3.6 Ensamble de la suspensión**

Con todos los elementos de la suspensión listos, se procede al ensamble. Para esto se requiere que el chasis esté levantado por gatos hidráulicos, ubicados de manera que no interfieran al colocar las partes de la suspensión. Siguiendo los pasos descritos a continuación, se logra un ensamble más cómodo y rápido:

- En una mesa, se unen el amortiguador y el balancín, utilizando el perno requerido, además se colocan arandelas y tuercas de seguridad.
- Al conjunto balancín amortiguador se los coloca, en los anclajes para la parte delantera, y en los pernos de sujeción para la parte posterior; de manera que estén en el mismo plano. Hay que tener en cuenta que los balancines tengan colocados los rodamientos respectivos que facilitan su rotación.



*Figura 3.16 Conjunto balancín –amortiguador ensamblado en el vehículo*

- Se procede a colocar el brazo de suspensión inferior, el mismo debe tener colocadas las rótulas esféricas con una tuerca para sujetarla en la posición requerida. En el momento de colocar los pernos de sujeción con el chasis ubicar los topes o espaciadores, que permiten mantener centrada la rótula entre las placas de sujeción.

- Se realiza el mismo paso anterior para el brazo de suspensión superior. Luego se coloca el push rod, primero en el rocker, y luego se lo conecta con el brazo inferior. Nuevamente se colocan los espaciadores para centrar las rótulas.



*Figura 3.17 Rótula centrada mediante espaciadores*

- Con los brazos de suspensión en su lugar, se procede a ensamblar la mangueta. Inicialmente se coloca el brazo de suspensión inferior, luego el superior, y finalmente, la bieleta de dirección en la parte delantera, o el brazo de ajuste de convergencia y divergencia en la parte posterior. Aquí también se deben colocar los espaciadores para las rótulas.



*Figura 3.18 Brazo de convergencia posterior ensamblado con la mangueta.*

- Es importante mencionar que todos los pernos utilizados para los pasos de ensamble descritos anteriormente, deben cumplir con el grado SAE 8.8, además de tener dos arandelas planas y la respectiva tuerca de seguridad.
- Se conectan las cañerías de los frenos y se procede a purgar el sistema.
- Finalmente se colocan las ruedas con el apriete respectivo de sus tuercas, para luego retirar los gatos hidráulicos y que el vehículo repose sobre sus ruedas.



*Figura 3.19* Ensamble final de la suspensión posterior

### 3.7 Costos de la manufactura del sistema de suspensión

Se toman en consideración el costo de los materiales, los elementos normalizados para el ensamble e importados, y los procesos de manufactura realizados con proveedores externos. Es importante mencionar que no se considera el costo de aquellos elementos mecanizados, contruidos, ensamblados o soldados por los estudiantes involucrados en el proyecto.

#### 3.7.1 Costo de la materiales

Constituyen todos los materiales requeridos para construir el sistema de suspensión, y que se compran en el medio local. El detalle de los materiales se encuentra en la tabla 3.1

*Tabla 3.1* Costo de los materiales utilizados en el sistema de suspensión

Descripción	Proveedor	Cantidad	Dimensiones	Valor total (\$)
Plancha de acero ASTM A36 2 mm	Talleres Mejía	1	0,50 X 0.70 m	\$ 12,75
Plancha de acero ASTM A36 3 mm	Talleres Mejía	1	0,5 X 0.40 m	\$ 7,28
Acero AISI 4340	Comercial Rulitec	2	25,4mm x 30mm	\$ 12,00
Acero de transmisión AISI 1018	Comercial Rulitec	3	25,4 mm x 25 mm	\$ 9,00
Tubo estructural de 5/8	Megahierro	2	5/8 x 6m	\$ 9,00
Tubo estructural de 3/4	Megahierro	1	¾ x 6m	\$ 5,00
TOTAL:				\$ 55,03

### 3.7.2 Costo de los elementos normalizados e importados

La tabla siguiente, describe el costo de las piezas y partes adquiridas para la construcción y ensamble del sistema de suspensión.

*Tabla 3.2 Costo de los elementos normalizados de la suspensión*

<b>Descripción</b>	<b>Proveedor</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Valor total (\$)</b>
Amortiguador Manitou Swinger	Amazon	4	144,00	576,00
Aro Braid Formrace	Braid	8	424,13	3.393,02
Neumático Hoosier Slicks	Hoosier	4	255,92	1.023,68
Neumático Hoosier para lluvia	Hoosier	4	278,32	1.113,28
Rótulas esféricas M6 x1 R	Pegasus Autoracing	26	34,23	889,85
Rótulas esféricas M6 x 1 L	Pegasus Autoracing	12	35,18	422,10
Rótulas esféricas M8 x 1	Pegasus Autoracing	18	42,28	760,95
Rodamiento radial de agujas	Hivimar	8	1,80	14,40
Rodamiento axial de agujas	Hivimar	8	3,00	24,00
Perno SAE 8.8 M10	Banco del Perno	2	0,25	0,50
Perno SAE 8.8 M8	Banco del Perno	16	0,06	0,96
Perno SAE 8.8 M6	Banco del Perno	32	0,05	1,60
Arandela plana M10	Banco del Perno	4	0,05	0,20
Arandela plana M8	Banco del Perno	32	0,02	0,64
Arandela plana M6	Banco del Perno	64	0,02	1,28
Tuerca de seguridad M10	Banco del Perno	2	0,10	0,20
Tuerca de seguridad M8	Banco del Perno	16	0,04	0,64
Tuerca de seguridad M6	Banco del Perno	32	0,04	1,28
<b>TOTAL:</b>				<b>\$ 8.224,58</b>

### 3.7.3 Costo del mecanizado

La tabla 3.3 muestra el costo del corte por chorro de agua utilizado para la construcción de los rockers y las placas de sujeción de la suspensión.

*Tabla 3.3 Costo del proceso de corte por agua*

<b>DESCRIPCIÓN:</b>	<b>PROVEEDOR</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR TOTAL (\$)</b>
Corte rocker	Ingmatricom Cía. Ltda.	8	36,00 + IVA
Corte placas de sujeción suspensión 2mm	Ingmatricom Cía. Ltda.	52	57,33 + IVA
Corte placas de sujeción suspensión 3mm	Ingmatricom Cia. Ltda.	4	8,71 + IVA
		<b>TOTAL</b>	\$ 114,28

El costo total para la construcción del sistema de suspensión tomando en consideración los materiales, elementos normalizados y el corte por agua, es de \$ 8393.89.

### 3.8 Sumario

En este capítulo se revisaron todos los procesos de manufactura utilizados para la construcción del sistema de suspensión, tales como mecanizado de piezas, corte mediante chorro de agua a presión y soldadura MIG.

Además se describe el proceso a seguir para la construcción de cada elemento de la suspensión, desde las dimensiones del material base, las dimensiones finales que debe tener cada pieza, las herramientas y equipos adicionales utilizados para su fabricación.

Se estableció un proceso lógico a seguir para el ensamble del sistema de suspensión, incluyendo pequeños detalles a tomar en cuenta para garantizar que el proceso sea más rápido, fácil y que permita un correcto funcionamiento del sistema de

suspensión, tales como el uso de los topes o espaciadores utilizados para centrar las rótulas entre los anclajes de la suspensión.

Finalmente se recogen los costos de los materiales, elementos normalizados y demás piezas que fueron adquiridas para el diseño y construcción del sistema de suspensión.

## **CAPÍTULO IV**

### **VERIFICACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN**

#### **4.1 Introducción**

En este capítulo se realiza una verificación y análisis del comportamiento del sistema de suspensión antes y durante la competencia Formula Student.

Inicialmente se verifican las características finales del sistema de suspensión, como su peso, geometría y las medidas finales del sistema, para luego realizar un breve análisis de las pruebas realizadas previo al envío del vehículo hacia la competencia.

A continuación se realiza una descripción de las verificaciones realizadas específicamente al sistema de suspensión durante la competencia Formula Student, como, la revisión técnica, de seguridad y la plataforma de inclinación. Luego se analiza el comportamiento de la suspensión durante los 23km de recorrido que tuvo en pista en el transcurso de todas las pruebas realizadas.

Finalmente y por la experiencia adquirida durante el proceso de diseño, construcción y la competencia, se elabora un compendio de cambios y mejoras y recomendaciones sugeridas al el sistema de suspensión; para futuros proyectos a realizarse en la universidad.

#### **4.2 Verificación del sistema de suspensión**

Una vez terminada la construcción, se procede a realizar pruebas al sistema de suspensión para verificar que cumple con los parámetros dispuestos en el diseño y en el reglamento. Para esto se realizan mediciones en la geometría y dimensiones finales una vez construido el vehículo.

## Peso del sistema de suspensión

Se presenta una tabla con el peso de los elementos que conforman el sistema de suspensión, es importante mencionar que no están incluidos los pesos de la mangueta, neumáticos y aros.

*Tabla 4.1 Peso de los elementos de suspensión*

<b>Elemento</b>	<b>Masa (kg)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total</b>
Brazo delantero superior	0,518	2	1,036
Brazo delantero inferior	0,492	2	0,984
Push rod delantero	0,228	2	0,456
Brazo posterior superior	0,597	2	1,194
Brazo posterior inferior	0,414	2	0,828
Push rod posterior	0,292	2	0,584
Amortiguador	0,645	4	2,58
Balancín delantero	0,172	2	0,344
Balancín posterior	0,226	2	0,452
Pernos M6	0,026	22	0,572
Pernos M8	0,056	8	0,448
Pernos M10	0,095	4	0,38
		<b>Total</b>	<b>9,858 kg</b>

Se verifican las medidas de la batalla del vehículo, así como el ancho de vía delantero y posterior, obteniendo los siguientes resultados:

- **Batalla:** 1605 mm
- **Ancho de vía delantero:** 1405 mm
- **Ancho de vía posterior:** 1345 mm

Estas medidas en relación al diseño realizado en CAD varían en: +5mm para la batalla, +5mm para el ancho de vía posterior, y en -5mm para el ancho de vía anterior. Esta variación es considerada aceptable, dada la falta de herramientas que permitan una mayor exactitud en el momento de construcción y ensamble de los elementos de suspensión y del chasis.

Para la alineación de la suspensión, se realiza en una superficie plana, tomando en cuenta aquellos que son relativos a la línea de centro del chasis y otros entre las ruedas.

#### **4.2.1 Comportamiento del sistema de suspensión en sus primeras pruebas**

Una vez terminada la construcción y ensamble del sistema de suspensión, se realizan pruebas para verificar que el sistema de suspensión resista los esfuerzos en pista. Previo a la competencia, por la poca disponibilidad de tiempo, se realizan pequeñas pruebas de rodaje para comprobar el sistema de dirección y de frenos, además de las pruebas en el banco dinamométrico para la programación del sistema de inyección y encendido del motor, donde se prueba en cierta medida la suspensión posterior.



*Figura 4.1 Pruebas para programación del motor*

#### **4.3 Comportamiento del sistema de suspensión en la competencia Formula Student**

Durante la competencia, realizada en Silverstone Inglaterra, inicialmente se somete al vehículo a verificaciones que garanticen que cumpla con el reglamento y que además sea seguro para quien lo conduzca. Entre las pruebas realizadas, aquellas que toman en cuenta al sistema de suspensión, y que se encuentran en el formato de inspección técnica de la organización se detallan a continuación, en el orden en el que el vehículo es presentado a la inspección:

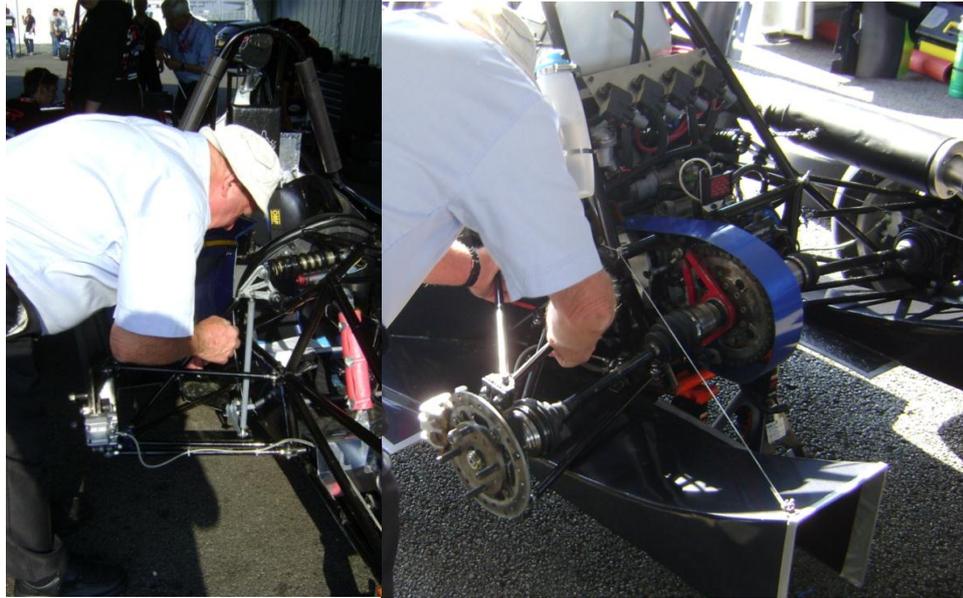
##### **4.3.1 Revisión técnica (Tech) y de seguridad (Safety)**

- Revisión del diámetro mínimo de los neumáticos (8 pulgadas), y los neumáticos de lluvia con un mínimo de 2,4 mm de labrado.
- Medida mínima de la batalla del vehículo de 1525 mm.

- Revisión inicial de los anclajes de todos los elementos de la suspensión, con pernos mínimo grado SAE 8.8, con arandelas y tuercas de seguridad, con un mínimo de 2 hilos de rosca sin cubrir o sobrepasados.
- Amortiguadores delanteros y posteriores con recorrido mínimo de 50 mm.
- Revisión de la integridad de los anclajes de suspensión.
- Las rótulas que se usen para ajustar distancias, deben tener tuercas que eviten el aflojamiento.
- Distancia suficiente al piso, para que ninguna parte, excepto los neumáticos, esté en contacto con la pista.
- Para la verificación de seguridad, se comprueban algunos elementos de los revisados anteriormente, pero tomando en cuenta que sean lo suficientemente robustos y firmes en su fijación, para esto el juez a cargo aplica fuerza sobre las partes de la suspensión.



*Figura 4.2 Inspección técnica realizada a la suspensión*



*Figura 4.3 Revisión de seguridad realizada a la suspensión*

#### **4.3.2 Inspección en la plataforma de inclinación**

En esta prueba, se verifica la estabilidad del vehículo. Todos los neumáticos del monoplaza están en contacto con la plataforma, que está inclinada a 60 grados con respecto a la horizontal. El monoplaza superó esta prueba en el primer intento.



*Figura 4.4 Prueba de inclinación realizada a 60 grados*

### 4.3.3 Análisis del comportamiento de la suspensión en pista



*Figura 4.5 Vehículo durante la competencia de velocidad [2]*

Durante la competencia, el vehículo participó en las siguientes pruebas:

- **Sprint**, que consiste en una sola vuelta alrededor del circuito preparado para la competencia, de los 4 intentos el mejor tiempo fue de 85,491 segundos obteniendo un puntaje de 7,5.
- **Prueba de resistencia**, mide la resistencia del vehículo al recorrer 22km. En esta prueba el monoplaza completo el 86,4% de la carrera, hasta detenerse por la rotura de la cadena del diferencial. El puntaje obtenido fue de 19.
- Es importante recalcar que no se participa en los eventos de aceleración y skid pad, puesto que el vehículo no logró completar el proceso de inspección técnica a tiempo para correr estos eventos.

Tomando en consideración las pruebas realizadas durante la competencia, el vehículo recorre aproximadamente 23 km en pista. Para determinar si el neumático tiene un buen contacto con el piso se verifica el desgaste en las ruedas.

El neumático posterior izquierdo presentaba mayor desgaste en la zona exterior de la superficie de contacto con la pista, como se observa en la figura 4,6, por lo que consideramos necesario un reajuste del reglaje del camber de esa rueda. Los demás neumáticos presentan desgaste similar entre ellos.



*Figura 4.6 Degradación del neumático posterior izquierdo luego de la competencia*

#### **4.4 Cambios y mejoras propuestas al sistema de suspensión**

Tras la experiencia obtenida durante el desarrollo de la presente investigación y además con la participación en el evento Formula Student, se establecen los posibles cambios y mejoras de los elementos del sistema de suspensión. A continuación se proponen soluciones para un diseño futuro.

##### **4.4.1 Brazos de suspensión**

Si bien los brazos de suspensión fabricados en tubos de acero estructural no presentan daños o deformaciones durante las pruebas y la competencia, se sugiere que para trabajos futuros se analice el uso de tubos de menor área o incluso se incursione en el uso de tubos de fibra de carbono, con el fin de reducir el peso de los brazos de suspensión y por tanto el peso global del vehículo; además por la posibilidad de encontrar proveedores de tubos de fibra de carbono realizados a medidas específicas.



**Figura 4.7** Brazos de suspensión elaborados en fibra de carbono

Los ángulos de anti-hundimiento y anti-levantamiento hacen que la construcción de los brazos de suspensión tome mayor tiempo. Se recomienda analizar la posibilidad de que para un siguiente diseño, se utilicen brazos completamente paralelos para que el tiempo de construcción disminuya, y se garantice una mayor precisión de la geometría de los brazos.

El diseño de los anclajes de los brazos de suspensión, facilita colocar los puntos de anclaje en los lugares correctos en el chasis; disminuyendo el tiempo requerido para el ensamble del sistema. Se recomienda que para siguientes vehículos, se ubiquen perfiles de acero como los que se observa en la figura 4,8 con la finalidad de restar aún más el tiempo de soldadura y ensamble en el chasis, además de brindar mayor rigidez a estos anclajes.



**Figura 4.8** Anclaje de suspensión mediante perfil de acero

Todos los puntos de anclaje, tanto de la suspensión como de la dirección, deben ser lo más rígidos posible. Además se recomienda que sean conexiones sometidas a cortante doble.

La unión de la rótula con el buje facilita la construcción de los brazos de suspensión y el ensamble de los mismos en el sistema, se recomienda adquirir rótulas esféricas forradas, como las mostradas en la figura 4.2. Así se tiene un mejor funcionamiento de los brazos en su rótula de ensamble con la mangueta, y mayor facilidad para la construcción.



**Figura 4.9** Rótula esférica forrada [24]

Las rótulas esféricas utilizadas en los puntos de conexión entre el chasis, los brazos, push rods, o bieleta de dirección, únicamente soportan cargas de tensión y compresión, por lo que si se las utiliza en cortante, pueden llegar a fallar.

#### **4.4.2 Amortiguadores**

Los amortiguadores se encuentran ubicados en la parte superior del chasis, en la triangulación de los soportes del arco delantero; esto provoca un aumento en la altura del centro de gravedad. Se propone que se ubiquen lo más bajo posible en el chasis, para reducir la altura del centro de gravedad, por lo que se sugiere el uso de una suspensión tipo push rod.

Los amortiguadores de bicicleta, pueden ser adecuados para la masa y fuerzas impuestas por un vehículo Formula Student, y pueden tener buenos resultados, siempre que las características del mismo lo permitan.

Por lo general este tipo de amortiguadores, tienen muy alta compresión inicial, lo que produce que la fuerza que ejerce el ciclista al pedalear se disipe hacia el muelle,

causando que la bicicleta se sacuda hacia arriba y abajo. Esta característica no es recomendable en un vehículo FSAE pues puede llevar a una posible pérdida de adherencia [25]. Por lo tanto esa característica debe ser retirada del amortiguador, mediante la puesta a punto del mismo, cambiando las válvulas internas o el fluido y su presión.

Se recomienda que se utilicen amortiguadores especiales para las competencias Formula Sae/Formula Student, como son amortiguadores Ohlins o Kaz Tech Shocks, mostrados en la figura 4.10. Estos poseen rótulas esféricas en los extremos de anclaje, así se tiene un mejor funcionamiento dentro del sistema. Este tipo de amortiguadores, permiten mayor adaptabilidad para el diseño de la suspensión, gran cantidad de información técnica referente a la competencia, y kits de mantenimiento y reparación.



*Figura 4.10 Amortiguador Ohlins TTX25 MkII [26] y Kaz Tech 7800 FSAE [27]*

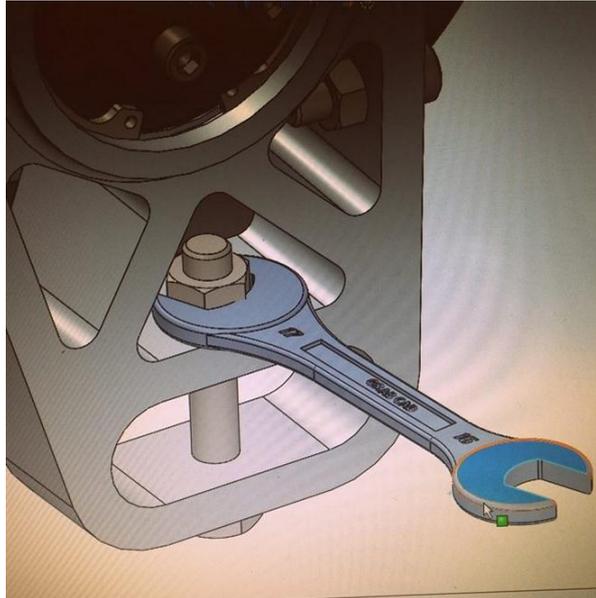
Para mayor facilidad de diseño se recomienda, ubicar los amortiguadores transversalmente con respecto al chasis, tanto en la parte delantera como posterior. Se debe tomar en cuenta, sobre todo en la parte posterior, que los amortiguadores no reciban demasiado calor del motor, pues esto altera las propiedades del fluido interno, cambiando el comportamiento esperado de los amortiguadores.

#### **4.4.3 Balancín**

La construcción del balancín toma tiempo debido a la cantidad de elementos que se deben ensamblar y soldar para llegar a la pieza final; además de la necesidad de posicionar y sujetar correctamente los elementos para que el balancín tenga la mayor exactitud de acuerdo al diseño. Se recomienda que se pueda diseñar y mecanizar el balancín como una sola pieza.

#### 4.4.4 Adaptabilidad de los pernos

La adaptabilidad de los pernos es una parte muy importante dentro del ensamble del sistema de suspensión. Se recomienda se verifique en el software CAD, que cada perno pueda ingresar a su lugar sin interferencias en el chasis o en algún elemento que forme parte del vehículo, además que las herramientas a utilizar no tengan complicaciones durante la operación de ensamble.



*Figura 4.11 Método de comprobación del diseño en CAD. YUT Racing [28]*

#### 4.4.5 Frecuencias que inciden en la suspensión

Sugerimos que para futuros diseños se realicen estudios a mayor profundidad sobre las frecuencias naturales, frecuencias críticas y los coeficientes de amortiguación deseados; para así establecer con mayor exactitud el comportamiento de la suspensión; esto unido al uso de amortiguadores específicos para la competencia, podrá lograr mejores resultados en cuanto a la maniobrabilidad del vehículo. Se sugiere revisar la propuesta de Milliken y Kasprzak en [5].

### 4.5 Sumario

En este capítulo se revisaron todas las características finales del sistema de suspensión como su peso y sus medidas finales, para determinar si existe desviaciones con respecto al diseño CAD y cuál es su porcentaje.

Se describen las pruebas realizadas previas a la competencia, donde se efectuaron calibraciones del sistema de frenos y con mayor énfasis la calibración del motor en el banco dinamométrico; aquí la suspensión posterior fue en cierta manera probada.

Se especificaron cada una de las revisiones técnicas realizadas a la suspensión durante la competencia Formula Student, donde la misma logro aprobar todas las verificaciones en conjunto con los demás sistemas del vehículo. Además se analiza su comportamiento al finalizar las pruebas de *sprint* y *endurance*, en las que el vehículo completó 23 km de recorrido final.

Finalmente se realiza un compendio sobre los cambios y mejoras que se sugieren al sistema de suspensión, en aspectos como: brazos de suspensión, amortiguadores, balancines, rótulas y la adaptabilidad de los pernos durante el diseño del sistema.

## CONCLUSIONES

Una vez finalizado el presente trabajo se concluye lo siguiente:

- Los objetivos del presente proyecto fueron cumplidos satisfactoriamente, pues el sistema de suspensión, al igual que otros sistemas del vehículo, lograron cumplir con las revisiones técnicas y de seguridad impuestas por la organización del evento Formula Student UK 2014, llegando en el primer año a participar en los eventos dinámicos de la competencia.
- La revisión bibliográfica inicial es importante pues ayuda a conocer los conceptos fundamentales y las restricciones del reglamento a tener en cuenta para el diseño del sistema de suspensión. Además permite establecer un proceso inicial para el diseño del sistema, sin embargo el acceso limitado a información técnica detallada de algunas partes limitan el diseño y el uso adecuado de las mismas.
- El uso de una metodología de diseño, permite tomar decisiones iniciales y tener un punto de partida para diseñar el sistema de suspensión; además determina cuales son aquellas características, partes, materiales y procesos a utilizar para el desarrollo del proyecto, constituyéndose en una guía a seguir para futuros proyectos Formula Student dentro de la universidad.
- El efecto de anti-hundimiento y anti-levantamiento presente en el vehículo por la disposición de los brazos de suspensión, permite al vehículo mejorar sus prestaciones de aceleración y frenado en la pista.
- El análisis de la posición del centro de balanceo del vehículo permite establecer los puntos en que se encontrará durante el funcionamiento de la suspensión, evitando que se ubique debajo del piso con la finalidad de contrarrestar el efecto de *jacking*.
- Se utilizó un camber negativo estático en los neumáticos delanteros y posteriores de  $-1,5^\circ$ , lo que permite que en un paso por curva los neumáticos

siempre tengan un buen contacto con la calzada, permitiendo que exista una buena adherencia con la pista.

- La posición de los anclajes de los brazos de suspensión, en el chasis deben estar a menos de 10 cm de un nodo para evitar esfuerzos excesivos dentro de la estructura, además se determina que los brazos se encuentran sometidos a esfuerzos de tensión y compresión por lo que no es necesario un análisis por elementos finitos para su diseño.
- En las simulaciones, se determinó que las zonas donde se encuentran los máximos esfuerzos es en los rockers, que son los elementos críticos dentro del sistema, es por esto que se realiza un análisis por elementos finitos para determinar si el modelo de los mismos resisten los esfuerzos presentes
- La posición de los amortiguadores en un mismo plano con el balancín permite una mejor distribución de los esfuerzos producidos por la rueda, por lo que en la parte delantera se consideró una ubicación perpendicular a la rueda, y en la parte posterior una posición inclinada a  $50^\circ$ , con respecto a la horizontal.
- Para evitar que se produzcan tensiones internas en el material por la elevada temperatura en los nodos al momento de soldar los brazos de suspensión, el cordón de soldadura se realiza por medio de puntos continuos.
- La construcción mediante corte por agua de los soportes del sistema de suspensión, permite un mejor armado y soldado de los soportes en el chasis, facilitando la construcción y el ensamble de todo el sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] SAE International. (2014) SAE International. [Online].  
<http://students.sae.org/cds/formulaseries/about.htm>
- [2] IMechE. (2013) Institution of Mechanical Engineers. [Online].  
<http://events.imeche.org/formula-student/about-us>
- [3] Formula Student 2014 Rules. (2014) Formula Student UK. [Online].  
[http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2014\\_fsae\\_rules.pdf](http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2014_fsae_rules.pdf)
- [4] Formula Student Germany. (2014, Julio) Formula Student Germany Meda. [Online]. <http://media.formulastudent.de/FSG14>
- [5] Douglas Milliken and Edward Kasprzak, "Suspension and Steering - The Basics," in *Learn and Compete*. Londres: Racecar Graphic Limited, 2012 , p. 46.
- [6] Formula Group T. (2013) FORMULA GROUP T. [Online].  
<https://www.formulagroupt.be/pages/eve>
- [7] Braid Wheels. (2014) Braid Wheels. [Online].  
[http://www.braid.es/wheels/products/competition-wheels\\_p8/formula-student-wheels\\_p83.html](http://www.braid.es/wheels/products/competition-wheels_p8/formula-student-wheels_p83.html)
- [8] Tony Pashley, *How to Build Motorcylve-engined Racing Cars*, Cuarta ed. Reino Unido: Veloce Publishing, 2012.
- [9] Allan Staniforth, *Competition Car Suspension*, Cuarta ed. California, Estados Unidos: Haynes Publishing, 2006.
- [10] Nugnes di Franco. (2013, Enero) OMNICORSE. [Online].  
<http://www.omnicorse.it/magazine/24083/f1-ferrari-vs-red-bull-pull-vince-contro-push>
- [11] Mustone. (2012, Marzo) Foro Coches. [Online].  
<http://m.forocoches.com/foro/showthread.php?t=2084287&page=8>
- [12] Formula Seven. (2013, Abril) Formula Seven. [Online]. [www.formula-seven.com](http://www.formula-seven.com)
- [13] Ali Murtuza. (2012, Octubre) 10 Cast Net. [Online].  
<http://the10castnetwallpaper.blogspot.com/2012/10/rod-ends.html>

- [14] Jock Farrington, "Redesing of an FSAE Racing Car," University of Southern Queensland, Queensland, Tesis de Pregrado 2011.
- [15] Carroll Smith, *Tune to Win*. Fallbrook, CA: Aero Publishers, 1978.
- [16] William Milliken and Douglas Milliken, *Race Car Vehicle Dynamics*. Warrendale: SAE, 1995.
- [17] Ion Empanan. (2013, Abril) Formula f1. [Online]. <http://www.formulaf1.es/34271/la-puesta-a-punto-de-un-f1/image4-2/>
- [18] Robert Norton, *Diseño de Maquinaria*, Cuarta ed. Mexico DF, Mexico: McGraw Hill, 2004.
- [19] DUT Racing Team. (2014, Abril) Facebook DUT Racing Team. [Online]. <https://www.facebook.com/FSteamDelft>
- [20] Lucas Fornace, "Weight Reduction Techniques Applied to Formula SAE Vehicle Design," UNIVERSITY OF CALIFORNIA, San Diego, California , Tesis de Maestria 2006.
- [21] Vergard A. Brevik, "Design, Analysis and Simulation of the Suspension System in the FS Team UiS Race Car," Universiti of Stavager, Stavanger, Masters Thesis 2013.
- [22] Luis Bermeo, Jenny Calle , and Ruben Carrión , "Diseño y construcción de un chasis tubular de un vehículo monoplace para la competición en la formula SAE," Universidad Politecnica Salesiana, Cuenca, Tesis de Pregrado 2014.
- [23] David Santiago Mejia, "Diseño de manguetas delanteras y posteriores de un vehículo monoplace para la competición en la formula Sae," Universidad Politecnica Salesiana, Cuenca, Tesis de pregrado 2015.
- [24] Pegasus Autoracing Supplies. (2015, Feb.) Pegasus Autoracing Supplies. [Online]. <https://www.pegasusautoracing.com/>
- [25] Pat Clarke. (2005, Octubre) Formula Student Germany. [Online]. <http://www.formulastudent.de/academy/pats-corner/advice-details/article/dampers-shock-absorbers/>
- [26] Ohlins Advanced Susoension Technology. (2015, Febrero) Ohlins USA. [Online]. <http://www.ohlinsusa.com/ohlins-ttx-25-fsae>
- [27] Kaz Technologies. (2015, Febrero) Kaz Technologies. [Online].

<http://www.kaztechnologies.com/fsae/shocks/>

[28] YUT Racing. (2015, Febrero ) YUT Racing Facebook page. [Online].

<https://www.facebook.com/YtuRacing>

[29] Hoosier Racing Tire. (2015, Enero) Hoosier Racing Tire. [Online].

<https://www.hoosiertire.com/spring.htm>

[30] Tubos Argentinos. (2015, Enero) Tubos Argentinos. [Online].

<http://tubosarg.com.ar/descargas/catalogo-tubosestructurales.pdf>

## ANEXO 1: DATOS DE LOS NEUMÁTICOS [29]

---

**TIRE SIZE: 20.5 x 7.0 - 13 C2500**  
**COMPOUND = R25B**  
**RIM WIDTH = 6"**  
**PRELOAD = 0**

---

	<b>ACTUAL LOAD</b>	<b>STATIC SPRING RATE (lbs/in)</b>
<b>AIR = 14 PSI</b>	200 lbs.	961.06 lbs.
	300 lbs.	1083.62 lbs.
	400 lbs.	1104.34 lbs.
<b>AIR = 16 PSI</b>	200 lbs.	1053.66 lbs.
	300 lbs.	1222.01 lbs.
	400 lbs.	1260.39 lbs.
<b>AIR = 18 PSI</b>	200 lbs.	1130.16 lbs.
	300 lbs.	1364.19 lbs.
	400 lbs.	1419.30 lbs.

## ANEXO 2: CATÁLOGO DE TUBOS PARA LA SUSPENSIÓN [30]

DIMENSIÓN Size D		ESPESOR Thickness e	PESO Weight	AREA DE LA SECCIÓN Sectional Area	MOMENTO DE INERCIA Moment of Inertia	MÓDULO DE INERCIA Elastic Modulus	RADIO DE GIRO Gyration Radius
Pulg. Inches	mm	mm	kg/m	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm
5/8"	15.87	0.80	0.297	0.379	0.110	0.138	0.538
		0.90	0.332	0.423	0.121	0.153	0.535
		1.10	0.401	0.510	0.143	0.180	0.528
		1.20	0.434	0.553	0.153	0.192	0.525
		1.60	0.563	0.717	0.188	0.237	0.512
3/4"	19.05	0.80	0.360	0.459	0.195	0.205	0.652
		0.90	0.403	0.513	0.216	0.227	0.648
		1.10	0.487	0.620	0.255	0.268	0.642
		1.20	0.528	0.673	0.274	0.288	0.638
		1.60	0.689	0.877	0.343	0.360	0.625
7/8"	22.22	2.00	0.841	1.071	0.402	0.422	0.613
		0.80	0.423	0.538	0.315	0.283	0.765
		0.90	0.473	0.603	0.349	0.315	0.761
		1.10	0.573	0.730	0.416	0.374	0.755
		1.20	0.622	0.792	0.447	0.403	0.751
1"	25.40	1.60	0.814	1.036	0.564	0.508	0.738
		2.00	0.997	1.270	0.668	0.601	0.725
		0.80	0.485	0.618	0.477	0.376	0.878
		0.90	0.544	0.693	0.530	0.417	0.875
		1.10	0.659	0.840	0.633	0.498	0.868
1 1/8"	28.57	1.20	0.716	0.912	0.682	0.537	0.865
		1.60	0.939	1.196	0.867	0.682	0.851
		2.00	1.154	1.470	1.033	0.813	0.838
		0.80	0.548	0.698	0.686	0.480	0.991
		0.90	0.614	0.782	0.763	0.534	0.988
1 1/4"	31.75	1.10	0.745	0.949	0.914	0.640	0.981
		1.20	0.810	1.032	0.986	0.690	0.978
		1.60	1.064	1.356	1.260	0.882	0.964
		0.80	0.611	0.778	0.949	0.598	1.105
		0.90	0.685	0.872	1.058	0.666	1.101
1 1/4"	31.75	1.10	0.831	1.059	1.269	0.799	1.094
		1.20	0.904	1.152	1.371	0.863	1.091
		1.60	1.190	1.516	1.759	1.108	1.077
		2.00	1.467	1.869	2.116	1.333	1.064
		2.50	1.803	2.297	2.521	1.588	1.048