



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**“REDISEÑO MECÁNICO CON OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA  
DE LAS MANGUETAS PARA EL PROTOTIPO FÓRMULA SAE  
DE LA CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ”**

**Trabajo de titulación**

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**AUTORES: FRANKLIN ROBERTO BALLIN JUNA**

**DIEGO PAUL HERRERA SANTAMARÍA**

Riobamba – Ecuador

2020



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**“REDISEÑO MECÁNICO CON OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA  
DE LAS MANGUETAS PARA EL PROTOTIPO FÓRMULA SAE  
DE LA CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ”**

**Trabajo de titulación**

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**AUTORES:** FRANKLIN ROBERTO BALLIN JUNA

DIEGO PAUL HERRERA SANTAMARÍA

**DIRECTOR:** Ing. CELIN ABAD PADILLA PADILLA

Riobamba – Ecuador

2020

**©2020, Franklin Roberto Ballin Juna & Diego Paul Herrera Santamaría**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Franklin Roberto Ballin Juna y Diego Paúl Herrera Santamaría, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 21 de agosto de 2020



Franklin Roberto Ballin Juna  
060446614-4



Diego Paúl Herrera Santamaría  
180475674-8

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Tecnológica, **REDISEÑO MECÁNICO CON OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE LAS MANGUETAS PARA EL PROTOTIPO FÓRMULA SAE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**, realizado por los señores: **FRANKLIN ROBERTO BALLIN JUNA y DIEGO PAUL HERRERA SATAMARÍA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

**FIRMA**

**FECHA**

Ing. José Francisco Pérez Fiallos

**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL** \_\_\_\_\_

**2020-08-21**

Ing. Celin Abad Padilla Padilla

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN** \_\_\_\_\_

**2020-08-21**

Ing. Edwin Rodolfo Pozo Safla

**MIEMBRO DE TRIBUNAL** \_\_\_\_\_

**2020-08-21**

## DEDICATORIA

Este Trabajo de Titulación lo dedico a Dios por darme salud y una fe inquebrantable, a mi madre Carmelina por darme la vida, cariño y protección, a mis abuelitos Manuel, Dioselina por sus bendiciones y a mis hermanos Cristhian y Vicente por mantener la llama de hermandad presente. Mención especial a mis tíos Manuel, Hortensia, Petronila por guiarme hacia el camino correcto, mis primos Francisco, Zoraida y en memoria especial a Darío, por dar los mejores consejos, al igual que a toda mi familia.

Franklin

Con este trabajo de titulación me permito honrar a mi Dios quien es mi guía y fortaleza y mis ganas de seguir adelante en el transcurso de mi vida estudiantil.

A mi padre Luis Herrera por su lealtad y apoyo incondicional en los momentos difíciles.

A mi querida madre Roció Santamaria quien es mi guía que con su ternura, bondad y carácter han hecho de mí una persona de bien.

A mis hermanos Luis y Oscar que con sus locuras y consejos han transformado mis días tristes en felices.

A mi abuelita que con su sonrisa su cariño incondicional y consejos han hecho que su nieto llegue a este logro.

A esas personas que me decían que no lo lograría, gracias me ayudaron a ser más fuerte.

¡Nunca sabes cuan fuerte eres hasta que ser fuerte es la única elección que tienes! “Chuck Palahniuk”

Diego

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, a mi madre, abuelitos, tíos y primos por brindar ese gran cariño cada vez que he tocado las puertas de sus corazones en los buenos y malos momentos. Amistades que a lo largo de esta vida se han convertido en personas muy especiales, que han permitido compartir momentos inolvidables. Así mismo una enorme gratitud para el Ing. Celin Padilla y el Ing. Edwin Pozo por brindar tiempo, conocimientos en el desarrollo de nuestro trabajo.

Franklin

Agradezco infinitamente a cada una de las personas que han puesto su grano de arena en mi por verme crecer:

A mi Dios por su inmenso amor y bondad para mí y los que me rodean.

A mis padres por su cariño y apoyo incondicional que se han sacrificado por verme alcanzar mis sueños.

A si mismo al Ing. Celin Padilla por su tiempo y dedicación que ha permitido concluir este proyecto.

Al Ing. Edwin Pozo por su paciencia y amplio conocimiento en la materia que permitió un gran desenlace en este proyecto.

¡A ti vida! sabes la historia de la vida? sin ella no se puede vivir, una respuesta tan simple pero que en la boca de la persona adecuado para la persona adecuada significa demasiado.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo que a través de la Carrera de Ingeniería Automotriz que impartió sus conocimientos preparándome para la vida profesional, de la misma manera un gran Gracias a mis queridos docentes y amigos que hicieron grata mi trayectoria estudiantil.

Diego

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xvii
RESUMEN.....	xviii
SUMMARY .....	xix

### 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Justificación del proyecto .....	3
1.4 Objetivos: .....	3
1.4.1 <i>Objetivo General</i> .....	3
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	3
1.5 Alcance .....	4

### 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del arte.....	5
2.2 Fórmula SAE.....	7
2.3 Eventos Estáticos.....	7
2.3.1 <i>Diseño</i> .....	8
2.3.2 <i>Costo</i> .....	8
2.3.3 <i>Presentación</i> .....	8
2.4 Eventos Dinámicos .....	8
2.4.1 <i>Área de preparación</i> .....	9
2.4.2 <i>Área Dinámica</i> .....	9
2.4.2.1 <i>Aceleración</i> .....	9
2.4.2.2 <i>Skidpad</i> .....	10

2.4.2.3	<i>Autocross</i> .....	10
2.4.2.4	<i>Resistencia</i> .....	10
<b>2.5</b>	<b>Reglamento Fórmula SAE 2020</b> .....	<b>10</b>
2.5.1	<i>Análisis de Reglamento F-SAE</i> .....	11
<b>2.6</b>	<b>Manguetas de un Fórmula SAE</b> .....	<b>12</b>
2.6.1	<i>Funciones de las manguetas</i> .....	12
<b>2.7</b>	<b>Sistema de suspensión</b> .....	<b>13</b>
2.7.1	<i>Componentes del sistema de suspensión</i> .....	13
2.7.2	<i>Configuración de suspensión</i> .....	14
<b>2.8</b>	<b>Sistema de dirección</b> .....	<b>14</b>
<b>2.9</b>	<b>Sistema de frenos</b> .....	<b>15</b>
<b>2.10</b>	<b>Optimización de topología</b> .....	<b>16</b>
2.10.1	<i>Método de los elementos finitos (MEF)</i> .....	16
2.10.1.1	<i>Generación de la malla</i> .....	17
2.10.1.2	<i>Condiciones de Contorno</i> .....	18
<b>2.11</b>	<b>Material</b> .....	<b>19</b>
2.11.1	<i>Propiedades Mecánicas</i> .....	19
2.11.2	<i>Propiedades Físicas</i> .....	19
<b>2.12</b>	<b>Métodos de fabricación</b> .....	<b>19</b>
<b>2.13</b>	<b>Fundición</b> .....	<b>20</b>
2.13.1	<i>Consideración de parámetros para la fundición</i> .....	20
2.13.1.1	<i>Velocidad de vertido de un metal fundido</i> .....	20
2.13.1.2	<i>Gasto volumétrico</i> .....	21
2.13.1.3	<i>Tiempo requerido para llenar la cavidad de un molde</i> .....	21
2.13.1.4	<i>Solidificación de los metales</i> .....	21
2.13.1.5	<i>Tiempo de solidificación</i> .....	22
2.13.1.6	<i>Contracción</i> .....	23
2.13.1.7	<i>Diseño de la mazarota</i> .....	24
2.13.1.8	<i>Defectos de fundición</i> .....	25
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	
<b>3.1</b>	<b>Descripción del proceso de diseño</b> .....	<b>26</b>

<b>3.1.1</b>	<b><i>Identificación de la necesidad</i></b> .....	<b>26</b>
<b>3.1.2</b>	<b><i>Revisión de información</i></b> .....	<b>27</b>
<b>3.1.3</b>	<b><i>Desempeño del elemento mecánico</i></b> .....	<b>27</b>
3.1.3.1	<i>Características que debe desempeñar las manguetas delanteras</i> .....	27
3.1.3.2	<i>Características que debe desempeñar las manguetas posteriores</i> .....	27
<b>3.1.4</b>	<b><i>Cálculo y análisis de fuerzas</i></b> .....	<b>28</b>
3.1.4.1	<i>Cálculo de las fuerzas que actúa en las manguetas</i> .....	28
3.1.4.2	<i>Condición de Frenado</i> .....	29
3.1.4.3	<i>Transferencia de carga</i> .....	30
3.1.4.4	<i>Carga lateral al paso por curva</i> .....	33
3.1.4.5	<i>Fuerza aplicada en la junta dirección</i> .....	36
3.1.4.6	<i>Resumen de las fuerzas que actúan sobre la mangueta delantera y posterior</i> .....	37
<b>3.2</b>	<b><i>Diseño del prototipo</i></b> .....	<b>39</b>
<b>3.2.1</b>	<b><i>Análisis de material</i></b> .....	<b>41</b>
<b>3.3</b>	<b><i>Proceso de Optimización Topológica</i></b> .....	<b>42</b>
<b>3.3.1</b>	<b><i>Optimización de mangueta delantera</i></b> .....	<b>42</b>
3.3.1.1	<i>Mallada mangueta delantera</i> .....	45
3.3.1.2	<i>Aplicación de condiciones de contorno</i> .....	45
3.3.1.3	<i>Solución del modelo con optimización topológica</i> .....	46
<b>3.3.2</b>	<b><i>Optimización de mangueta posterior</i></b> .....	<b>47</b>
3.3.2.1	<i>Mallado de mangueta posterior</i> .....	48
3.3.2.2	<i>Condiciones de contorno</i> .....	49
3.3.2.3	<i>Solución del modelo con optimización topológica</i> .....	49
<b>3.4</b>	<b><i>Rediseño de manguetas</i></b> .....	<b>51</b>
<b>3.5</b>	<b><i>Simulación de las manguetas</i></b> .....	<b>53</b>
<b>3.5.1</b>	<b><i>Análisis de mangueta delantera</i></b> .....	<b>53</b>
3.5.1.1	<i>Calidad de malla en la mangueta delantera</i> .....	53
<b>3.5.2</b>	<b><i>Análisis mediante elementos finitos</i></b> .....	<b>54</b>
3.5.2.1	<i>Deformación total</i> .....	54
3.5.2.2	<i>Tensión Von - Mises</i> .....	55

3.5.2.3	<i>Factor de seguridad</i> .....	56
<b>3.5.3</b>	<b><i>Análisis de mangueta posterior</i></b> .....	<b>56</b>
3.5.3.1	<i>Calidad de malla mangueta posterior</i> .....	56
<b>3.5.4</b>	<b><i>Análisis mediante elementos finitos modelo posterior</i></b> .....	<b>58</b>
3.5.4.1	<i>Deformación total</i> .....	58
3.5.4.2	<i>Tensión Von Mises</i> .....	58
3.5.4.3	<i>Factor de seguridad</i> .....	59
<b>3.6</b>	<b>Construcción de las manguetas</b> .....	<b>60</b>
<b>3.6.1</b>	<b><i>Impresión 3D</i></b> .....	<b>60</b>
3.6.1.1	<i>Material " PLA " para la impresión 3D</i> .....	60
3.6.1.2	<i>PLA (Acido Poliláctico)</i> .....	60
<b>3.6.2</b>	<b><i>Detalle de impresión</i></b> .....	<b>61</b>
<b>3.6.3</b>	<b><i>Manufactura de las manguetas</i></b> .....	<b>62</b>
3.6.3.1	<i>Proceso mediante fundición en arena</i> .....	62
3.6.3.2	<i>Preparación de moldeo con arena</i> .....	63
3.6.3.3	<i>Moldeo en arena verde</i> .....	66
<b>3.6.4</b>	<b><i>Fundición de las manguetas</i></b> .....	<b>69</b>
3.6.4.1	<i>Cálculo de velocidad de vertido</i> .....	70
3.6.4.2	<i>Determinación del Gasto Volumétrico</i> .....	70
3.6.4.3	<i>Volumen mínimo de mazarota</i> .....	71
3.6.4.4	<i>Tiempo de llenado de la cavidad molde</i> .....	71
<b>3.7</b>	<b>Análisis de resultados</b> .....	<b>72</b>
<b>3.8</b>	<b>Fresado y armado de las manguetas</b> .....	<b>73</b>
<b>3.8.1</b>	<b><i>Fresado</i></b> .....	<b>73</b>
<b>3.8.2</b>	<b><i>Prensado del rodamiento</i></b> .....	<b>73</b>
<b>3.8.3</b>	<b><i>Armado de las manguetas</i></b> .....	<b>74</b>
3.8.3.1	<i>Armado de la mangueta delantera</i> .....	74
3.8.3.2	<i>Armando Mangueta Posterior</i> .....	74
<b>4.</b>	<b>GESTIÓN DEL PROYECTO</b>	
<b>4.1</b>	<b>Cronograma</b> .....	<b>75</b>

<b>4.2</b>	<b>Presupuesto.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2.1</b>	<b><i>Material.....</i></b>	<b>75</b>
<b>4.2.2</b>	<b><i>Mano de Obra.....</i></b>	<b>76</b>
<b>4.2.3</b>	<b><i>Costos Indirectos.....</i></b>	<b>76</b>
<b>4.2.4</b>	<b><i>Costo total.....</i></b>	<b>77</b>
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>78</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>79</b>
	<b>GLOSARIO</b>	
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b>	Puntaje de acuerdo con parámetros de competencia .....	7
<b>Tabla 2-2:</b>	Contracción volumétrica para distintos metales de fundición.....	24
<b>Tabla 3-2:</b>	Defectos de fundición.....	25
<b>Tabla 1-3:</b>	Características de variables importantes del vehículo de Fórmula SAE .....	29
<b>Tabla 2-3:</b>	Valor de las cargas finales para la mangueta delantera .....	37
<b>Tabla 3-3:</b>	Valor de cargas finales que actúa en la mangueta posterior .....	38
<b>Tabla 4-3:</b>	Descripción de propiedades que debe tener el material.....	41
<b>Tabla 5-3:</b>	Descripción del material seleccionado .....	42
<b>Tabla 6-3:</b>	Configuración de impresión 3D de las manguetas .....	61
<b>Tabla 7-3:</b>	Datos del diseño de las manguetas en CAD .....	70
<b>Tabla 8-3:</b>	Tabla comparativa de resultados finales .....	72
<b>Tabla 1-4:</b>	Costos Directos.....	76
<b>Tabla 2-4:</b>	Costo de mano de obra .....	76
<b>Tabla 3-4:</b>	Costos indirectos.....	76
<b>Tabla 4-4:</b>	Costo total.....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2:</b>	Manguetas del Formula SAE "Bosco 1.0" .....	5
<b>Figura 2-2:</b>	Muestra final de manguetas delanteras FESPE 2012.....	6
<b>Figura 3-2:</b>	Manguetas posteriores de FESPE 2012 .....	6
<b>Figura 4-2:</b>	Vehículo participante en Fórmula SAE .....	7
<b>Figura 5-2:</b>	Presentación del monoplaza F-SAE.....	8
<b>Figura 6-2:</b>	Inspección técnica del vehículo F-SAE .....	9
<b>Figura 7-2:</b>	Pista de Skidpad en forma de ocho .....	10
<b>Figura 8-2:</b>	Mangueta de un F-SAE.....	12
<b>Figura 9-2:</b>	Componentes del sistema de suspensión .....	13
<b>Figura 10-2:</b>	Funcionamiento suspensión A) Push - Rod, B) Pull--Rod .....	14
<b>Figura 11-2:</b>	Sistema de Dirección F-SAE .....	15
<b>Figura 12-2:</b>	Sistema de Frenos de un F-SAE .....	15
<b>Figura 13-2:</b>	Proceso de optimización topológica de un diseño preliminar.....	16
<b>Figura 14-2:</b>	Método de elemento finito .....	17
<b>Figura 15-2:</b>	Nodos y elementos de malla .....	18
<b>Figura 16-2:</b>	Condiciones de contorno.....	19
<b>Figura 17-2:</b>	Crecimiento de granos metálicos .....	22
<b>Figura 18-2:</b>	Contracción de un fundido cilíndrico durante la solidificación y enfriamiento..	23
<b>Figura 19-2:</b>	Defectos de la fundición en arena .....	25
<b>Figura 1-3:</b>	Manguetas originales fabricadas .....	27
<b>Figura 2-3:</b>	Diagrama de cuerpo libre en vista lateral de un F-SAE.....	28
<b>Figura 3-3:</b>	Transferencia de carga en frenado y desaceleración.....	30
<b>Figura 4-3:</b>	Fuerza centrífuga al paso por curva .....	33
<b>Figura 5-3:</b>	Diagrama de cuerpo libre en vista frontal .....	35
<b>Figura 6-3:</b>	D.C.L. del neumático .....	36
<b>Figura 7-3:</b>	D.C.L. de fuerzas el en giro de dirección.....	36
<b>Figura 8-3:</b>	Fuerzas en la mangueta delantera .....	38
<b>Figura 9-3:</b>	Fuerzas en la mangueta posterior.....	39
<b>Figura 10-3:</b>	Diseño del modelo original en Software CAD .....	39
<b>Figura 11-3:</b>	Puntos de anclaje en vista 3D .....	40
<b>Figura 12-3:</b>	Vista isométrica: a) Mangueta delantera, b) Mangueta posterior .....	40

<b>Figura 13-3:</b>	Proceso de exportación de archivo STEP .....	43
<b>Figura 14-3:</b>	Selección del Módulo .....	43
<b>Figura 15-3:</b>	Propiedades del material .....	44
<b>Figura 16-3:</b>	Generación de geometría .....	44
<b>Figura 17-3:</b>	Mallado del modelo preliminar.....	45
<b>Figura 18-3:</b>	Nodos y elementos modelo 1 .....	45
<b>Figura 19-3:</b>	Cargas y restricciones en la mangueta.....	46
<b>Figura 20-3:</b>	Aplicación del módulo de Topology Optimization.....	46
<b>Figura 21-3:</b>	Detalles de parámetros para la optimización .....	47
<b>Figura 22-3:</b>	Región removida por el programa es: a) 85%, b) 70% y c) 50% de masa.....	47
<b>Figura 23-3:</b>	Geometría en <i>Model</i> .....	48
<b>Figura 24-3:</b>	Mallado de mangueta posterior.....	48
<b>Figura 25-3:</b>	Nodos y elementos modelo 2.....	49
<b>Figura 26-3:</b>	Condiciones de contorno del modelo posterior.....	49
<b>Figura 27-3:</b>	Topología de la mangueta posterior.....	50
<b>Figura 28-3:</b>	Detalles de parámetros para la optimización .....	50
<b>Figura 29-3:</b>	Material removido según porcentaje: a) 85 %, b) 70%, c) 50% .....	50
<b>Figura 30-3:</b>	Exportación de archivo STL File.....	51
<b>Figura 31-3:</b>	Modelo con topología .....	51
<b>Figura 32-3:</b>	Rediseño de la mangueta delantera en distintas vistas.....	52
<b>Figura 33-3:</b>	Rediseño de la mangueta posterior en distintas vistas .....	52
<b>Figura 34-3:</b>	Calidad de malla en elementos sometidos a cargas .....	53
<b>Figura 35-3:</b>	Recomendaciones de calidad de malla.....	54
<b>Figura 36-3:</b>	Detalle del mallado sobre la geometría de análisis .....	54
<b>Figura 37-3:</b>	Resultado de Deformación Total .....	55
<b>Figura 38-3:</b>	Análisis de Tensión de Equivalente de Von Mises.....	55
<b>Figura 39-3:</b>	Factor de seguridad de la mangueta delantera .....	56
<b>Figura 40-3:</b>	Calidad de malla en los elementos de la geometría .....	57
<b>Figura 41-3:</b>	Recomendaciones de calidad de malla.....	57
<b>Figura 42-3:</b>	Número de nodos y elementos de la mangueta posterior.....	58
<b>Figura 43-3:</b>	Deformación total en la mangueta posterior .....	58
<b>Figura 44-3:</b>	Tension equivalente de Von Mises mangueta posterior .....	59
<b>Figura 45-3:</b>	Factor de seguridad mangueta posterior .....	59
<b>Figura 46-3:</b>	Filamento de PLA.....	60
<b>Figura 47-3:</b>	Modelos impresos en filamento PLA.....	61

<b>Figura 48-3:</b>	Selección de arena verde.....	63
<b>Figura 49-3:</b>	Humedecido de la arena.....	64
<b>Figura 50-3:</b>	Mezcla de arena .....	65
<b>Figura 51-3:</b>	Tamizado artesanal de la arena .....	65
<b>Figura 52-3:</b>	Arena lista para .....	65
<b>Figura 53-3:</b>	Inicio de moldeo de las manguetas .....	66
<b>Figura 54-3:</b>	Rumos de arena para cubrir los modelos .....	66
<b>Figura 55-3:</b>	Apisonado final.....	67
<b>Figura 56-3:</b>	Machos finales para extraer modelos.....	67
<b>Figura 57-3:</b>	Procedimiento final: a) Retiro de modelos base, b) Cavidad de modelos.....	68
<b>Figura 58-3:</b>	Secado de humedad.....	68
<b>Figura 59-3:</b>	Crisol.....	69
<b>Figura 60-3:</b>	Fundición de aluminio con su aleación.....	69
<b>Figura 61-3:</b>	Manguetas finales para del F-SAE ESPOCH .....	71
<b>Figura 62-3:</b>	Fresado de manguetas .....	73
<b>Figura 63-3:</b>	Prensado del rodamiento en las manguetas... ..	73
<b>Figura 64-3:</b>	Armado mangueta delantera.....	74
<b>Figura 65-3:</b>	Armado mangueta posterior.....	74
<b>Figura 1-4:</b>	Cronograma de actividades desarrolladas en Grant Project.....	75

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-2:</b> Curva de enfriamiento durante la fundición .....	22
<b>Gráfico 1-3:</b> Proceso de diseño de un prototipo.....	26
<b>Gráfico 2-3:</b> Curva esfuerzo - deformación .....	42

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A: PLANOS DE MOLDEO Y DISEÑO DE LA MANGUETA**

## RESUMEN

A través de ingeniería inversa se procedió a rediseñar las manguetas originales con el objetivo de reducir peso para ser livianas y resistentes, este proceso se lo realizó mediante la utilización del software CAD para el modelado, CAE para la optimización topológica y validación de resultados, en cuanto a la fabricación de las nuevas manguetas se empleó el proceso de fundición con aleación de aluminio 7075. El rediseño de las manguetas se inició mediante el análisis en la pieza original, obteniendo parámetros geométricos para el nuevo modelo en el software CAD. En la optimización y simulación de las nuevas manguetas se utilizó el ANSYS Workbench, software que emplea el método de elementos finitos como técnica para la reducción de material innecesario de las nuevas manguetas delantera y posterior en un 70%, porcentaje que representa un factor de diseño en 3,22 y 5,16 respectivamente. Para la fabricación se empezó por la manufactura aditiva (Impresión 3D) del diseño final y con ello realizar los moldes en arena verde, la aleación de aluminio 7075 se hizo en un horno de crisol con una temperatura promedio de 910 °C con metales como: Cromo (0,18-2) %, Cobre (1,2-2) %, Magnesio (2,1-2,9) %, Zinc (5,1-6,1) % y pequeños porcentajes de hierro, silicio, titanio y otros metales, obteniendo así las manguetas. Como resultado final se obtiene una reducción del peso en las manguetas en un 53% menor que las originales, representado para la mangueta delantera de 2.4 lb y para la posterior de 2.2 lb. Se concluye que se puede obtener piezas pequeñas, resistentes mediante una aleación apropiada y a un costo de producción moderadamente económico. Se recomienda en el diseño del modelo realizar los respectivos ángulos de salida y las medidas adecuadas para evitar contracciones del material.

**Palabras clave:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIA DE LA INGENIERÍA>, <INGENIERÍA INVERSA>, <REDISEÑO MECÁNICO>, <OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA>, <FUNDICIÓN DE ALUMINIO>, <ALEACIÓN DE ALUMINIO>



22-10-2020

0409-DBRAI-UPT-2020

## SUMMARY

Through reverse engineering, the journals were redesigned with the aim of reducing weight to be light and resistant, this process was carried out by using CAD software for modelling, CAE for topological optimization and validation of results, aluminium 7075 alloy casting were used to manufacture of the new journals. The redesign of the journals initiated by the analysis in the original piece, obtaining geometrical parameters for the new model in CAD software. The ANSYS Workbench was used to optimize and simulate the new journals; software which employs the finite element method as a technique for the reduction of unnecessary material from the new front and rear journals by 70%, this percentage represents a design factor in 3.22 and 5.16 respectively. The manufacturing process began with additive manufacturing (3D printing) of the final design and to make the moulds in green sand, the aluminum alloy 7075 was made in a crucible furnace with an average temperature of 910 °C with metals such as Chromium (0.18-2)%, Copper (1.2-2)%, Magnesium (2.1-2.9)%, Zinc (5.1-6.1)% and small percentages of iron, silicon, titanium and other metals, thus obtaining the journals. As a final result, a reduction of the weight in the journal is obtained by 53% lower than the original, represented for the front journal of 2.4 lb and for the rear of 2.2 lb. It is concluded that small, resistant parts can be obtained through an appropriate alloy and a moderately economic production cost. It is recommended in the design of the model to perform the respective exit angles and appropriate measures to avoid contractions of the material.

**Keywords:** <ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY>, <REVERSE ENGINEERING>, <MECHANICAL REDESIGN>, <TOPOLOGICAL OPTIMIZATION>, <ALUMINUM CASTING >, <ALUMINUM ALLOY >

## 1. INTRODUCCIÓN

En este proyecto se presenta el rediseño mecánico de las manguetas para el prototipo de Fórmula SAE de la Carrera de Ingeniería Automotriz. El nuevo modelo de la mangueta cumplirá con el objetivo de reducir mediante un material liviano y resistente el cual permitirá soportar las cargas que se producen durante la conducción del vehículo.

Para el nuevo diseño, se inicia con el estudio del arte, análisis de la normativa de la Fórmula SAE, el fundamento teórico de las manguetas, de los sistemas de suspensión, dirección y frenado, explicación de la técnica de optimización topológica y el proceso de fabricación.

El diseño del nuevo modelo de mangueta se hará con el criterio de la ingeniería inversa para obtener parámetros de geometría y ser utilizados en el programa computacional SolidWorks; la optimización y simulación del modelo en el programa ANSYS Workbench, donde se realizará un análisis estático de las principales fuerzas que intervienen en la mangueta.

En cuanto a la fabricación de las manguetas se empezará por la manufactura aditiva, se obtendrá los nuevos modelos para el proceso de fundición y con ello se presentará las manguetas delanteras y posteriores finales.

La finalidad de este proyecto será la obtención de un nuevo modelo de mangueta mediante un análisis de ingeniería que permita cumplir con características de: menor peso, resistente, funcional y de bajo costo; además de su manufactura por medio del proceso de fundición con material liviano en aluminio 7075. Etapas que se pretende dejar como base para las futuras investigaciones en generaciones que busquen nuevas soluciones viables para vehículos de competencia tipo fórmula.

## **1.1 Antecedentes**

Fórmula SAE es una competición que involucra conocimientos de Ingeniería Automotriz para diseñar, fabricar y maniobrar autos reales tipo fórmula, y que tiene como objetivo premiar el esfuerzo realizado por estudiantes universitarios de todo el mundo que participan en este evento. Originalmente esta competencia nace en Estados Unidos como un evento oficial de la Universidad de Texas en 1982 bajo la supervisión del profesor Ron Matthews.(FÓRMULA SAE s.f.).

Por lo que se ha convertido en una vitrina del talento humano para las grandes empresas multinacionales automotrices que buscan fomentar un primer empleo. En este proyecto se busca presentar un nuevo modelo de manguetas que permitan convalidar conocimientos adquiridos durante la formación académica y ser reflejado en el prototipo de vehículo Fórmula SAE de la Carrera de Ingeniería Automotriz de la ESPOCH.

## **1.2 Planteamiento del problema**

La manufactura de las manguetas en el modelo original del vehículo Fórmula SAE de la Carrera de Ingeniería Automotriz, está realizada de manera tradicional mediante uniones no desmontables en láminas de Acero A36 para obtener la forma final, este procedimiento de construcción no es tan viable ya que no se consideró el incremento de peso de las manguetas al ser un elemento importante de contacto entre los neumáticos con los sistemas de suspensión, dirección y frenado.

El problema por solucionar en este proyecto es el elevado peso que tiene las manguetas delanteras y posteriores de 4.5lb c/u, que representa una cuestión para el rendimiento del vehículo. Con el rediseño del nuevo modelo de manguetas en CAD más la aplicación de un proceso de manufactura con material liviano, es tratar de obtener piezas ligeras y resistentes.

### **1.3 Justificación del proyecto**

Según (Kalpakjian y Schmid 2002) dice: "El diseño del producto es una actividad crítica porque se ha estimado que de 70 a 80% del costo de desarrollo del producto y su manufactura, queda determinado por las decisiones tomadas en las etapas iniciales del diseño".

Uno de los principales motivos de la Fórmula SAE es el reto a los estudiantes universitarios de pregrado y posgrado a diseñar, fabricar y competir con pequeños autos de carreras tipo fórmula. Estos autos deberán pasar una serie de eventos estáticos y dinámicos antes de ingresar a pista de competición, además incluyen inspección técnica, costo, presentación, diseño de ingeniería, pruebas de rendimiento. (FÓRMULA SAE s.f.)

Con el desarrollo del presente proyecto se mostrará que se puede realizar mejoras para fabricar partes y piezas automotrices, a la vez formar parte del cambio de la matriz productiva en innovación y calidad de productos que ayuden a la economía de un país que depende mucho de las importaciones, además de evitar el riesgo del desempleo. Y una de las pautas es combinar conocimientos adquiridos en las aulas con la práctica, es por ello que el nuevo modelo de las manguetas es fabricar en un material liviano y resistente, permitiendo mejorar el rendimiento en el prototipo de vehículo de Fórmula SAE de la Carrera de Ingeniería Automotriz (Villena, 2015).

### **1.4 Objetivos:**

#### ***1.4.1 Objetivo General***

Rediseñar las manguetas del prototipo Fórmula SAE de la Carrera de Ingeniería Automotriz aplicando la técnica de optimización topológica para reducir peso en material ligero y resistente.

#### ***1.4.2 Objetivos Específicos***

- Realizar la fundamentación teórica sobre el proceso de rediseño mediante el análisis bibliográfico disponible para llevar a cabo la optimización topológica y manufactura de las manguetas.
- Diseñar el modelo de las manguetas delanteras y posteriores mediante la utilización de software tipo CAD para comprobar dimensiones con el modelo original.
- Optimizar y simular el modelo de las manguetas delanteras y posteriores mediante el software tipo CAE para validar su funcionamiento en el prototipo de vehículo Fórmula SAE.
- Obtener las manguetas mediante el proceso manufactura que cumpla con las especificaciones de reducción de peso con material liviano y resistente para reducir costos de producción.

## **1.5 Alcance**

Con la ayuda de la ingeniería inversa se tendrá las principales características de las manguetas originales para obtener un nuevo modelo de manguetas delanteras y posteriores.

Con la utilización de software SolidWorks se diseñará el modelo idóneo y en el programa computacional ANSYS Workbench se optimizará y se validarán los resultados de nuevo modelo de manguetas.

Mediante el proceso de fundición y aleación correspondiente se fabricarán las nuevas manguetas, que serán resistentes con el mínimo peso.

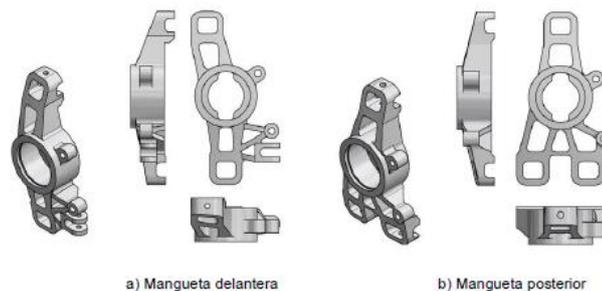
## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Estado del arte

Se presenta los avances realizados sobre el diseño de manguetas durante los últimos años mediante de optimización topológica y proceso de fabricación:

La optimización topológica “toma un diseño existente desarrollado mediante métodos tradicionales y trata de optimizarlo a través de un pos-procesamiento algorítmico”(Reese, 2019).

La aplicación de las técnicas de optimización estructural en software OptiStruct y manufactura por medio de la herramienta HSM inventor, permite desarrollar un nuevo diseño de manguetas delanteras y posteriores mostrado en la figura 1-2, para el monoplaza tipo fórmula SAE “Bosco1.0”, que presenta factores de seguridad con respecto a vida infinita a fatiga de 1.3 y 1.7 respectivamente, además de la reducción de peso en 40% en la mangueta delantera y 49% en la posterior y fabricadas con un tiempo de mecanizado en bloque de aleación de aluminio 7075 T6 de 30 horas seguidas en CNC (Reyes 2016, p. 76).



**Figura 1-2:** Manguetas del Formula SAE "Bosco 1.0"

**Fuente:**(Reyes, 2016, p. 53).

Otro punto de vista en el proceso de rediseño de las manguetas delanteras del prototipo FESPE 2012, se obtuvo una reducción del peso en un 67% mediante software Autodesk Inventor previa selección del material en aluminio AW7021 que representa una cantidad de 715 gramos menos que la original de 2135 gramos, validado en cuatro ensayos a través del análisis por elementos finitos (FEA) y sometida a pruebas dinámicas que comprobaron las exigencias de las distintas cargas aplicadas y finalizando como resultado que no sufrieron deformaciones ni fallas por el correcto diseño y proceso de manufactura (Jácome y Miranda, 2018, p. 89).



**Figura 2-2:** Muestra final de manguetas delanteras FESPE 2012

**Fuente:** (Jácome y Miranda, 2018, p. 76)

Para el diseño de mangueta posterior del Fórmula FESPE 2012, se realizó en programas de diseño de elementos de máquinas y simulación de fuerzas a la que está sometida. Se fabricó en aluminio c330r material liviano y resistente, obteniendo una reducción de peso en 61.6%, para el desbaste del se utilizó la máquina fresadora CNC de tres ejes, donde se mecanizo el nuevo diseño y se eliminó los cordones de suelda permitiendo elevar el factor de diseño en 3.57 la vida útil de la mangueta (Cepeda y Tupiza 2018, p. 87).



**Figura 3-2:** Manguetas posteriores de FESPE 2012

**Fuente:** (Cepeda y Tupiza, 2018, p. 73).

El análisis con optimización topológica se lo realizó también en un bastidor de motocicleta de marca Honda CRF 230 aplicando el método MEF (Método de los elementos finitos); al igual que en los anteriores avances se redujo el peso en 67.6% y un factor de seguridad de 1.41 con respecto a la estructura original lo que permite tener un mayor rendimiento del motor y mejores condiciones de maniobra en pista. Para alcanzar este objetivo se introdujo un procedimiento de Espectrometría de Chispa que determina las características del material original, además se realizó el diseño y la simulación en el software SolidWorks Simulation.(Remache et al, 2019)

## 2.2 Fórmula SAE

Dentro del programa “Serie de Diseño Colegiado” (CDS) de SAE International (Society of Automotive Engineerings), se presenta la Fórmula SAE como una de las competencias más importantes a nivel de ingeniería automovilística que involucra a estudiantes de pregrado y posgrado para incentivar al diseño, construcción y competición de un vehículo monoplace tipo fórmula, bajo regulaciones de normativa vigente y el cronograma del circuito de participación.(SAE, 2019)



**Figura 4-2:** Vehículo participante en Fórmula SAE

Fuente:(SAE, 2019)

En la competencia están parámetros a ser evaluados por jueces asignados al evento, quienes realizan la calificación del monoplace según la tabla 1-2, con una puntuación de 1000 puntos, dividido en dos categorías:

**Tabla 1-2:** Puntaje de acuerdo con parámetros de competencia

<b>Eventos Estáticos</b>	<b>Puntos</b>	<b>Eventos Dinámicos</b>	<b>Puntos</b>
<b>Presentación</b>	75	Aceleración	100
<b>Costo</b>	100	Skid Pad	75
<b>Diseño</b>	150	Autocross	125
-	-	Eficiencia	100
-	-	Resistencia	275
<b>Total</b>	325	<b>Total</b>	675
<b>Puntaje Total</b>		<b>1000</b>	

Fuete: (Reglamento Fórmula SAE 2020)

Realizado por: Autores, 2020

## 2.3 Eventos Estáticos

Los eventos estáticos tienen la característica principal de evaluar el comportamiento del equipo participante en la competición ante una comisión técnica, encargada de presentar un informe sobre diseño, costo y presentación.

### **2.3.1 Diseño**

Evalúa el esfuerzo a la ingeniería en términos de rendimiento y valor de mercado, revisado en un informe y hoja de especificación emitido por parte del equipo participante con el respectivo y respaldo del proceso de desarrollo del vehículo.(Reglamento Fórmula SAE 2020)

### **2.3.2 Costo**

Definido como Costo y Fabricación (Cost and Manufacturing), se califica la viabilidad de fabricación de las piezas utilizadas en el vehículo.(Reglamento Fórmula SAE 2020)

### **2.3.3 Presentación**

Se evidencia el criterio para poder generar una imagen comercial con el objetivo de atraer la atención de las empresas automotrices que tienen como necesidad de satisfacer demandas que les permita generar beneficios económicos.(Reglamento Fórmula SAE 2020)



**Figura 5-2:** Presentación del monoplaza F-SAE

**Fuente:**(UPMRacing, 2015)

## **2.4 Eventos Dinámicos**

La evaluación de eventos dinámicos se define en dos áreas: área de preparación, donde se verifica el estado del vehículo participante y área dinámica, donde el vehículo debe moverse por su propia potencia.

### 2.4.1 Área de preparación

Antes de salir a pista los vehículos cumplen con cuatros inspecciones de acuerdo a la Normativa de la Fórmula SAE, primero se inicia por la inspección técnica - mecánica a cargo de inspectores responsables en cumplir con las normas de seguridad y de autorizar si el vehículo pasa o no a la próxima inspección, segundo se realiza la prueba de inclinación para verificar que no exista fugas de fluido a un ángulo de 45 ° y comprobar que el vehículo no ruede al elevar un ángulo de 60 ° con respecto a la horizontal, tercero se programa la prueba de ruido e interruptor para medir el nivel de sonido (producido por motor de combustión interna) mediante micrófono de campo libre en prueba estacionaria, cuarto y última prueba, frenado el cual debe bloquear las cuatro ruedas al aplicar con fuerza los frenos del vehículo con una aceleración específica y detenerlo por completo en línea recta sin perder estabilidad ni trayectoria. (Reglamento Fórmula SAE 2020)



**Figura 6-2:** Inspección técnica del vehículo F-SAE

Fuente: (UPMRacing, 2015)

### 2.4.2 Área Dinámica

En pista de competencia, el monoplaza se presenta para el desarrollo de las siguientes pruebas:

#### 2.4.2.1 Aceleración

Aplicado en línea recta con una distancia de 75 m desde el punto de partida a punto de llegada, en donde cada equipo puede participar con su vehículo en cuatro carreras como máximo y que será operado por dos pilotos en dos carreras distintas.(Reglamento Fórmula SAE 2020)

#### 2.4.2.2 *Skidpad*

Respuesta de giro en pista con forma de ocho como se observa en la figura 7-2, diseño de pista conformada por dos círculos de diámetros externos de 21.25m y diámetros internos de 15.25m separados por centros de círculos en 18.25m y un ancho de ruta de 3.0m entre los extremos de los círculos interno y externo. En esta prueba también se evalúa el equilibrio del vehículo en donde se considera los primeros intentos cronometrados en curvas de izquierda y derecha.(Reglamento Fórmula SAE 2020)

#### 2.4.2.3 *Autocross*

Carrera de 800m en rumbo cerrado con dos conductores a quienes se les evaluara maniobras y cualidades de manejo a una velocidad máxima de 48km/h.(Reglamento Fórmula SAE 2020)

#### 2.4.2.4 *Resistencia*

Evaluación de consumo de combustible en vueltas constantes con dos conductores sobre una distancia de 22km a una velocidad de 105km/h como máxima.(Reglamento Fórmula SAE 2020)



**Figura 7-2:** Pista de Skidpad en forma de ocho

**Fuente:**(Martínez Castañeda, 2016)

### 2.5 **Reglamento Fórmula SAE 2020**

El cumplimiento de las reglas dentro de la competencia es obligatorio para todos miembros del equipo participante, mismo que esta publicado en el sitio web oficial y autoría de *SAE International* en su versión actualizada de acuerdo con el calendario de competencia. Para

criterios de diseño del monoplaza en especial referente a las manguetas que forma parte de los sistemas de suspensión, frenado y dirección, hay parámetros que se debe cumplir con la finalidad de tener un alto rendimiento y seguridad para completar con éxito todas las pruebas impuestas por las Reglas de Fórmula SAE.

### **2.5.1 Análisis de Reglamento F-SAE**

Entre los principales requisitos del reglamento F-SAE (Reglamento Fórmula SAE 2020) referente al diseño de partes y piezas que tiene el monoplaza, se presenta las manguetas que al ser un elemento importante de contacto entre el neumático con la calzada y de acople para los sistemas de suspensión, dirección y frenado, deberá cumplir con los siguientes apartados según la estructura del reglamento:

*V.3.2.4 Mangueta.* El sistema de dirección debe tener paradas de dirección positivas para evitar que las conexiones de dirección se bloqueen (la inversión de un dispositivo de cuatro barras en uno de los pivotes). Los topes pueden ir colocados en las manguetas y deben evitar que las ruedas y los neumáticos entren en contacto con los distintos elementos de la suspensión, el cuerpo o el cuadro durante los eventos de la pista.(Reglamento Fórmula SAE 2020)

*V.3.1.3 Suspensión.* - Para todos los puntos de montaje referente a la suspensión estos deben estar siempre a la vista o libre de cualquier cubierta durante la inspección técnica.(Reglamento Fórmula SAE 2020)

*V.3.2.3 Dirección.*- En los sistemas de dirección se debe usar un mecanismo mecánico rígido que tenga la capacidad de soportar cargas de tensión y compresión durante su funcionamiento.(Reglamento Fórmula SAE 2020)

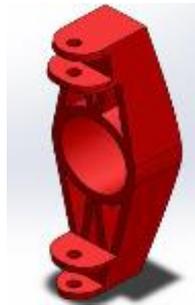
*V.3.1.5 Espacios de contacto.* - Todos los extremos de la barra y los cojinetes esféricos en la suspensión y la dirección deben ser uno de:

- Montado en doble cizalla
- Capturado teniendo una cabeza o arandela de tornillo / perno con un diámetro exterior que sea más grande que el diámetro interior de la carcasa del rodamiento esférico.(Reglamento Fórmula SAE 2020)

*T.7.5.1 Centro de rueda.*- Mecanismo que va entre las líneas centrales de los ejes de las ruedas delanteras y traseras, un dispositivo aerodinámico puede extenderse fuera de la vista en planta a una línea dibujada que conecta las superficies externas de los neumáticos delanteros y traseros a la altura de los centros de las ruedas.(Reglamento Fórmula SAE 2020)

## 2.6 Manguetas de un Fórmula SAE

Las manguetas son piezas mecánicas que soportan y permiten el giro de los neumáticos mediante el contacto del buje con el rodamiento, además sirven de acople para los sistemas de la suspensión, la dirección y freno; fabricadas en acero o aleaciones lo que les permite soportar fuerzas longitudinales y verticales durante el ciclo de conducción del vehículo. Según la figura 8-2, la mangueta tiene la función de alojar el disco de freno y la mordaza, los brazos de suspensión superior e inferior, varillaje de la dirección (Palacios y Sangopanta, 2018), centros de rueda que a su vez contiene un rodamiento y la junta homocinética lo que le permite conectar el tren de fuerza motriz para el giro en las ruedas posteriores (Mejía, 2015).



**Figura 8-2:** Mangueta de un F-SAE.

Fuente:(Arellano y Taday, 2016)

### 2.6.1 Funciones de las manguetas

Para los vehículos de competencia el diseño de las manguetas se basa en desempeño de las principales funciones geométricas: (Mejía 2015, p. 8-9)

- Proporcionar albergue adecuado para el cojinete de rueda.
- Resistir la fuerza de rotación alrededor del eje, proveniente desde la superficie de contacto del neumático, producido por la tracción y frenado a la que se somete.
- Resistir fuerzas alienantes que provoca la geometría de la suspensión en la superficie de contacto del neumático.
- Soportar los momentos de flexión generado por el vehículo al paso por una curva.
- Soportar las fuerzas que genera el amortiguador y el muelle, por estar unidas al varillaje de accionamiento.

- Ser rígida para soportar torsión en dirección vertical y para transmitir con precisión la dirección de las ruedas y las reacciones de la dirección.
- Ser robusta que permita resistir los daños por contactos menores con objetos en pista, entre ellos bordillos, desniveles, etc.

## 2.7 Sistema de Suspensión

El sistema de suspensión en un vehículo de competencia “se encarga de unir la masa suspendida, formada por el chasis, con la masa no suspendida de las ruedas y que se encuentran en contacto con la superficie de rodadura”(Castro 2017, p. 21). Además, tiene la función principal mantener la estabilidad y maniobrabilidad del vehículo, y de soportar la transferencia de cargas longitudinales, verticales y laterales, producto de la aceleración y frenado (Mena, 2017), debido a las irregularidades que se encuentra en pista.

### 2.7.1 Componentes del sistema de suspensión

Entre los principales componentes que tiene un sistema de suspensión de un vehículo Fórmula SAE (figura 9-2) están: (Auquilla Ocampo y Torres Romero, 2016)

1. Brazos de suspensión
2. Resortes
3. Frecuencia de oscilación
4. Amortiguadores
5. Rockers
6. Rótulas
7. Manguetas



**Figura 9-2:** Componentes del sistema de suspensión

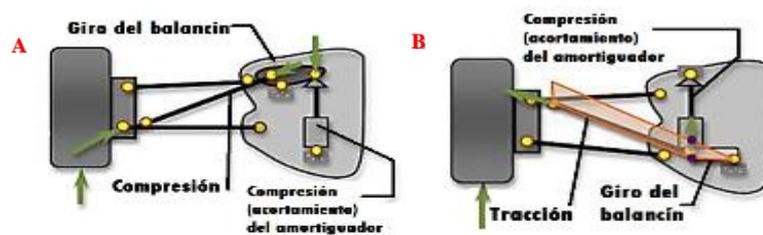
Fuente:(Arellano y Taday, 2016)

### 2.7.2 Configuración de suspensión

En vehículos de competencia se utilizan suspensiones tipo independientes donde su configuración permite a las ruedas realizar un movimiento autónomo en referencia al armazón principal (Castro, 2017). Así, se describe el tipo de suspensión que puede tener un vehículo en competición y que por su flexibilidad y adaptabilidad en el diseño y construcción son los más destacados: (Auquilla Ocampo y Torres Romero, 2016)

1. Sistema Push – Rod
2. Sistema Pull – Rod

Sistemas que para su funcionamiento dependen de la disposición de la barra diagonal que actúa en Push – Rod y Pull – Rod, donde trabaja a compresión y a tracción respectivamente, como se ve la figura 10-2.



**Figura 10-2:** Funcionamiento suspensión A) Push - Rod ,  
B) Pull – Rod

Fuente: (Auquilla Ocampo y Torres Romero, 2016)

### 2.8 Sistema de dirección

El sistema dirección está formado por un conjunto de mecanismos que permite gestionar la orientación de las ruedas delanteras (o directrices) bajo acción del conductor con el fin de que el vehículo tome la trayectoria deseada de manera más simple (CEP, 2010).

Entre sus características de funcionamiento debe poseer suavidad en control de manejo, seguridad sobre la fiabilidad del mecanismo, precisión ante el excesivo juego en los componentes de la dirección y la irreversibilidad donde el volante debe ordenar el giro a las ruedas de acuerdo con la figura 11-2, pero evitando que las ruedas vuelvan a transmitir el movimiento al volante cuando el vehículo pase por superficies irregulares (CEP, 2010), y que al final el sistema de dirección debe prestar la estabilidad necesaria (Reyes, 2016).



**Figura 11-2:** Sistema de Dirección F-SAE

Fuente: (Albán, 2016)

## 2.9 Sistema de frenos

La principal función de un sistema de frenos es la reducción parcial de la velocidad o detención por completo del vehículo mediante la acción de una fuerza aplicada por el conductor sobre el pedal de frenos. Además, este sistema se fundamenta en la Ley de Conservación de la Energía, que permite transformar la energía cinética en energía calorífica, mediante la fricción del conjunto de pastillas sobre el disco de freno (Marín, 2018).

El alojamiento de la pinza de freno sobre un mecanismo fijo evita la pérdida de seguridad según lo descrito por Parera:

*La pinza es un cuerpo metálico con forma de segmento circular que abraza una quinta parte del disco de freno por cada una de sus dos caras; en ella se han realizado diferentes taladros para sujetar al chasis del vehículo, y alojar el émbolo formando la cámara del bombín de freno, para los conductos que comunican el bombín con el circuito hidráulico, además de un rebaje para alojar las pastillas de freno. (Parera 1993, p. 41)*



**Figura 12-2:** Sistema de Frenos de un F-SAE

Fuente: (Guizado y Pérez 2016)

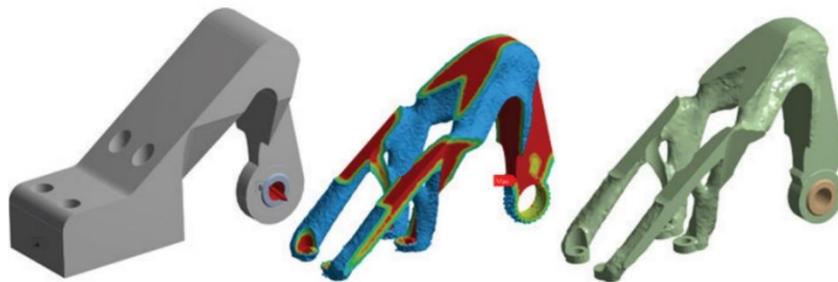
## 2.10 Optimización de topología

La optimización de la topología es una práctica de ingeniería bien establecida que permite optimizar el diseño partiendo de un modelo existente (Reddy K. et al. 2016), especialmente para maximizar o minimizar alguna característica deseada (dominio de diseño); con el fin de obtener en lo posible el menor peso para asegurar una rigidez y resistencia adecuada. Lo que implica tener piezas mecánicas con un bajo costo en relación a material y el menor consumo de combustible para vehículos de competición.(Franco, 2015)

Con el avance de las tecnologías de fabricación aditiva (AM), la técnica de fabricación tradicional pasaron a presentar limitaciones en su producción, lo que ha permitido a la optimización topológica (OT) convertirse en una herramienta de diseño ingenieril mucho más eficaz (Bianchi et al. 2019), y en el campo de investigación aplica áreas como matemáticas, la mecánica y la ciencia computacional, tanto es así, que su aplicación está en la industria aeroespacial, automotriz, obras civiles y uno de ellos el de la salud, en especial las micros y nanotecnologías para el desarrollo de mecanismos flexibles (Franco, 2015).

Una de las técnicas más aplicadas para la solución de la optimización topológica está el método de elementos finitos por el proceso que se da a la variable de optimización que puede ser de tipo discreta o continua.(Uarac P, Cendoya H y Sanhueza O, 2015)

Para la variable de optimización discreta se sobresale los métodos ESO (Optimización Estructural Evolutiva) y BESO (Optimización estructural evolutiva bi-direccional), denominados hard – kill, que tiene la función de quitar material innecesario del dominio de diseño.(Uarac P, Cendoya H y Sanhueza O 2015)



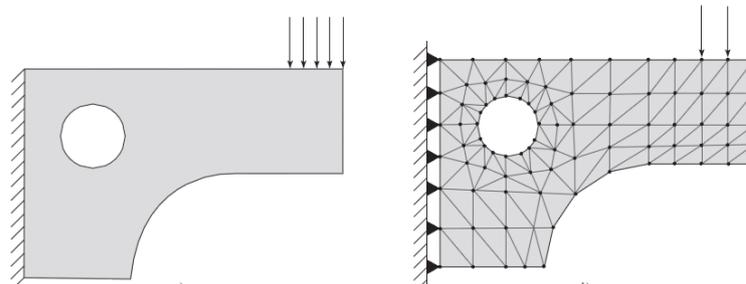
**Figura 13-2:** Proceso de optimización topológica de un diseño preliminar

Fuente: (Vetturazzi, 2017)

### 2.10.1 Método de los elementos finitos (MEF)

En el diseño mecánico y estructural, la aplicación de software de diseño asistido por computadora (CAD), permite integrar el método de análisis de elementos finitos para dar soluciones

aproximadas a variables que presenta el modelo para su proceso de construcción mediante los análisis mecánicos básicos, entre ellos, el análisis estático y dinámico.(Budynas y Nisbett 2012)



**Figura 14-2:** Método de elemento finito

Fuente: (Budynas y Nisbett 2012)

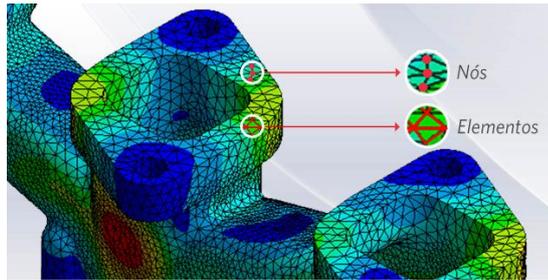
Por lo tanto, el método de los elementos finitos es considerado un método numérico aproximado que permite analizar la deformación de una pieza mecánica que está sujeto a condiciones de cargas y restricciones de movimiento.(Pérez González, 2014)

La principal razón de aplicar el método de los elementos finitos es para ver la distribución óptima del material dentro del dominio de diseño y seleccionar la topología más adecuada, es así que los métodos para optimizar son repetitivos y experimentales (Jácome y Miranda 2018), por lo que pasa a un proceso de interpretación de resultados para validar el equilibrio entre la reducción de peso, costos de fabricación y el factor de seguridad del diseño (Reddy K. et al. 2016).

Entre los principales softwares de ingeniería utilizados en el diseño mecánico y simulación, están los de tipo CAD, CAE, CAM; por lo que para realizar la optimización y la aplicación de métodos de los elementos finitos (MEF) en las manguetas se realizará en el ANSYS Workbench y la obtención del modelado en el SolidWorks.

#### 2.10.1.1 Generación de la malla

Para resolver el análisis estructural, el software divide la mangueta en miles de pequeñas figuras geométricas que recubren en su totalidad la figura 15-2, esta división se la conoce como mallado el cual está compuesto por nodos y elementos, entre más fina sea la malla o más elementos posea obtendremos resultados más precisos.



**Figura 15-2:** Nodos y elementos de malla

**Fuente:** (Mirlisenna, 2016)

Como la mangueta es una pieza fundamental en el vehículo debemos realizar un mallado completo utilizando varios métodos como la opción *Body Sizing*, esta opción nos permite por defecto lanzar un mallado completo por toda la mangueta modificando después su tamaño de elemento, permite asegurar resultados confiables este proceso se realiza tanto para la mangueta delantera como para la mangueta posterior.(Granell, 2018)

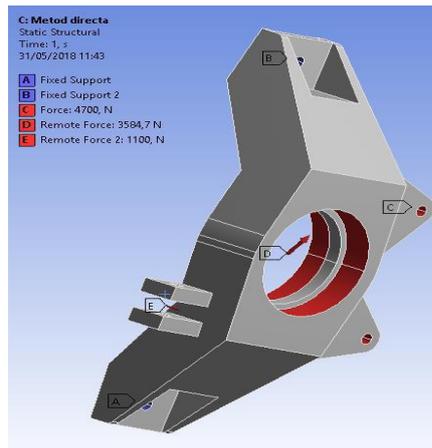
Las zonas más críticas del elemento como aristas vivas y perforaciones donde actúe una o varias fuerzas, se debe tener mucha atención ya que en estas partes el mallado debe ser más fino y preciso, para esto se usa la opción *Refinement* el cual modifica el tamaño del elemento en esas áreas.(Granell, 2018)

#### 2.10.1.2 Condiciones de contorno.

Para la simulación de cargas en la mangueta se necesita establecer condiciones que deben estar sujetas a diversas situaciones como son: puntos de apoyo, rodamientos, pasadores entre otros. Una vez aplicados los apoyos se colocan las fuerzas en cada uno de ellos siempre sobredimensionando para llegar a obtener un coeficiente de seguridad mayor, debido a la importancia que la mangueta representa entre los sistemas de suspensión, dirección y frenado.(Granell, 2018)

Existen dos formas de fijar soportes, una es *Fixed Support*, esta nos ayuda a fijar las partes que no tiene algún movimiento o momento en su función o trabajo, al seleccionar esta opción la parte que se selecciona queda completamente anclada lista para ser sometida algún esfuerzo.

La siguiente opción para el fijado de partes es *Cylindrical Support*, esta se centra en la parte móvil de la pieza, como es el rodamiento, elemento que permite simular la parte fija de la mangueta con el giro del neumático.



**Figura 16-2:** Condiciones de contorno

**Fuente:** (Granell, 2018)

## 2.11 Material

En el diseño de las manguetas se va a utilizar la aleación de aluminio 7075 que pertenece a la serie 700, material empleado en múltiples aplicaciones de la industria automovilística debido a su dureza, tenacidad y resistencia a la fatiga, además de permitir realizar con facilidad el mecanizado con el objetivo de obtener un mejor acabado final, es por ello que se describe las siguientes propiedades:

- Propiedades mecánicas
- Propiedades físicas

### 2.11.1 Propiedades Mecánicas

El aluminio 7075 presenta en sus propiedades mecánicas una resistencia a la tracción, el límite elástico y el módulo de elasticidad. Parámetros que permiten controlar el coeficiente seguridad de la pieza a través de ensayos de tracción, fatiga o simulaciones estáticas y dinámicas

### 2.11.2 Propiedades Físicas.

La principal característica del aluminio 7075 es su densidad por ser menor al del acero, lo que le permite ser liviano y resistente.

## 2.12 Métodos de fabricación

Para el proceso de fabricación se optará por el método idóneo, uno que ayude a generar la mangueta en su totalidad, esto quiere decir sin la unión de varias piezas soldadas y acabados

rústicos, debido al proceso de fabricación se ha estudiado algunos parámetros como el mecanizado y la fundición.

Para realizar la fabricación de la pieza por mecanizado se debe considerar ciertos factores como:

- El material para trabajar depende mucho su dureza, maquinabilidad y tipo de viruta producida.
- El tipo de refrigerante ya que en función con el material mejora las condiciones de corte.
- La máquina debe ser lo más precisa y eficaz para el desprendimiento de viruta.
- Las herramientas de corte en función al material, geometría de la herramienta y calidad.

En cuanto a la fundición se debe considerar algunos parámetros como:

- Selección del proceso de fundición según el tipo de moldes, que pueden ser desechables y permanentes.
- Tener un modelo real de la pieza para verificar las tolerancias producidas por la contracción del material.
- Elegir el material en bruto para la aleación de metales
- Equipos de fundición en plena condición de funcionamiento.

## **2.13 Fundición**

La fundición es una de las técnicas más utilizadas para la obtención de piezas metálicas, mediante el proceso de colada el cual fluye por gravedad en un molde desechable o permanente que contiene la forma de la cavidad deseada, donde del material líquido se solidifica hasta que la pieza quede conformada para luego desmoldar y realizar las fases de limpieza y acabado final.

La operación más utilizada de manera industrial es la fundición en arena, proceso también conocido como molde perdido, debido a que se destruye el molde para poder retirar la pieza fundida.

### ***2.13.1 Consideración de parámetros para la fundición***

#### ***2.13.1.1 Velocidad de vertido de un metal fundido***

La velocidad requerida para verter un metal fundido en base del bebedero al molde, se da por la siguiente fórmula:(Groover 2007, p. 201)

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g} \quad (1)$$

$$v = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

Donde:

$h$  = Altura del bebedero ( $cm$ )

$g$  = Gravedad ( $981 \frac{cm}{s^2}$ )

$v$  = Velocidad de flujo del metal líquido ( $\frac{cm}{s}$ )

#### 2.13.1.2 Gasto volumétrico

El flujo volumétrico durante el vertido del metal permanece constante a través del líquido, y se calcula mediante la siguiente fórmula:(Groover 2007, p. 201)

$$Q = A * v \quad (3)$$

Donde:

$Q$  = Gasto volumétrico ( $\frac{cm^3}{s}$ )

$A$  = Área de la sección transversal ( $cm^2$ )

$v$  = Velocidad de flujo del metal líquido ( $\frac{cm}{s}$ )

#### 2.13.1.3 Tiempo requerido para llenar la cavidad de un molde

Se puede estimar el tiempo que se requiere para llenar la cavidad del molde, de volumen  $V$ , mediante la siguiente fórmula:(Groover 2007, p. 201)

$$T_{MF} = \frac{V}{Q} \quad (4)$$

Donde:

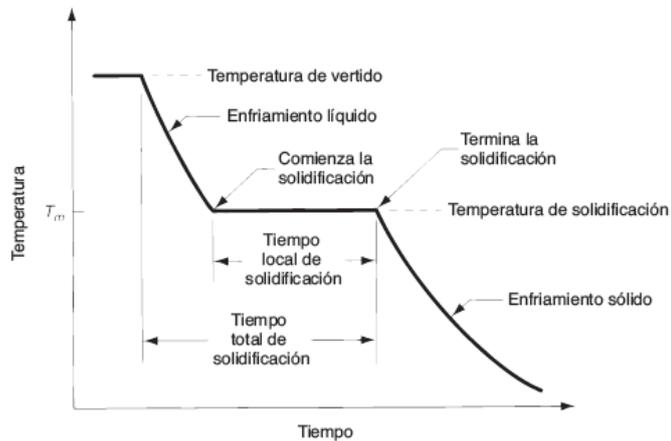
$T_{MF}$  = Tiempo de llenado del molde ( $s$ )

$Q$  = Gasto volumétrico ( $\frac{cm^3}{s}$ )

$V$  = Volumen de la cavidad del molde ( $cm^3$ )

#### 2.13.1.4 Solidificación de los metales

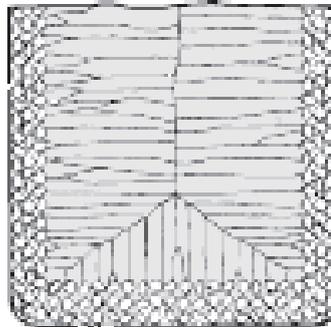
El proceso de solidificación varía en función del metal, si es puro o una aleación, los metales puros tienden a solidificarse a temperatura constante a medida que transcurre el tiempo como se indica en el gráfico 1-2. El tiempo total de solidificación tiene lugar desde el vertido hasta la solidificación completa, aquí el calor se disipa paulatinamente mediante las paredes del molde, dando inicio a la formación de una capa delgada de metal sólido; capa que incrementa conforme la solidificación avanza hacia el centro de la cavidad.



**Gráfico 2-1:** Curva de enfriamiento durante la fundición

**Fuente:** (Groover 2007, p. 203)

Una inspección al proceso de solidificación permite analizar la formación y crecimiento de granos metálicos, la capa inicial que ha formado el metal mediante el enfriamiento rápido está constituida de granos finos con orientación al azar, a medida que se va enfriando se van formando más granos con orientación opuesta a la transferencia de calor, éste crecimiento de grano en las paredes va hacia el interior del núcleo formando agujas, convirtiéndose en ramas en ángulos rectos, proceso que se ilustra en la figura 17-2.



**Figura 17-2:** Crecimiento de granos metálicos

**Fuente:**(Groover 2007, p. 204)

#### 2.13.1.5 Tiempo de solidificación

La solidificación de un metal es el intervalo total de tiempo, que depende de su forma, tamaño hasta que se solidifique completamente, y se da por la siguiente fórmula:(Groover 2007, p. 206)

$$T_{Ts} = C_m \left(\frac{V}{A}\right)^n \quad (5)$$

Donde:

$T_{Ts}$  = Tiempo total de solidificación (min)

$A$  = Área de la superficie del fundido ( $cm^2$ )

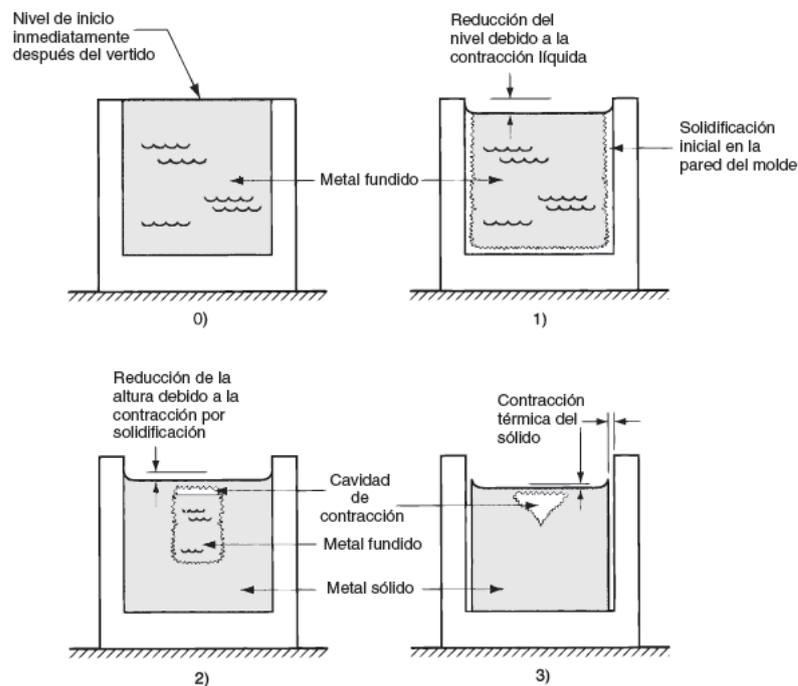
$C_m$  = Constante del molde ( $\frac{min}{cm^2}$ )

$V$  = Volumen del fundido ( $cm^3$ )

$n$  = Exponente de valor igual a 2

### 2.13.1.6 Contracción

Los metales se contraen en una fundición por efecto de la dilatación térmica que sufren durante la solidificación y enfriamiento, esto causa cambios en su dimensión, la contracción se desarrolla en tres etapas como se indica en la figura 18-2: “0) nivel de inicio del metal fundido luego del vertido 1) contracción líquida durante el enfriamiento antes de la solidificación 2) disminución de altura y formación de una cavidad debido a la contracción durante el cambio de fase de líquida a sólida llamada contracción por solidificación 3) contracción térmica del fundido solidificado durante el enfriamiento a temperatura ambiente” (Groover 2007, p. 206)



**Figura 18-2:** Contracción de un fundido cilíndrico durante la solidificación y enfriamiento

Fuente: (Groover 2007, p. 207)

En la tabla 2-2, se puede observar los valores comunes de contracción volumétrica que presentan algunos materiales de fundición, debido a la contracción que, durante su solidificación, esto ocurre en todos los metales, porque la fase sólida tiene una densidad mayor que la líquida.

**Tabla 2-2:** Contracción volumétrica para distintos metales de fundición.

Material	Contracción volumétrica debido a:	
	Contracción por solidificación, %	Contracción térmica del sólido, %
Aluminio	7.0	5.6
Aleación de aluminio (común)	7.0	5.0
Hierro de colado gris	1.8	3.0
Hierro de colado gris, alto C	0	3.0
Acero fundido al bajo C	3.0	7.2
Cobre	4.5	7.5
Bronce (Cu-Sn)	5.5	6.0

**Realizado por:** (Groover 2007, p. 207)

#### 2.13.1.7 Diseño de la mazarota

La mazarota es una cavidad que funciona como reservorio de metal líquido, y su función es alimentar paulatinamente metal líquido al fundido, a medida que este se vaya solidificando, para compensar la contracción que se produce por solidificación. (Groover 2007, p. 209)

La contracción que sufre el aluminio fundido, es directamente proporcional al volumen mínimo que debe tener la mazarota, para compensar dicha contracción, para calcular el tamaño de la mazarota se puede utilizar la regla de Chvorinov, o aplicando el criterio de volumen y módulo de enfriamiento, como se indica en la siguiente fórmula tomada del libro Tecnología Mecánica (Nápoles y Salueña 2000, p. 102)

$$V_{MIN MAZA} = V_{Pieza(partes gruesas)} * c * k \quad (6)$$

Donde:

$V_{MIN MAZA}$  = Volumen mínimo de la mazarota ( $cm^3$ )

$V_{Pieza(partes gruesas)}$  = Volumen de las partes gruesas de la pieza ( $cm^3$ )

$k$  = Coeficiente de seguridad normalmente se toma como  $k= 2$ ;  $1 \leq k \leq 3$

$c$  = Coeficiente de contracción volumétrica del metal

### 2.13.1.8 Defectos de fundición

Al realizar la operación de fundición no siempre salen productos con buena calidad, por lo general presentan algunos defectos en su forma. Defectos que se describen en la siguiente tabla 3-2:

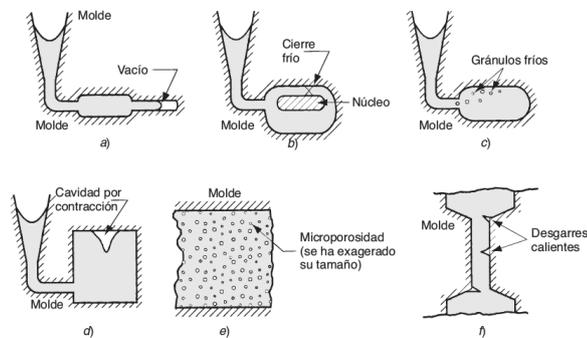
**Tabla 3-2:** Defectos de fundición

Letra	Defecto	Descripción	Causas
<b>a</b>	Vacíos	El fundido se solidifica antes de llenarse por completo la cavidad del molde.	- Insuficiente fluidez del metal derretido - Temperatura de vertido muy baja - Velocidad de vertido muy despacio - Sección transversal de la cavidad del molde muy delgada
<b>b</b>	Cierres fríos	Pasa cuando dos porciones del metal fluyen juntas, pero no hay fusión entre ellas debido a la solidificación prematura.	- Insuficiente fluidez del metal derretido
<b>c</b>	Gránulos fríos	Resultan de las salpicaduras durante el vertido	-Formación de glóbulos sólidos de metal que quedan atrapado en el fundido
<b>d</b>	Cavidad de fuga	Vacío interno en el fundido	- Rechupe
<b>e</b>	Microporosidad	Red de vacíos pequeños distribuidos en el fundido.	- Falta de solidificación que altera su estructura dendrítica.
<b>f</b>	Desgarre caliente	Ocurre cuando el fundido se ve impedido de contraerse por un molde que no lo propicia durante las etapas finales de la solidificación,	-Separación del metal

Fuente:(Groover 2007, p. 239)

Realizado por: Autores, 2020

Los defectos de la operación de fundición descritos en la tabla anterior se pueden visualizar en la figura 19-2



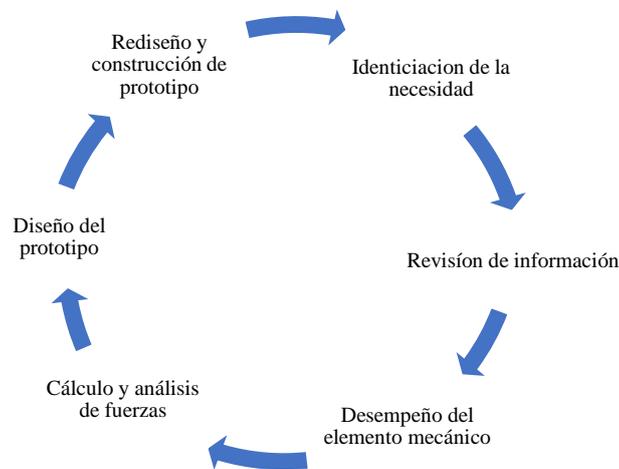
**Figura 19-2:** Defectos de la fundición en arena

Fuente: (Groover 2007, p. 238)

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Descripción del proceso de diseño

La metodología de diseño permite seguir un proceso ordenado sobre el tema de estudio para alcanzar resultados viables. Se inicia de acuerdo con el procedimiento en el gráfico 1-3, con la identificación de la necesidad del problema, el levantamiento de información necesaria mediante la revisión de las principales fuentes bibliográficas y normativa de la Fórmula SAE 2020, las especificaciones de desempeño para el nuevo diseño, generación de propuesta y evaluación, modelo preliminar, para culminar con el rediseño y construcción de la mangueta final.



**Gráfico 1-3:** Proceso de diseño de un prototipo

**Fuente:** (Medina y Morocho 2017)

##### 3.1.1 Identificación de la necesidad

En la propuesta original de las manguetas que tiene el vehículo Formula SAE de la Carrera de Ingeniería Automotriz, su fabricación es de manera tradicional, donde se utiliza láminas de acero A36 para dar la forma final, por ende, se busca mejorar a través de un nuevo diseño y mediante un proceso de fabricación en material liviano el cual permita ser resistente con un mínimo peso.

Para esto se necesita realizar un rediseño de las cuatro manguetas; dos delanteras y dos posteriores, conservando los mismos puntos de anclaje.



**Figura 1-3:** Manguetas originales fabricadas

Fuente:(Albán 2016)

### **3.1.2** *Revisión de información*

En la revisión bibliográfica referente a manguetas se analiza algunas metodologías que permitan realizar el diseño y fabricación de la nueva propuesta, además hay ejemplos en base al estado del arte sobre diferentes trabajos realizados de manguetas para monoplasas que han participado en distintas competiciones de circuitos de la Fórmula SAE y en el Reglamento de Fórmula SAE 2020 se especifican artículos que deben cumplir las manguetas para ser ensambladas en el vehículo.

### **3.1.3** *Desempeño del elemento mecánico*

Las manguetas deben tener la capacidad suficiente para soportar el efecto de los neumáticos con la calzada y de las principales fuerzas que se generan en los sistemas de suspensión, dirección y frenado:(Mejía, 2015)

#### **3.1.3.1** *Características que debe desempeñar las manguetas delanteras*

1. Transmitir las maniobras realizadas por el conductor a través de los brazos de dirección sobre los neumáticos.
2. Conectar los brazos de suspensión con sus respectivos puntos de anclaje.
3. Fijación de la posición de montaje de las mordazas de freno con el disco de freno.
4. Albergar la ubicación para el rodamiento.
5. Facilidad de montaje y desmontaje

#### **3.1.3.2** *Características que debe desempeñar las manguetas posteriores*

1. Conectar los brazos de suspensión superior e inferior con sus respectivos puntos de anclaje.
2. Albergar la ubicación para el rodamiento ya se acople la junta homocinética.

### 3.1.4 Cálculo y análisis de fuerzas

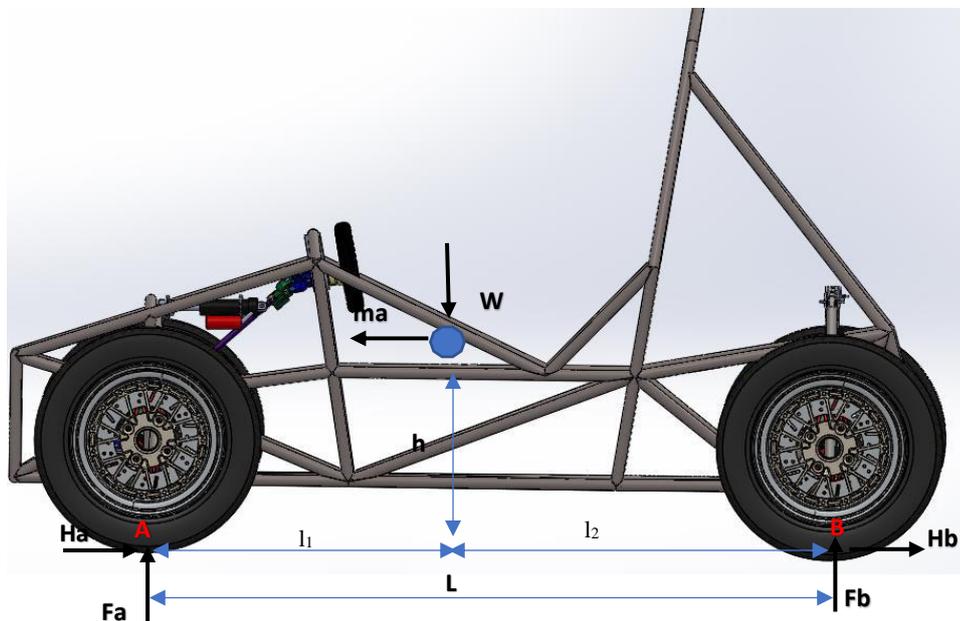
La importancia que tiene las manguetas dentro de un vehículo de Formula SAE, justifica que sea necesario realizar un nuevo diseño, donde se determine los valores de las fuerzas que intervienen.

#### 3.1.4.1 Cálculo de las fuerzas que actúa en las manguetas

Para el cálculo de las fuerzas que actúa en las manguetas durante el movimiento del vehículo, se va considerar algunos datos obtenidos en los análisis previos referente al chasis, transmisión y los sistemas: de suspensión, dirección y frenado del vehículo Formula SAE ESPOCH, así como los datos que proporciona en el Reglamento de Formula SAE 2020 para el desarrollo del proyecto.

Entre las fuerzas más importantes que afectan a las manguetas del vehículo esta la transferencia de pesos bajo condiciones de frenado, aceleración o el recorrido por curvas, además de la fuerza que ejerce la barra de dirección para girar la rueda cuando entra en una curva, más la fuerza de frenado sobre el disco de freno.(Granell, 2018)

Estas fuerzas obtenidas permitirán hacer el estudio necesario al nuevo modelo en el programa computacional ANSYS Workbench y así validar resultados para las manguetas finales.



**Figura 2-3:** Diagrama de cuerpo libre en vista lateral de un F-SAE

Fuente: (Albán, 2016)

A continuación, se describe en la tabla 1-3, algunas especificaciones del vehículo de Fórmula SAE-ESPOCH para determinar los valores de las fuerzas que actúan en las manguetas.

**Tabla 1-3:** Características de variables importantes del vehículo de Fórmula SAE

Simbología	Detalle	Valor
L	Batalla	2.13 m
Tc	Ancho de vía delantero	1.45m
Tp	Ancho de vía posterior	1.40m
l <sub>1</sub>	Distancia del eje delantero al centro de gravedad	0.9669 m
l <sub>2</sub>	Distancia del eje posterior al centro de gravedad	1.1631 m
h	Altura al centro de gravedad	0.3344 m
m	Masa del vehículo	320 kg
g	Gravedad	9.81 m/s <sup>2</sup>

Fuente: (Naranjo y Sanunga 2018)

Realizado por: Autores, 2020

### 3.1.4.2 Condición de Frenado

Cuando el conductor aplica los frenos, el vehículo sufre una desaceleración provocando una reacción de fuerzas sobre los neumáticos, la primera de ella es entre la fricción de la pinza de freno con el disco y segundo el efecto que produce la transferencia de pesos desde el eje posterior al eje delantero.(Granell, 2018)

La fórmula de desaceleración (  $a < 0$  ) fue tomada de (Hibbeler, 2010) y los valores de velocidades del (Reglamento Fórmula SAE 2020):

$$-a = \frac{v_f - v_o}{t} \quad \text{Ecuación (1-3)}$$

Donde:

$v_f =$  Velocidad final (km/h)

$v_o =$  Velocidad inicial (km/h)

$t =$  tiempo (s)

Para determinar el valor de (-a) tenemos los siguientes parámetros:

$v_f = 0$  km/h

$v_o = 105$  km/h

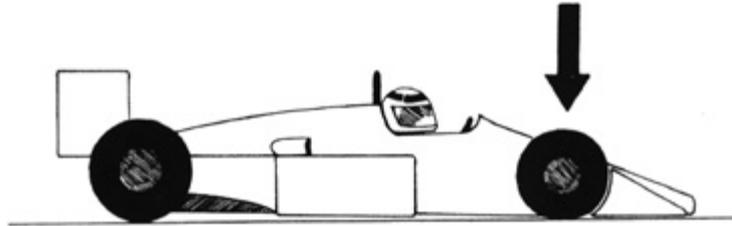
$t = 3$  s

$$-a = \frac{0 - 29.17}{3}$$

$$-a = -9.72 \text{ m/s}^2$$

### 3.1.4.3 Transferencia de carga

Se produce cuando el vehículo desacelera y frena, incrementando la reacción de la fuerza normal en los neumáticos delanteros por la fricción que existe con la calzada, efecto que se ve en la figura 3-3:



**Figura 3-3:** Transferencia de carga en frenado y desaceleración

Fuente: (RAC Escuela de Pilotos S.A.S. 2019)

Para el cálculo de la fuerza producida por la transferencia de carga longitudinal se aplica la fórmula tomada del libro *Race Car Design* de (Seward 2014):

$$F * h = \Delta Wx * L$$

$$a = \frac{F}{m}$$

$$\Delta Wx = \frac{a * m * h}{L} \quad \text{Ecuación (2-3)}$$

Donde:

$-a =$  Desaceleración ( $\text{m/s}^2$ )

$m =$  masa (vehículo + piloto) ( $\text{kg}$ )

$h =$  altura ( $\text{m}$ )

$L =$  batalla ( $\text{m}$ )

Para el cálculo de  $\Delta Wx$  tenemos los siguientes parámetros:

$-a = 9.72 \text{ m/s}^2$

$m = 395 \text{ kg}$

$h = 0.3344 \text{ m}$

$L = 2.13 \text{ m}$

$$\Delta W_x = \frac{(9.72) * (395) * (0.3344)}{2.13}$$

$$\Delta W_x = 602.77 \text{ N}$$

Con el valor de la transferencia de carga determinada más la suma del valor del peso total de vehículo se obtiene la carga total vertical (CTV):

$$CTV = \Delta W_x + W$$

$$CTV = 602.77\text{N} + (395\text{kg} * 9.81 \text{ m/s}^2)$$

$$CTV = 4477.72 \text{ N}$$

Para determinar los valores de las reacciones y fuerzas de fricción que actúa sobre los puntos de aplicación A y B del D.C.L de la figura 3-3, se aplica la segunda ley de Newton (Hibbeler, 2010):

$$\sum F_x = m * a$$

$$H_a + H_b = m * a$$

$$H_a = F_a * \mu \quad \text{Ecuación (3-3)}$$

$$H_b = m * a - H_a \quad \text{Ecuación (4-3)}$$

$$\sum F_y = m * g$$

$$F_a + F_b = m * g$$

$$F_a = m * g - F_b \quad \text{Ecuación (5-3)}$$

En la sumatoria de momentos se considera el efecto que produce el momento de inercia del neumático sobre el valor de reacción de fuerza normal:

$$\sum MA = I$$

$$F_b * L - W * l_1 + m * a * h = \frac{4Ir * u}{rdin}$$

$$F_b = \frac{\frac{4Ir * u}{rdin} + W * l_1 - m * a * h}{L} \quad \text{Ecuación (6-3)}$$

El momento de inercia del neumático viene expresada en la ecuación (7-3) donde  $k$ , es el ratio de distribución geométrica de la masa del neumático durante su rotación sobre la calzada, tiene valor comprendido entre 0,5 a 1 y para efecto de cálculo se utilizará su valor promedio de 0,75 (García Velazco 2005) :

$$I_r = m_n * r_n^2 \quad \text{Ecuación (7-3)}$$

Donde:

$k =$  factor de ratio de distribución

$m_n =$  masa del neumático (kg)

$r_n^2 =$  radio real del neumático (m)

$$I_r = 0.75 * 5 * 0.2525^2$$

$$I_r = 0.24 \text{kgm}^2$$

Con el valor determinado de la inercia del neumático, se reemplaza en la ecuación (6-3) para el cálculo de la fuerza normal en el punto B:

$$F_b = \frac{\frac{4 * I_r * u}{rdin} + W * l_1 - m * a * h}{L}$$

Datos:

$$a = 9.72 \text{ m/s}^2$$

$$m = 395 \text{ kg}$$

$$h = 0.3344 \text{ m}$$

$$L = 2.13 \text{ m}$$

$$l_1 = 0.9669 \text{ m}$$

$$I_r = 0.24 \text{ kgm}^2$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$W = 3874.95 \text{ N}$$

$$rdin = 0.25 \text{ m}$$

$$\mu = 1.1$$

$$F_b = \frac{\frac{4 * (0.24) * (1.1)}{0.25} + (3874.95 * 0.9669) - (395 * 9.72 * 0.3344)}{2.13}$$

$$F_b = 1160.01 \text{ N}$$

Con el valor obtenido de la fuerza normal en B, se reemplaza en la ecuación (5-3), y a su vez se determina los valores en las ecuaciones (3-3) y (4-3):

$$F_a = m * g - F_b$$

$$F_a = (395 * 9.81) - 1160.01$$

$$F_a = 2714.94 \text{ N}$$

$$H_a = 2986.43 \text{ N}$$

$$H_b = 852.97 \text{ N}$$

Para el momento de frenado que está afectado directamente por las fuerzas de fricción en el respectivo eje y que se distribuye para cada una de las ruedas, se determina de acuerdo a la fórmula (Jazar 2008):

$$M_f = \frac{H_a}{2} * r_{din}$$

Donde:

$H_a$  = Fuerza de fricción en el eje delantero (N)

$r_{din}$  = radio dinámico (m)

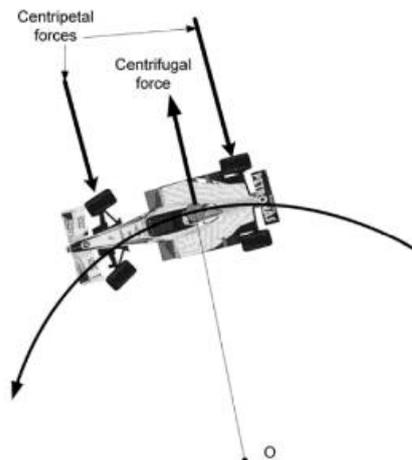
$$M_f = \frac{2986.43}{2} * 0.25$$

$$M_f = 373.30 \text{ Nm}$$

#### 3.1.4.4 Carga lateral al paso por curva

Cuando el vehículo recorre una curva y al girar, éste experimenta una carga lateral sobre los neumáticos, dicha carga debe evitar el desvío de la trayectoria del vehículo que se genera por la fuerza centrífuga que esta aplicada directamente sobre el centro de masa del vehículo como se observa en la figura 4-3.

Para determinar el valor de la fuerza centrífuga se basa en la ecuación (8-3) tomada de (Seward 2014) y los datos del evento de autocross donde el vehículo recorre en un rumbo cerrado con una velocidad promedio de 40 km/h a 48 km/h sobre un diámetro de pista de 23m según lo especificado en el (Reglamento Fórmula SAE 2020).



**Figura 4-3:** Fuerza centrífuga al paso por curva.

Fuente: (Seward 2014)

$$F_{centrífuga} = \frac{mv^2}{R} \quad \text{Ecuación (8-3)}$$

Donde:

$v = \text{Velocidad (m/s)}$

$m = \text{masa (vehículo + piloto) (kg)}$

$R = \text{Radio de curva más cerrada (m)}$

$$F_{centrífuga} = \frac{(395) * (13.33)^2}{11.5}$$

$$\mathbf{F_{centrífuga} = 6103.23 N}$$

La aceleración centrífuga del vehículo durante la trayectoria en curva, está afectada directamente por la fuerza centrífuga sobre la masa total (9), y la responsable de la transferencia de pesos desde la rueda interior a la rueda exterior, produciendo cargas laterales en el sistema de suspensión.

$$A_{centrífuga} = \frac{F_{centrífuga}}{m} \quad \text{Ecuación (9-3)}$$

Donde:

$F_c = \text{Fuerza centrífuga (N)}$

$m = \text{masa (vehículo + piloto) (kg)}$

$$A_{centrífuga} = \frac{6103.23}{395}$$

$$A_{centrífuga} = 15.45 \text{ m/s}^2$$

Para determinar el valor del incremento de carga exterior al paso por una curva (figura 4-3), se aplica el criterio de solución de la fórmula planteada por (Milliken y Milliken 1995):

$$F_e = \frac{W}{2} + \frac{F_{centrífuga} * h}{T_c} \quad \text{Ecuación (10-3)}$$

Donde:

$W = \text{Peso del vehículo (N)}$

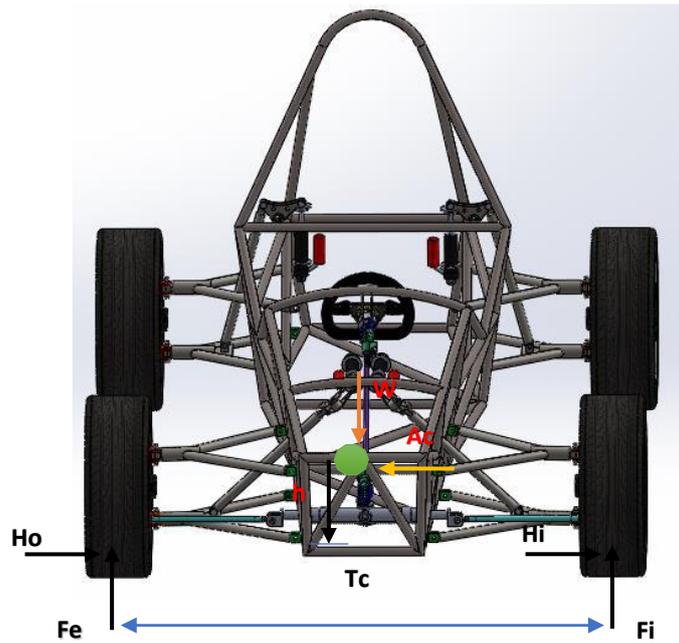
$F_c = \text{Fuerza centrífuga (N)}$

$h = \text{altura al centro de gravedad (m)}$

$T_c = \text{ancho de vía delantero (m)}$

$$F_w = \frac{3874.95}{2} + \frac{(6103.23) * (0.3344)}{1.45}$$

$$\mathbf{F_e = 3345.01 N}$$



**Figura 5-3:** Diagrama de cuerpo libre en vista frontal  
Fuente: (Albán 2016)

Cuando el vehículo ingresa a una curva, los neumáticos toman un ángulo de inclinación ( $\theta$ ) sobre la superficie de contacto, con la segunda Ley de Newton (Hibbeler 2010) se determina la fuerza horizontal como se ve en la figura 6-3:

$$\sum F_x = m * a$$

$$H_o = m * a_{centrifuga} - F_e * \sin\theta - W * \sin\theta \quad \text{Ecuación (11-3)}$$

Datos:

$$m = 395 \text{ kg}$$

$$A_c = 15.45 \text{ m/s}^2$$

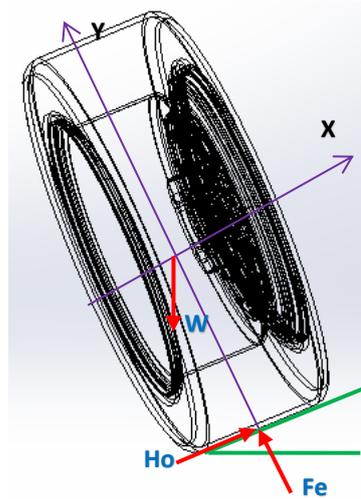
$$\theta = 20^\circ$$

$$F_e = 3345.01 \text{ N}$$

$$W = 3874.95 \text{ N}$$

$$H_o = (395 * 15.45) - 3345.01 * \sin(20^\circ) - 3874.95 * \sin(20^\circ)$$

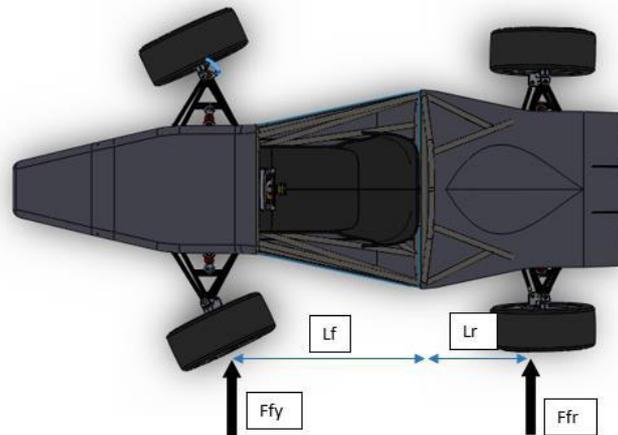
$$\mathbf{H_o = 3617.93 \text{ N}}$$



**Figura 6-3:** D.C.L. del neumático  
**Fuente:** Autores

### 3.1.4.5 Fuerza aplicada en la junta dirección

Cuando el conductor gira el volante del vehículo al tomar una curva, produce una fuerza lateral en el sistema de dirección, es transmitida a través de la barra de dirección directamente a la mangueta y a su vez a los neumáticos para el giro del eje delantero.



**Figura 7-3:** D.C.L. de fuerzas el en giro de dirección  
**Fuente:**(Granell 2018)

$$\sum Fy = m * \frac{v^2}{R}$$

$$Ffy + Fry = m * \frac{v^2}{R}$$

$$\sum M_{CG} = 0$$

$$Ffy * l_1 + Fyr * l_2 = 0$$

Por lo tanto:

$$F_{yf} = F_{yr} * \frac{l_2}{l_1}$$

$$F_{yr} = m * \frac{v^2}{R} * \left(\frac{l_2}{l_1 + l_2}\right)$$

$$F_{yr} = (395) * \frac{(2.78)^2}{4.5} * \left(\frac{1.1631}{1.1631 + 0.9669}\right)$$

$$F_{yr} = 370.43 \text{ N}$$

$$F_{yf} = 370.43 * \frac{1.1631}{0.9669}$$

$$F_{yf} = 445.08 \text{ N}$$

### 3.1.4.6 Resumen de las fuerzas que actúan sobre la mangueta delantera y posterior

Resultados de las cargas necesarias a la que está sometida la mangueta delantera, mismas que están expresadas en la tabla 2-3:

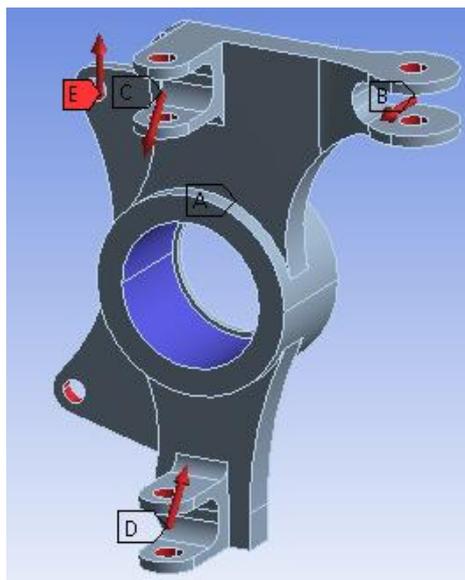
**Tabla 2-3:** Valor de las cargas finales para la mangueta delantera

Mangueta Delantera		
Nomenclatura	Detalle	Valor
Fa	Fuerza normal durante el frenado	2714.94 N
Fpd	Fuerza de frenado en la pinza delantera	2986.43 N
$F_e$	Fuerza normal durante recorrido por curva	3345.01 N
Ho	Fuerza lateral durante recorrido por curva	3617.93 N
$f_{yf}$	Fuerza en la junta de dirección	445.08 N

Fuente:(Granel 2018)

Realizado por: Autores, 2020

En la figura 8-3 se indica la aplicación de las principales fuerzas que actúan sobre los soportes de la mangueta delantera, la sección **B** representa la fuerza en la junta de dirección con un valor de 445.08 N en dirección Z, la sección **C** y **D** las fuerzas normal y lateral durante el recorrido por una curva más la normal durante el frenado con un valor de 3345.01 N para la dirección Y<sub>1</sub>, 3617.93 N para la dirección Z, 2714.94 N dividida para los dos ejes con un valor de 1357.17 N en dirección Y<sub>2</sub> respectivamente, la sección **E** con la fuerza de frenado en la pinza delantera con un valor 2986.43 N en dirección tangente a la rueda.



**Figura 8-3:** Fuerzas en la mangueta delantera

Fuente: Autores, 2020

En la mangueta posterior se reemplaza la fuerza de la junta de dirección, debido a que en el eje posterior no posee el efecto (guía) del sistema de dirección, para esta fuerza ( $F_{yf}$ ) se reemplaza por la fuerza ( $F_{yr}$ ) que tiene la función de evitar que los neumáticos posteriores cambien de dirección y a la vez mantener en un solo sentido de rotación al estar compartido con la junta homocinética.

En la tabla 3-3, se presenta los resultados de las principales cargas que actúan sobre mangueta posterior:

**Tabla 3-1:** Valor de cargas finales que actúa en la mangueta posterior

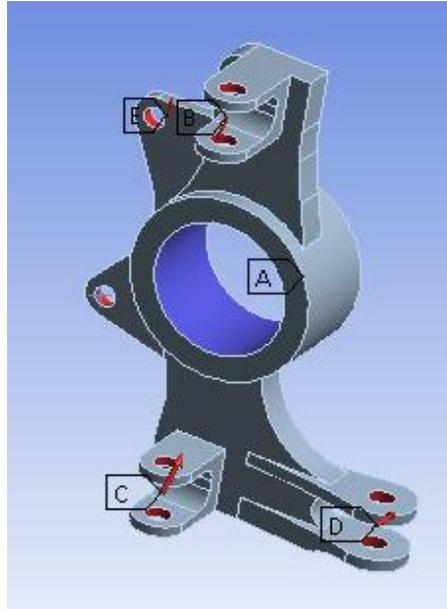
Mangueta Posterior		
Nomenclatura	Detalle	Valor
$F_{pp}$	Fuerza de frenado en la pinza posterior	852.97 N
$F_e$	Fuerza normal durante recorrido por curva	3345.01 N
$H_o$	Fuerza lateral durante recorrido por curva	3617.93 N
$F_{yr}$	Fuerza del tope en la base inferior	370.43 N

Fuente:(Granell 2018)

Realizado por: Autores, 2020

En la siguiente figura 9-3, siguiendo con el mismo criterio de la mangueta delantera se describe las fuerzas que actúan sobre los soportes, la sección **D** representa la fuerza del tope en la base inferior con un valor de 370.43 N en dirección Z, la sección **B** y **C** las fuerzas normal y lateral durante el recorrido por una curva con un valor de 3345.01 N para la dirección  $Y_1$ , 3617.93 N

para la dirección Z respectivamente, la sección E con la fuerza de frenado en la pinza posterior con un valor 852.97 N en dirección tangente a la rueda.

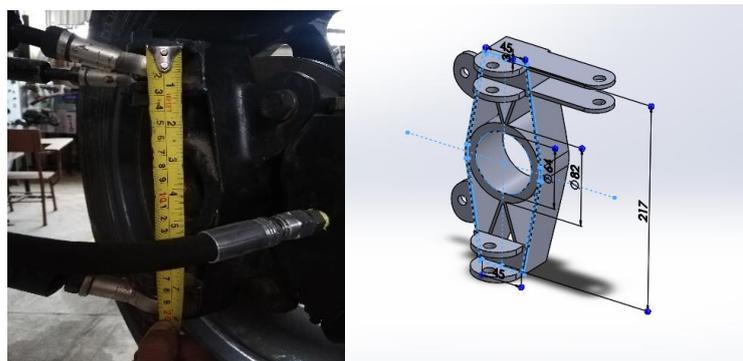


**Figura 9-3:** Fuerzas en la mangueta posterior

Fuente: Autores

### 3.2 Diseño del prototipo

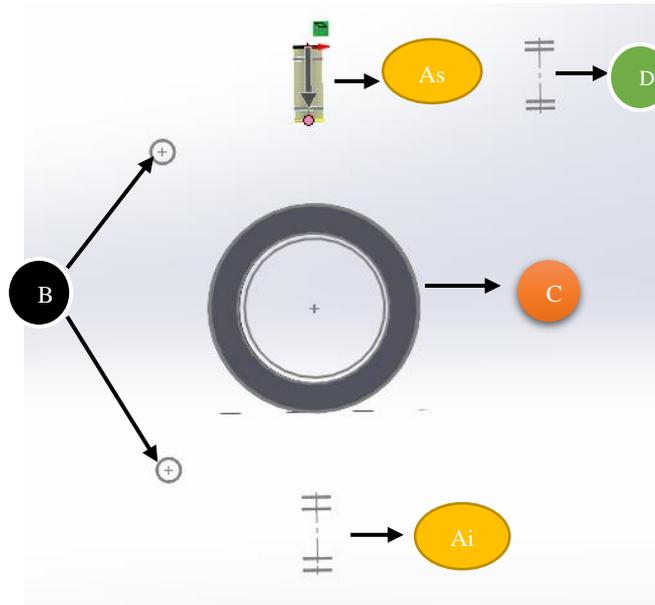
Originalmente la mangueta fue construida como parte de la tesis “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE DIRECCIÓN PARA UN VEHÍCULO TIPO FÓRMULA PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ” (Albán 2016), donde, con la ayuda del análisis de ingeniería inversa se procede a realizar el modelado en el software CAD como se observa en la figura 10-3, con la finalidad de obtener los principales puntos de anclaje.



**Figura 10-3:** Diseño del modelo original en Software CAD

Fuente: Autores,2020

Una vez obtenido el modelo inicial, se conserva los principales puntos de anclajes y están distribuidos de acuerdo con la figura 11-3:

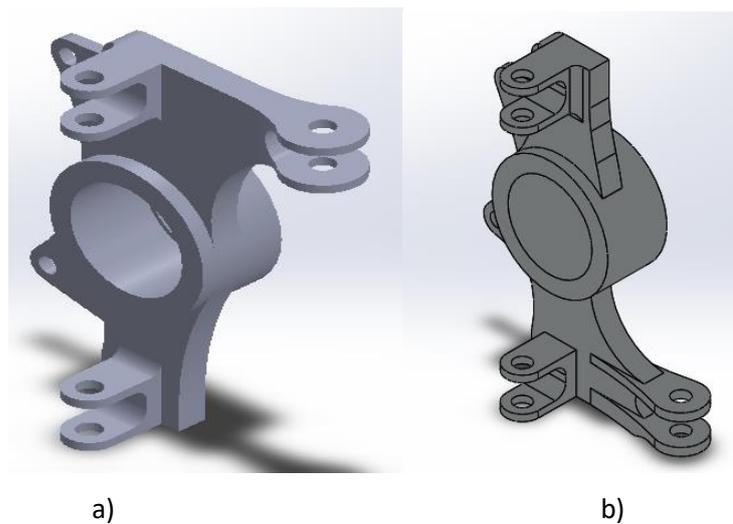


**Figura 11-3:** Puntos de anclaje en vista 3D  
Fuente: Autores

Donde:

- A: Soportes para los brazos de suspensión superior (s) e inferior(i).
- B: Soporte para la mordaza de freno.
- C: Soporte fijo para el rodamiento.
- D: Soporte para el brazo de dirección

Descrito los puntos de anclaje, el siguiente paso es el diseño de los modelos de las manguetas como se indica en la figura 12-3, modelo que servirá de análisis antes de su evaluación final.



**Figura 12-3:** Vista isométrica: a) Mangueta delantera, b) Mangueta posterior  
Fuente: Autores, 2020

### 3.2.1 Análisis de material

El conocimiento de los materiales permite desarrollar procesos de manufactura; procesos en donde se realiza la transformación de los materiales con el propósito de alcanzar operaciones exitosas, operaciones que normalmente dependen de si cumple con los requerimientos de resistencia a fuerzas, temperaturas y parámetros físicos.(Groover 2007, p. 23)

La asignación del material para el nuevo modelo debe cumplir algunas propiedades para el proceso de manufactura de la mangueta y que se indica en la tabla 4-3:

**Tabla 4-3:** Descripción de propiedades que debe tener el material

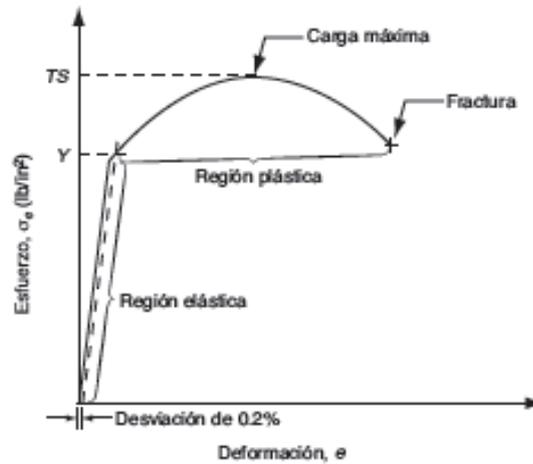
Propiedades	Descripción
Económicas	Precio Disponibilidad
Físicas	Densidad
Mecánicas	Módulos Limite elástico Resistencia a la tracción Resistencia a la fluencia Resistencia a la fatiga
Interacción con el entorno	Desgaste Corrosión
Producción	Facilidad de fabricación Acabado
Estética	Textura

**Fuente:** (Ashby y Jones 2008)

**Realizado por:** Autores, 2020

Entre las propiedades que se resaltan sobre un material, están las mecánicas, debido “a que son importantes en el diseño porque el funcionamiento y rendimiento de un producto dependen de su capacidad para resistir la deformación ante los esfuerzos a que se somete durante su uso” (Groover 2007, p. 38).

La curva esfuerzo – deformación es la relación que describe las propiedades mecánicas, curva que analiza el comportamiento del material ante la aplicación de esfuerzos estáticos, como se ve en el gráfico 2-3.



**Gráfico 2-3:** Curva esfuerzo - deformación de ingeniería

Fuente: (Groover 2007)

El material para utilizar es el Aluminio 7075, que tiene la característica de ser resistente y utilizable en la industria aeroespacial, en la elaboración de piezas automotrices por su similitud con el acero, presentan algunas propiedades que se detallan en la tabla 5-3.

**Tabla 5-3:** Descripción del material seleccionado

Material	Propiedades					
	Aleación de aluminio 7075	Densidad (kg/mm <sup>3</sup> )	Módulo de Young (MPa)	Coeficiente de Poisson	Resistencia a la tracción mínima (MPa)	Límite Elástico (MPa)
	2810	72000	0.33	503	572	159

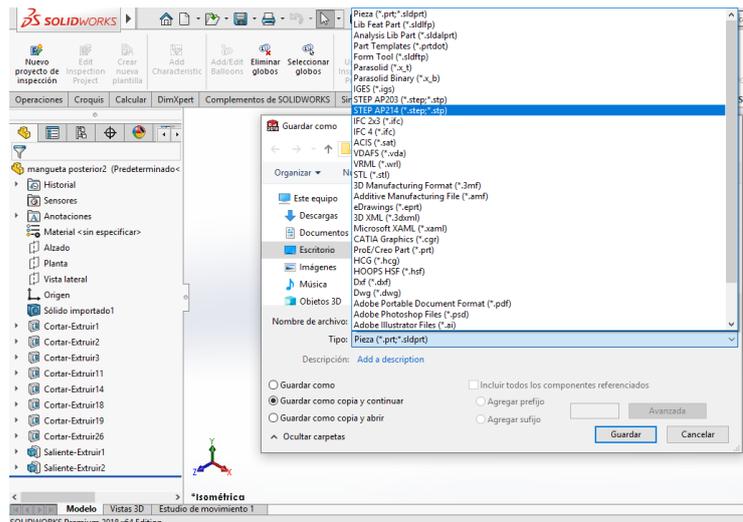
Fuente: (MatWeb 2020)

Realizado por: Autores, 2020

### 3.3 Proceso de Optimización Topológica

#### 3.3.1 Optimización de mangueta delantera

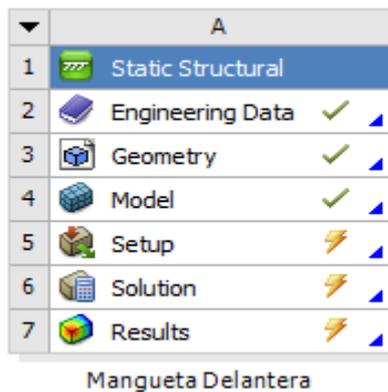
Para realizar la optimización topológica, el primer paso es exportar el diseño realizado en *SolidWorks* en archivo *STEP* (.stp), formato que permite el intercambio de datos tridimensionales. Proceso que se indica en la figura 13-3.



**Figura 13-3:** Proceso de exportación de archivo *STEP*

**Fuente:** Autores, 2020

Una vez exportado el archivo en formato *STEP*, se ejecuta el programa computacional *ANSYS Workbench*, donde en su ventana de trabajo se inicia ejecutando un nuevo proyecto mediante el módulo *Static Structural* de la barra de herramientas.



**Figura 14-3:** Selección del Módulo *Static Structural*

**Fuente:** Autores

Dentro del módulo se edita los parámetros como: *Engineering Data*, donde se asigna las propiedades del material a través de la creación del nuevo material en la biblioteca del programa.

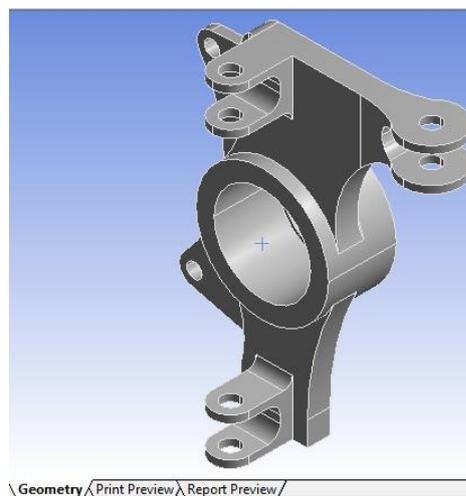
Outline of Schematic A2, B2: Engineering Data	
	A
1	Contents of Engineering Data
2	Material
3	Aleacion de Aluminio
4	Structural Steel

Properties of Outline Row 3: Aleacion de Aluminio			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	2,81E-06	kg mm <sup>-3</sup>
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young'...	
6	Young's Modulus	72000	MPa
7	Poisson's Ratio	0,33	
8	Bulk Modulus	70588	MPa
9	Shear Modulus	27068	MPa
10	Tensile Yield Strength	503	MPa
11	Tensile Ultimate Strength	572	MPa

**Figura 15-3:** Propiedades del material

**Fuente:** Autores, 2020

En *Geometry* se importa el archivo en formato STEP, espacio donde se realiza el reconcomiendo previo de caras, aristas y dimensiones del modelo, con la geometría asignada se ejecuta *Mode* comando que permite visualizar y editar todas las condiciones el modelo importado. En la figura 16-3 se observa la geometría importada de la mangueta delantera.



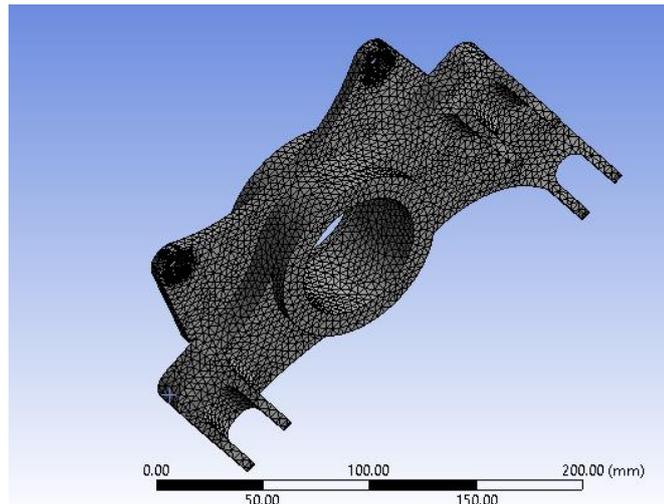
**Figura 16-3:** Generación de geometría

**Fuente:** Autores.

Con la geometría importada procedemos a establecer condiciones para el proceso de optimización:

### 3.3.1.1 Mallada mangueta delantera

El análisis del modelo parte del mallado de acuerdo a la figura 17-3, donde el software divide a la geometría en una “red de elementos y nodos que discretizan una región” (Budynas y Nisbett 2012, p. 927), para la mangueta delantera se insertó un *Sizing*, que permite establecer un tamaño de elementos para toda la geometría para lo cual se aplicó de 3 mm y un *Refinement* para las zonas más críticas donde van aplicadas las cargas con un nivel de 2 mm en las arista vivas (Granel 2018)



**Figura 17-3:** Mallado del modelo preliminar

Fuente: Autores

Una vez ejecutado el programaba, éste presenta resultados de malla con número de elementos 179203 y un número de nodos de 268645.

Details of "Mesh" <span>⌵</span>	
[-] Display	
Display Style	Use Geometry Setting
[+] Defaults	
Sizing	
Quality	
Inflation	
Advanced	
[-] Statistics	
Nodes	268645
Elements	179203

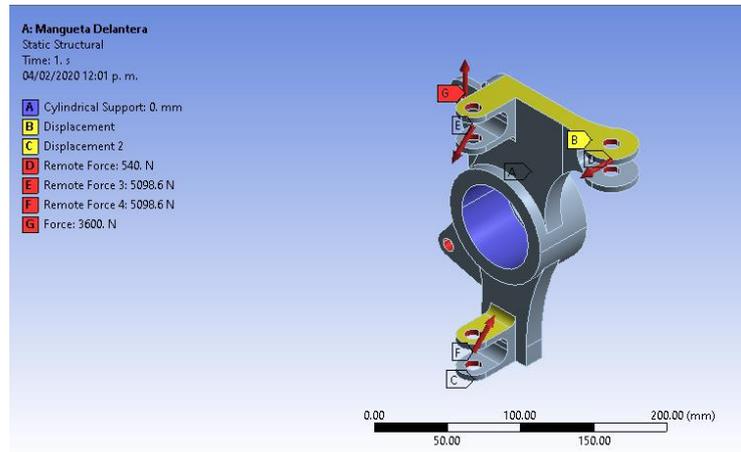
**Figura 18-3:** Nodos y elementos modelo 1

Fuente: Autores, 2020

### 3.3.1.2 Aplicación de condiciones de contorno

Para las condiciones de contorno se empieza por la aplicación de las cargas y restricciones que actúan en la mangueta, para el proceso de simulación se asigna un *Cylindrical support* en el

soporte fijo para el rodamiento, se restringe los grado de libertad de la geometría con dos *Displacement* en la parte superior e inferior, las cargas se aplican en los soportes fijos para la suspensión superior e inferior, en el soporte para la dirección y para la posición de la mordaza de freno, que se representa en la figura 19-3:

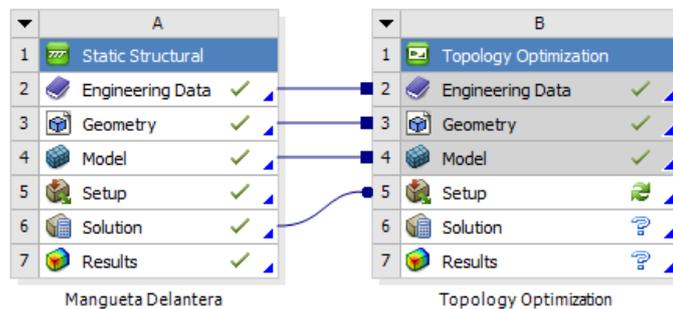


**Figura 19-3:** Cargas y restricciones en la mangueta

**Fuente:** Autores

### 3.3.1.3 Solución del modelo con optimización topológica

Con todas las condiciones de contorno impuestas, se procede a realizar la optimización topológica mediante el módulo *Topology Optimization* (B), técnica que se conecta con el bloque de *Static Structural* (A), acción que se indica en la figura 20-3.



**Figura 20-3:** Aplicación del módulo de *Topology Optimization*

**Fuente:** Autores

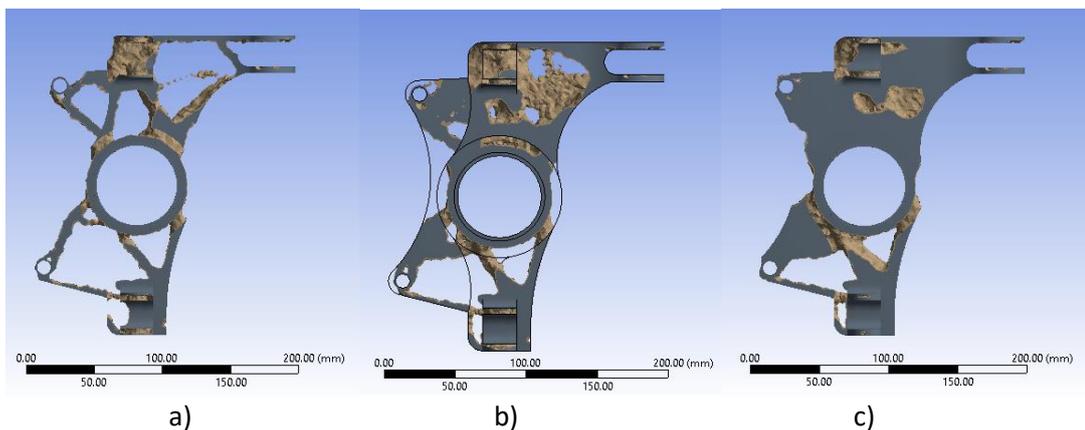
Dentro del bloque *Topology Optimization*, se definen parámetros que tiene como objetivo retirar masa innecesaria de acuerdo con el porcentaje de selección sobre la región designada por el programa con número de interacciones, detalle que se ve en la figura 21-3:

Details of "Response Constraint"		Details of "Topology Density"	
<b>Scope</b>		<b>Results</b>	
Scoping Method	Optimization Region	Minimum	1.e-003
Optimization Region Selection	Optimization Region	Maximum	1.
<b>Definition</b>		Average	0.40203
Type	Response Constraint	Original Volume	3.5148e+005 mm <sup>3</sup>
Response	Mass	Final Volume	1.0864e+005 mm <sup>3</sup>
Define By	Constant	Percent Volume of Original	30.91
<input type="checkbox"/> Percent to Retain	15 %	Original Mass	0.98766 kg
Suppressed	No	Final Mass	0.30528 kg
		Percent Mass of Original	30.91
		<b>Visibility</b>	
		<b>Information</b>	
		Iteration Number	64

**Figura 21-3:** Detalles de parámetros para la optimización

Fuente: Autores

Aplicando los parámetros, el software identifica la región a ser optimizada en *Percent to Retain* de 15%, 30% y 50% en la figura 22-3, proceso que se obtiene con un número de interacciones de 64 para el más mínimo valor de porcentaje, esto permite alcanzar el modelo para poder realizar la respectiva modificación.

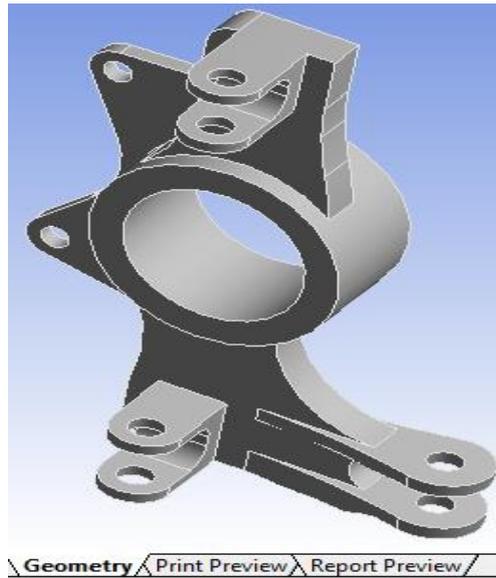


**Figura 22-3:** Región removida por el programa es: a) 85%, b) 70% y c) 50% de masa

Fuente: Autores

### 3.3.2 Optimización de mangueta posterior

En la mangueta posterior se sigue el mismo procedimiento para alcanzar la reducción de masa innecesaria en el modelo final.

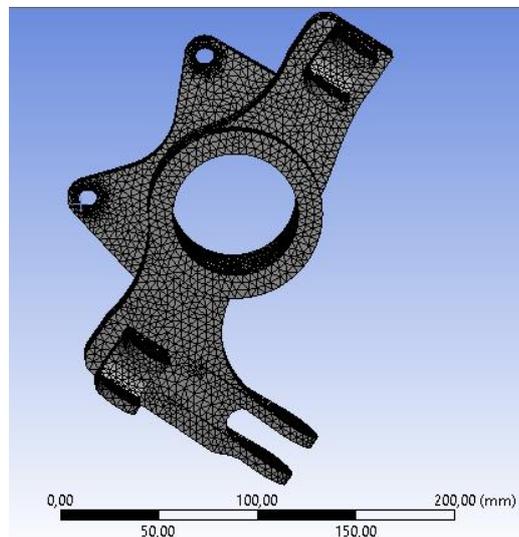


**Figura 23-3:** Geometría en *Model*

**Fuente:** Autores

### 3.3.2.1 *Mallado de mangueta posterior*

La geometría de la mangueta posterior al tener la similitud con la mangueta delantera, su configuración para el mallado es el igual, es decir, se aplica la opción de *Sizing y Refinement* para discretizar toda la región de la figura 24-3.



**Figura 24-3:** Mallado de mangueta posterior

**Fuente:** Autores, 2020

El resultado de malla en la mangueta posterior se detalla con el número de elementos 82191 y el número de nodos en 127455.

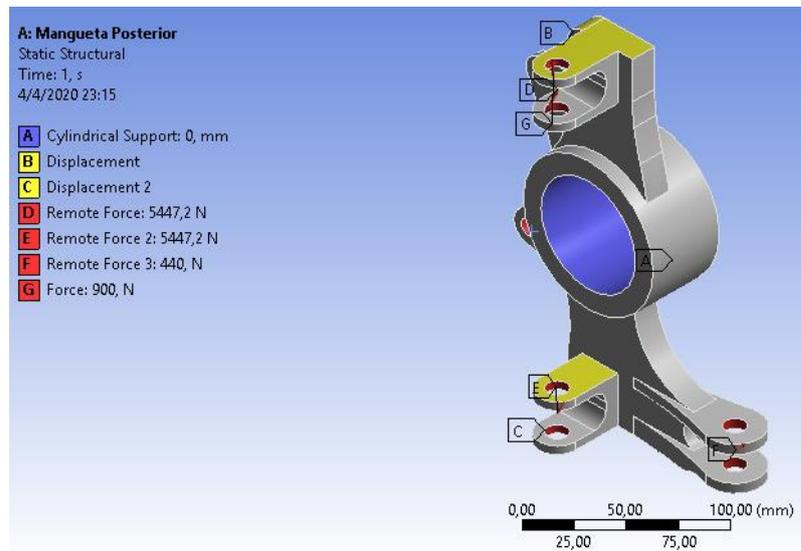
Details of "Mesh"	
+ Display	
+ Defaults	
+ Sizing	
+ Quality	
+ Inflation	
+ Advanced	
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	127455
<input type="checkbox"/> Elements	82191

**Figura 25-3:** Nodos y elementos modelo 2

Fuente: Autores,2020

### 3.3.2.2 Condiciones de contorno

A igual que el modelo anterior se sigue con las mismas condiciones, la diferencia en este modelo está en el cambio el valor de la fuerza de la junta dirección por la fuerza en el tope de base inferior como se observa en la figura 26-3.

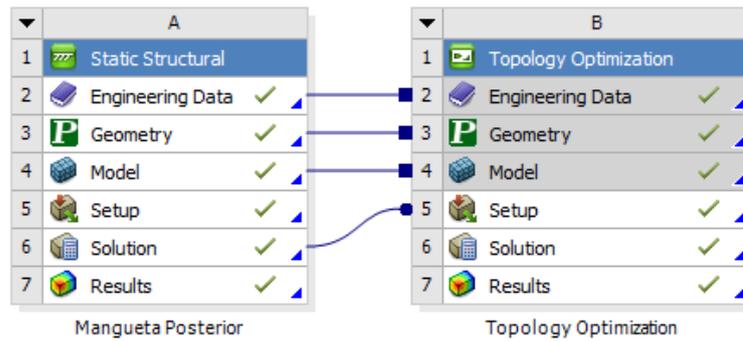


**Figura 26-3:** Condiciones de contorno del modelo posterior

Fuente: Autores, 2020

### 3.3.2.3 Solución del modelo con optimización topológica

Las condiciones de contorno permiten dar paso para realizar la optimización topológica utilizando el módulo *Topology Optimization (B)*, conectado con módulo *Static Strutral (A)*, acción que se indica en la figura 27-3.



**Figura 27-3:** Topología de la mangueta posterior

Fuente: Autores

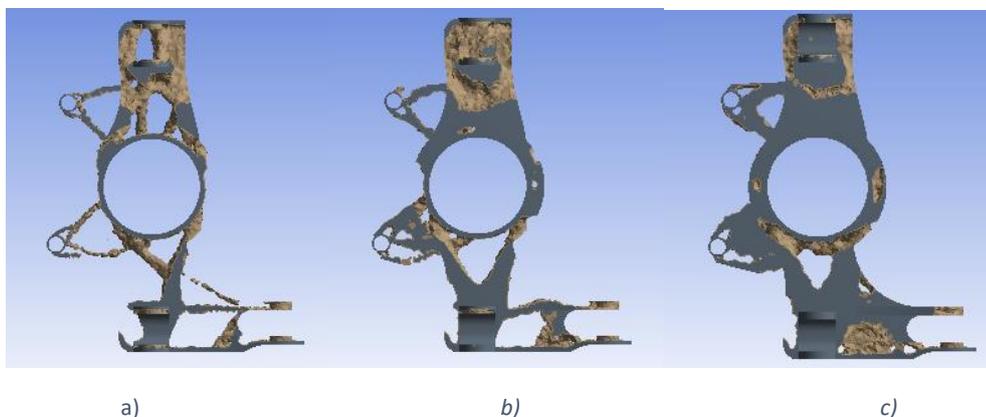
En *Topology Optimization*, se mantiene los mismos parámetros para retirar masa innecesaria de acuerdo al porcentaje de selección sobre la región designada por el programa con número de interacciones, detalle que se ve en la figura 28-3:

Details of "Response Constraint"		Details of "Topology Density"	
<b>Scope</b>		<b>Results</b>	
Scoping Method	Optimization Region	<input type="checkbox"/> Minimum	1, e-003
Optimization Region Selection	Optimization Region	<input type="checkbox"/> Maximum	1,
<b>Definition</b>		<input type="checkbox"/> Average	0,38467
Type	Response Constraint	<input type="checkbox"/> Original Volume	3,13e+005 mm <sup>3</sup>
Response	Mass	<input type="checkbox"/> Final Volume	87683 mm <sup>3</sup>
Define By	Constant	<input type="checkbox"/> Percent Volume of Original	28,013
<input type="checkbox"/> Percent to Retain	15 %	<input type="checkbox"/> Original Mass	0,87954 kg
Suppressed	No	<input type="checkbox"/> Final Mass	0,24639 kg
		<input type="checkbox"/> Percent Mass of Original	28,013
		<b>Visibility</b>	
		<b>Information</b>	
		Iteration Number	41

**Figura 28-3:** Detalles de parámetros para la optimización

Fuente: Autores, 2020

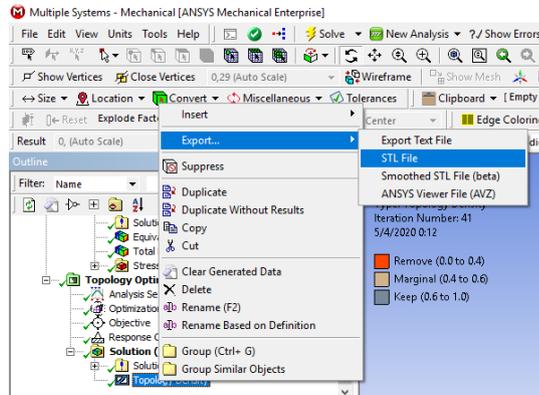
La región para optimizar será igual con *Percent to Retain* de 15%, 30% y 50% en la figura 29-3, proceso que se obtiene con un número de interacciones de 41 para el más mínimo valor de porcentaje, con lo que permite alcanzar el modelo para poder realizar la respectiva modificación.



**Figura 29-3:** Material removido según porcentaje: a) 85 %, b) 70%, c) 50%

Fuente: Autores, 2020

Para finalizar el proceso de optimización topológica de los modelos, éstos se exportan mediante el archivo *STL File* desde la solución, secuencia que se indica en la figura 30-3, formato que permitirá realizar las modificaciones necesarias para el rediseño del modelo final de las manguetas.

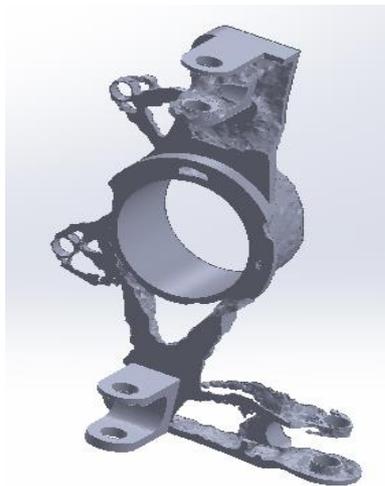


**Figura 30-3:** Exportación de archivo *STL File*.

Fuente: Autores, 2020

### 3.4 Rediseño de manguetas

La siguiente actividad se inicia ejecutando software SolidWorks para abrir el archivo *STL File* y visualizar la topología. Topología que se mejora dando correcciones a la forma de la geometría en las zonas donde el material es retirado, figura 31-3.

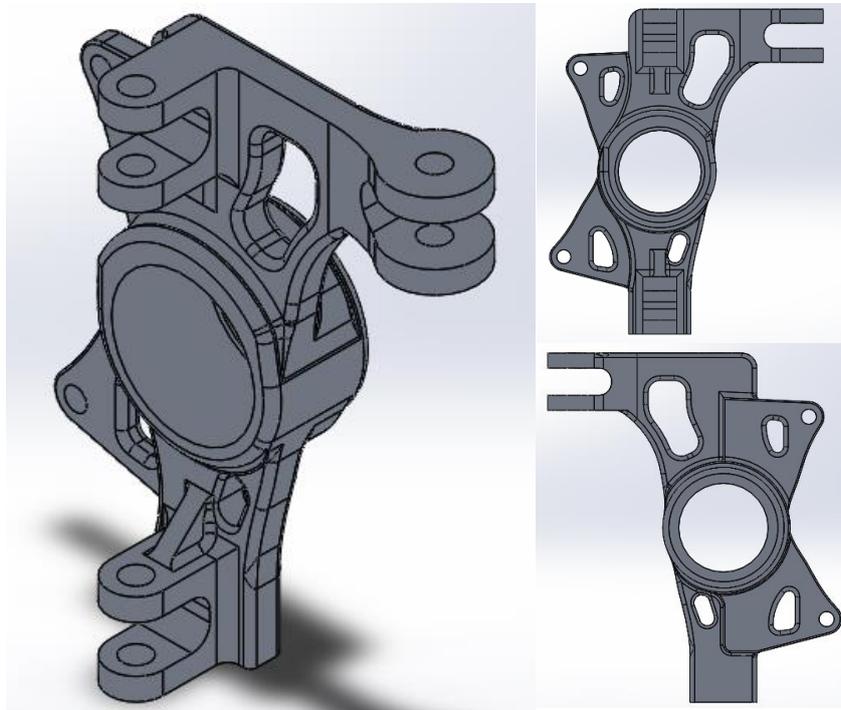


**Figura 31-3:** Modelo con topología

Fuente: Autores, 2020

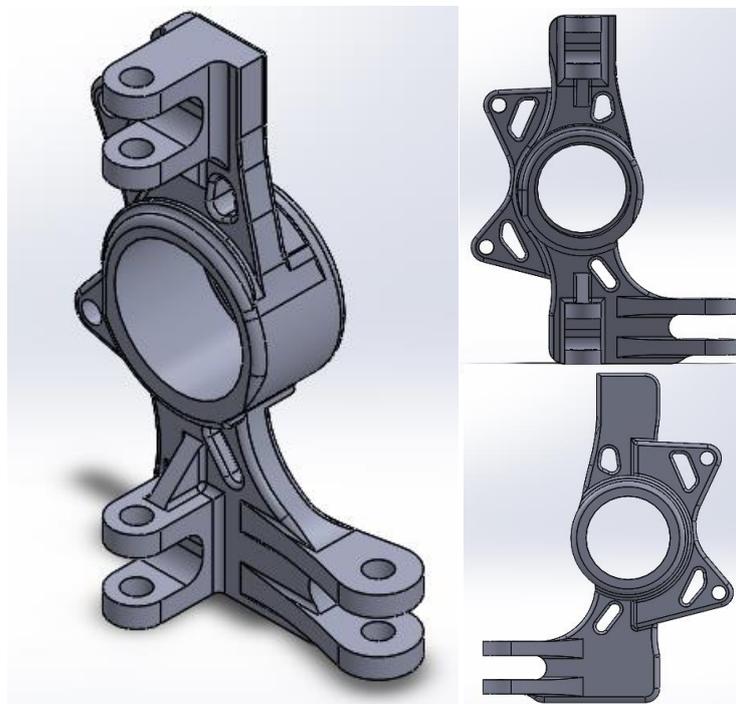
En el rediseño de los modelos de la mangueta delantera (figura 32-3) y mangueta posterior (figura 33-3), se incrementa el espesor en las orejas de los soportes superior e inferior, además se inserta nervios en la base de los soportes para la suspensión, estos parámetros permitirá aumentar

el factor de seguridad ante las cargas producidas por la reacción del neumático con el suelo durante el proceso de frenado, aceleración – desaceleración y al recorrido por una curva, durante la conducción del vehículo.



**Figura 32-3:** Rediseño de la mangueta delantera en distintas vistas

Fuente: Autores, 2020



**Figura 33-3:** Rediseño de la mangueta posterior en distintas vistas

Fuente: Autores, 2020

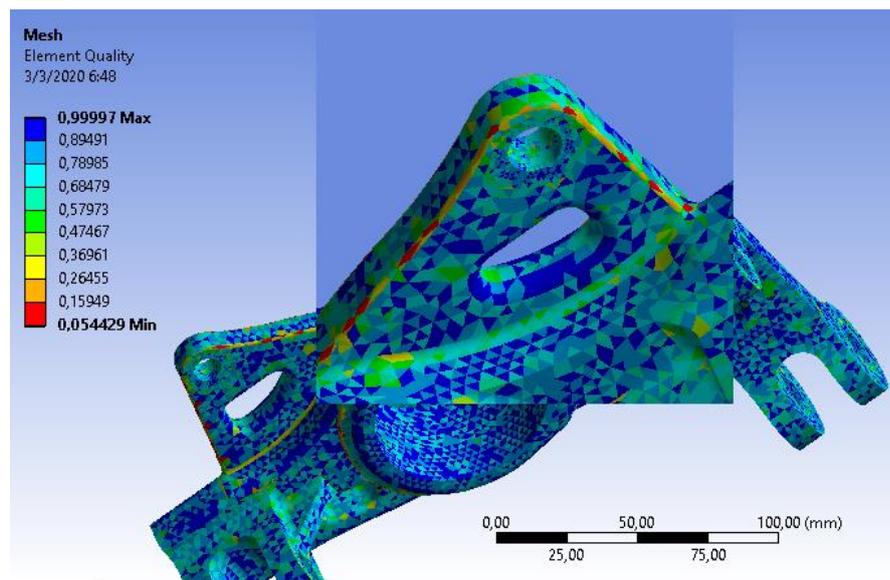
### 3.5 Simulación de las manguetas

El *software ANSYS* permite simular el comportamiento de las cargas que actúan sobre las manguetas para obtener una solución aproximada a la realidad.

#### 3.5.1 Análisis de mangueta delantera

##### 3.5.1.1 Calidad de malla en la mangueta delantera

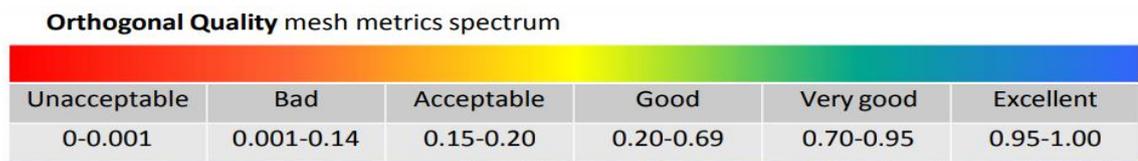
El mallado representa el primer análisis para determinar la calidad del producto, para nuestro modelo se utilizará un indicador de calidad mediante *pantalla* con la opción *Element Quality*, que describe por colores de excelente a una mala calidad de malla como se observa en la figura 34-3, además se puede ver que los puntos de color rojo muestran que la malla tiene 0.054429 mínimo de defectos por la acción y ubicación de la fuerza que ejerce sobre la cara de alojamiento de la pinza de freno.



**Figura 34-3:** Calidad de malla en elementos sometidos a cargas

Fuente: Autores, 2020

Una mejor estadística de calidad de malla se obtiene a través de la opción *Mesh Metric*, donde seleccionaremos de igual manera la opción *Element Quality*, el cual indica un promedio de 0.78 ente (0 y1), valor que está dentro del rango aceptable para nuestro diseño de acuerdo con la figura 35-3.



**Figura 35-3:** Recomendaciones de calidad de malla

Fuente: (Nagib 2018)

En la figura 36-3 se detalla los resultados del mallado al aplicar el control de calidad de malla con número de elementos 199803 y nodos 302842.

Details of "Mesh"		Details of "Mesh"	
<input type="checkbox"/> Display		<input type="checkbox"/> Quality	
Display Style	Element Quality	Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Defaults		Error Limits	Standard Mechanical
<input type="checkbox"/> Sizing		<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)
<input type="checkbox"/> Quality		Smoothing	Medium
<input type="checkbox"/> Inflation		Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Advanced		<input type="checkbox"/> Min	1,6997e-002
<input type="checkbox"/> Statistics		<input type="checkbox"/> Max	0,99992
<input type="checkbox"/> Nodes	302842	<input type="checkbox"/> Average	0,78306
<input type="checkbox"/> Elements	199803	<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,14321

**Figura 36-3:** Detalle del mallado sobre la geometría de análisis

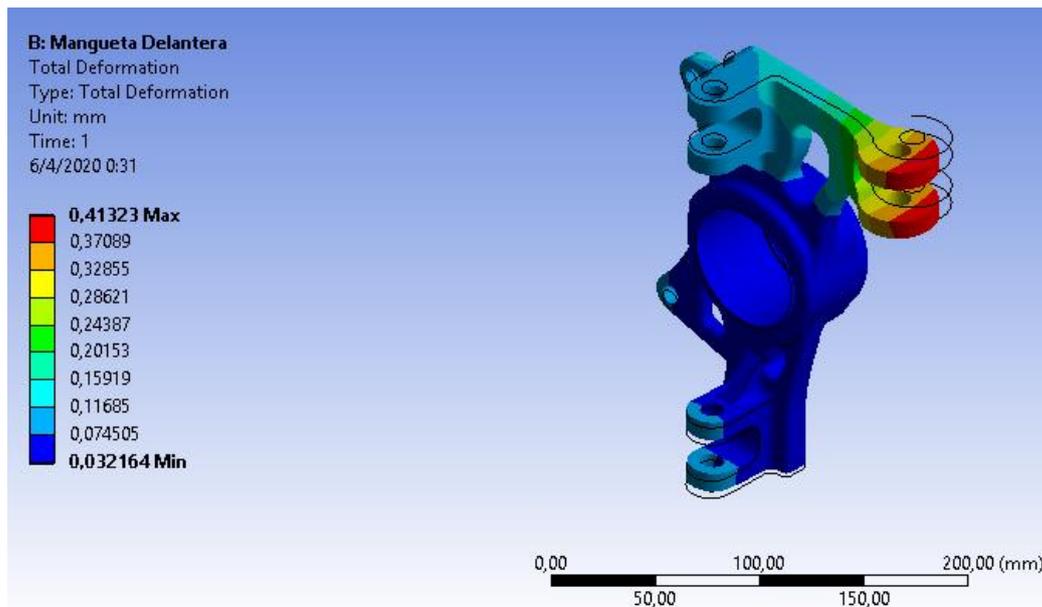
Fuente: Autores, 2020

### 3.5.2 *Análisis mediante elementos finitos*

Asignado las condiciones de contorno y las principales fuerzas a la que va a estar sometida la mangueta durante condiciones de trabajo, por lo que los resultados analizar son: Deformación Total, Esfuerzo Equivalente de Von - Mises y el Factor de Seguridad, con el propósito de verificar la eficiencia del modelo rediseñado.

#### 3.5.2.1 *Deformación total*

Fenómeno que se presenta al momento que el vehículo recorrer por una curva o en al pasar por un obstáculo, donde muestra que en el soporte de la dirección tiene un valor máximo de desplazamiento de 0.41323 mm y mínimo de 0.031961 mm, valor que se desprecia al no tener efecto sobre el resto del cuerpo de la mangueta.

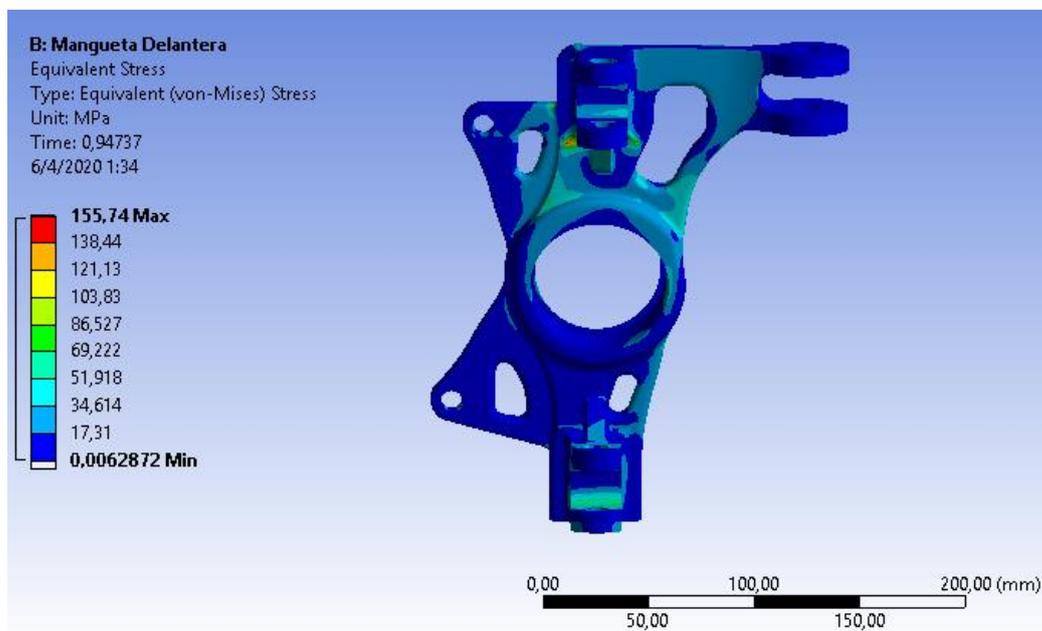


**Figura 37-3:** Resultado de Deformación Total

Fuente: Autores, 2020

### 3.5.2.2 Tensión Von - Mises

La tensión máxima que se produce en el cuerpo de la mangueta es de 155.74 MPa, lo que determina que soporta de manera aceptable al efecto que producen las cargas y es inferior a la capacidad de resistencia a fatiga del material. Su concentración máxima está en la base de los soportes de la suspensión superior.

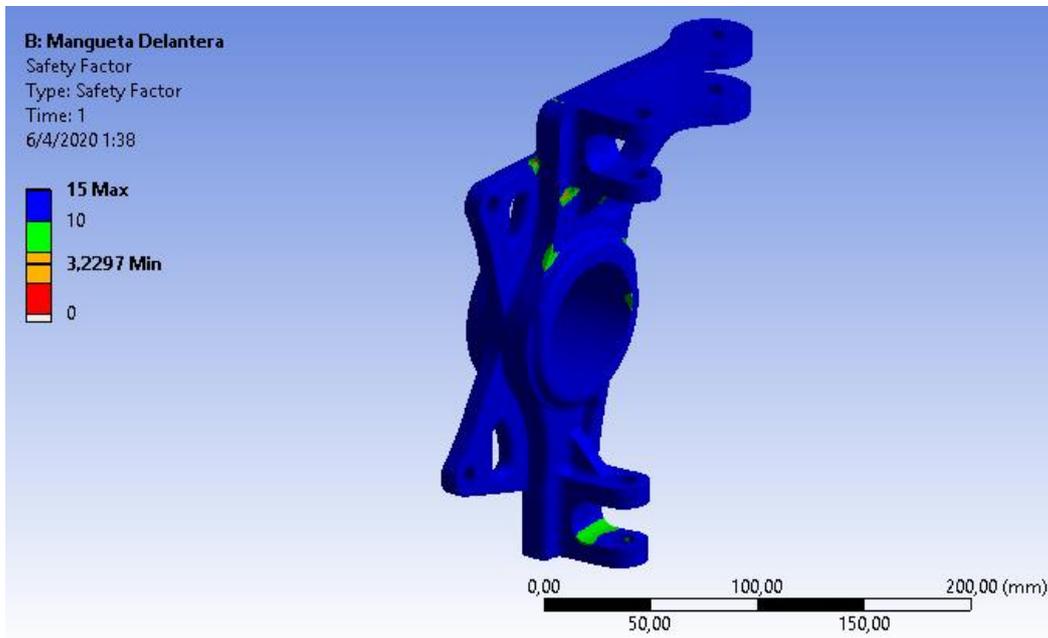


**Figura 38-3:** Análisis de Tensión de Equivalente de Von Mises

Fuente: Autores, 2020

### 3.5.2.3 Factor de seguridad

Al no superar el valor de límite resistencia a fatiga del del material y de acuerdo con la gráfica del esfuerzo equivalente de Von Mises, el factor de seguridad es de 3.22.



**Figura 39-3:** Factor de seguridad de la mangueta delantera

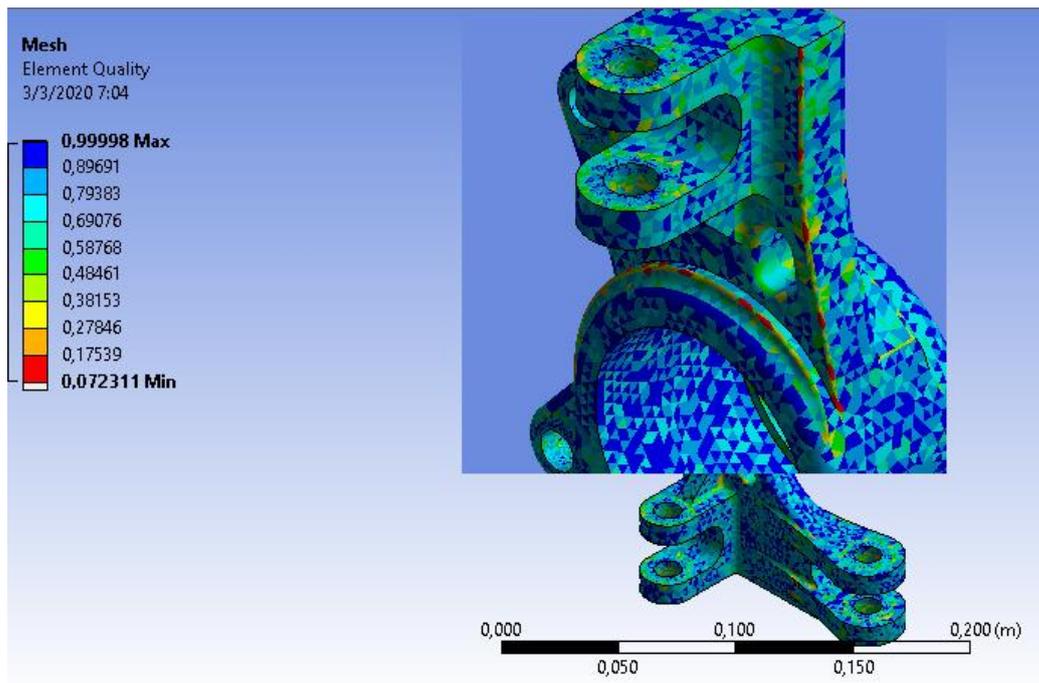
Fuente: Autores, 2020

### 3.5.3 Análisis de mangueta posterior

Para la mangueta posterior se aplica los mismos criterios de la mangueta delantera.

#### 3.5.3.1 Calidad de malla mangueta posterior

Con la opción *Element Quality*, que describe calidad de malla en color rojo las aristas del contorno superior de la geometría con un valor mínimo de 0.072311, defectos que igual manera son producidos por la acción del movimiento en el cuerpo de la mangueta.



**Figura 40-3:** Calidad de malla en los elementos de la geometría

Fuente: Autores, 2020

Aplicando la misma definición de *Mesh Metric* de la mangueta delantera, seleccionaremos la opción *Element Quality*, el cual indica un promedio de 0.79 ente (0 y1), valor que está dentro del rango aceptable para nuestro diseño de acuerdo con la figura 41-3.

**Orthogonal Quality mesh metrics spectrum**

Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

**Figura 41-3:** Recomendaciones de calidad de malla

Fuente: (Nagib 2018)

En la figura 42-3 se detalla los resultados de mallado al aplicar el control de calidad de malla con número de elementos 183372 y nodos 277224.

Details of "Mesh"		Details of "Mesh"	
[-] Display		+ Sizing	
Display Style	Element Quality	Quality	
[-] Defaults		Check Mesh Quality	Yes, Errors
Physics Preference	Mechanical	Error Limits	Standard Mechanical
Element Order	Program Controlled	<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)
<input type="checkbox"/> Element Size	Default	Smoothing	Medium
+ Sizing		Mesh Metric	Element Quality
+ Quality		<input type="checkbox"/> Min	7,2311e-002
+ Inflation		<input type="checkbox"/> Max	0,99998
+ Advanced		<input type="checkbox"/> Average	0,79287
[-] Statistics		<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,12991
<input type="checkbox"/> Nodes	277224		
<input type="checkbox"/> Elements	183372		

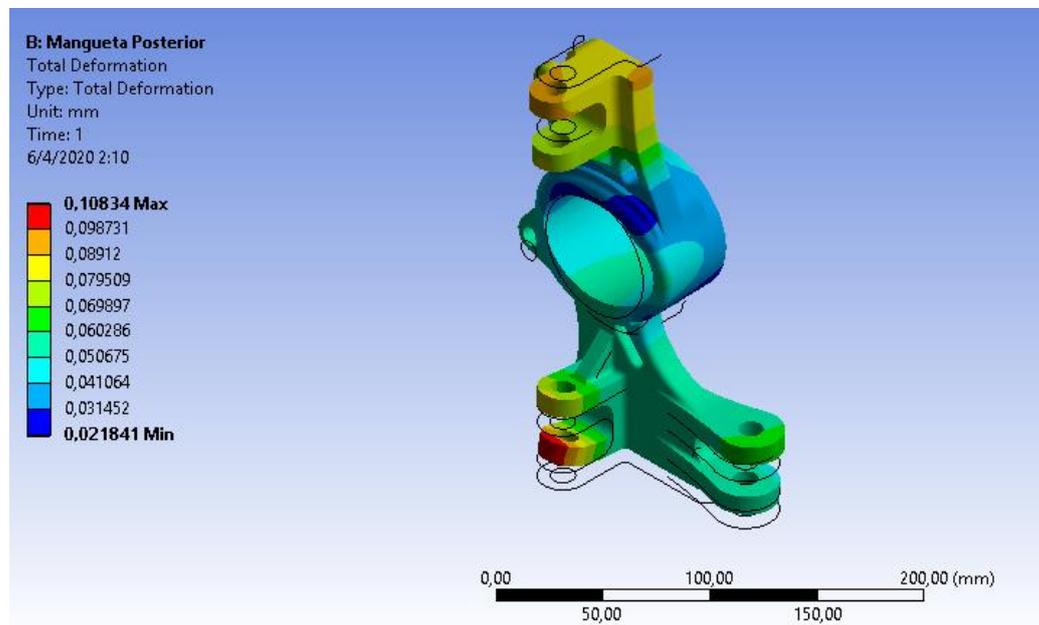
**Figura 42-3:** Número de nodos y elementos de la mangueta posterior

Fuente: Autores, 2020

### 3.5.4 *Análisis mediante elementos finitos modelo posterior*

#### 3.5.4.1 *Deformación total*

La deformación total que se produce en la mangueta posterior está en el soporte inferior de la suspensión con un valor de 0,10834 mm, deformación que se produce cuando el vehículo pasa sobre un obstáculo o bache que tiene la calzada.



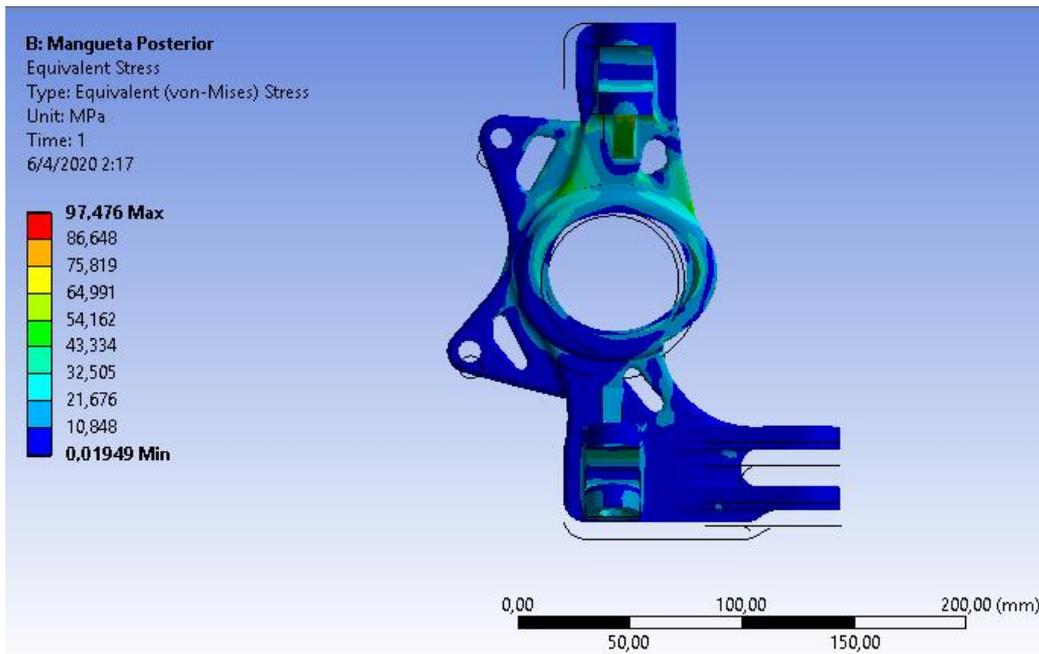
**Figura 43-3:** Deformación total en la mangueta posterior

Fuente: Autores, 2020

#### 3.5.4.2 *Tensión Von Mises*

La tensión máxima que se produce en el cuerpo de la mangueta es de 97.476 MPa, al igual que la mangueta delantera soporta ante las cargas y es inferior a la capacidad de resistencia a fatiga del

material. Tiene la misma concentración máxima está en la base de los soportes de la suspensión superior.

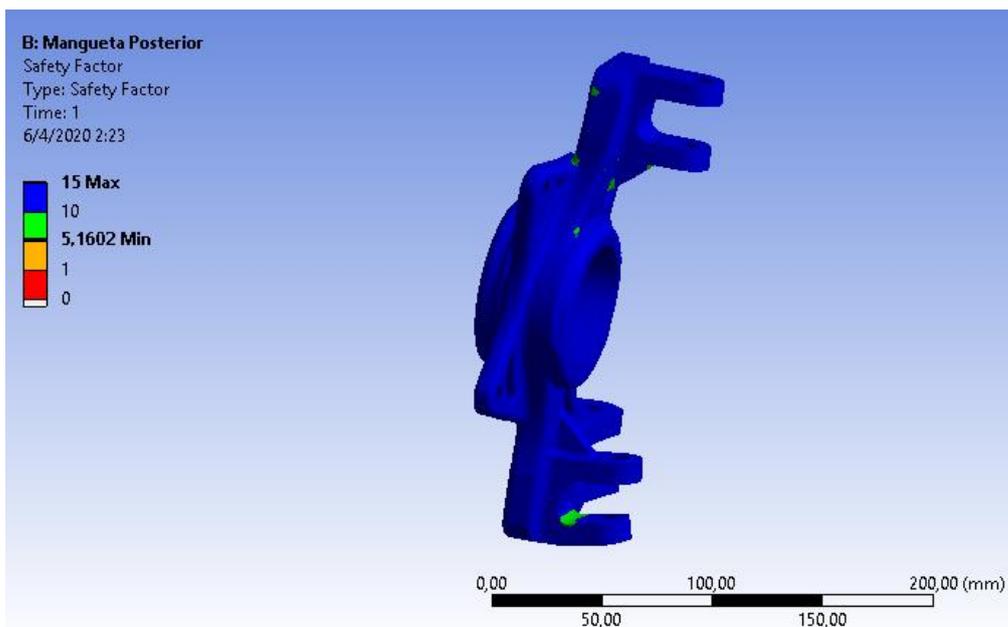


**Figura 44-3:** Tensión equivalente de Von Mises mangueta posterior

Fuente: Autores, 2020

### 3.5.4.3 Factor de seguridad

El factor de seguridad es de 5.16, valor que permite trabajar ante distintas condiciones de operación del vehículo.



**Figura 45-3:** Factor de seguridad mangueta posterior

Fuente: Autores, 2020

## 3.6 Construcción de las manguetas

La fase de construcción de las manguetas se empieza por el prototipado rápido, proceso que nos permite fabricar y verificar las dimensiones del diseño realizado en CAD.

### 3.6.1 Impresión 3D

Llamada también manufactura por adición, en donde para la fabricación de cualquier elemento se basa en un modelo digitalizado en un software tipo CAD como SolidWorks, posterior a esto para llegar al elemento físico donde ubica progresivamente material de filamento en pequeñas capas, hasta terminar la impresión.

Se puede fabricar desde piezas simples, hasta prototipos de alta gama como partes de aeronaves, autos además en el campo de la medicina se lo utiliza para realizar maquetas de los órganos humanos.

#### 3.6.1.1 Material "PLA" para la impresión 3D

En aplicaciones de fundición, ya no es necesario crear los modelos de un elemento en madera o hierro sino más bien podemos digitalizarlos e imprimir hasta los de difícil geometría para luego fundirlos y obtener el elemento deseado, economizando costos y tiempos.

#### 3.6.1.2 PLA (Acido Poliláctico)

Su presentación es un filamento envuelto en rollo, material que está hecho a base a recursos renovables como el almidón de maíz, lo que le convierte en un material ecológico; es ideal para impresiones 3D, fácil de conseguir, barato, y con él se obtienen productos fuertes y resistentes.



**Figura 46-3:** Filamento de PLA

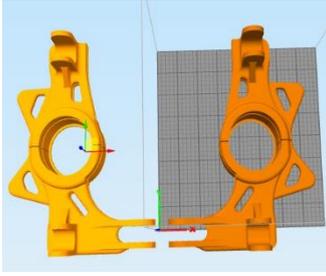
Fuente: (Trimaker 2016)

El PLA tiene propiedades importantes al ser un termoplástico, donde su rango de fusión esta entre los 95°C – 105°C su temperatura de autoignición es a partir de los 388°C y se descompone térmicamente a 250°C. (Trimaker, 2016)

### 3.6.2 Detalle de impresión

Mediante archivos guardados en extensión. *STL*, se establecen las condiciones de impresión en una computadora con software de aplicación 3D, como se muestra en la tabla 6-3.

**Tabla 6-3:** Configuración de impresión 3D de las manguetas

Elemento	Diseño	Material	Calidad	Tiempo (h)
Manguetas		50 m de filamento PLA de 1.75mm	70 % de densidad y rejilla como patron de relleno de	64 h

**Realizado por:** Autores, 2020

En la figura 47-3 se puede apreciar los modelos impresos en filamento de color rojo, esto fue necesario para hacer el montaje de las mismas, en el vehículo y verificar que las tolerancias de las piezas rediseñadas sean las exactas, y de esta forma descartar tolerancias erróneas en la piezas originales ahorrando costos y tiempos de producción, en el caso de que alguna tolerancia no fuera la correcta se modificaría en el software SolidWorks, y se volvería a imprimir hasta que sea la correcta, y una vez con las tolerancias correctas se manufacturaría las piezas originales.



**Figura 47-3:** Modelos impresos en filamento PLA

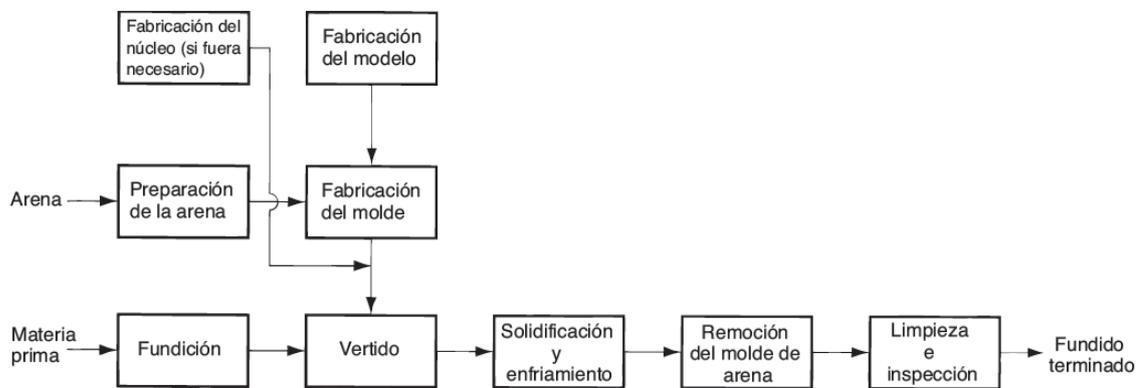
**Fuente:** Autores, 2020

### 3.6.3 Manufactura de las manguetas

Una vez obtenidas las impresiones respectivas de los modelos, y verificado que las tolerancias son correctas, su manufactura se lleva a cabo mediante el procedimiento que se describe a continuación:

#### 3.6.3.1 Proceso mediante fundición en arena

Unos de los métodos de manufactura tradicional es el proceso de fundición en arena (moldeo) que representa una ventaja a la hora de obtener piezas pequeñas, con este método se puede adquirir piezas de manera directa ya en su forma definitiva para tan solo dar un cierto acabado final. En el esquema del gráfico 3-3, describe los pasos de producción en fundición de arena.



**Gráfico 3-1:** Esquema de los pasos de producción en la fundición con arena.

Fuente:(Groover 2007, p. 216)

El proceso tiene comienzo con la fabricación del modelo, preparación de molde, seguido por la preparación de la arena para obtener el moldeo. Mientras que por otro lado, se funde el metal altas temperaturas en los hornos para posterior ser vertido por gravedad hasta la cavidad del molde a través de los canales de alimentación, y dejar que se solidifique a temperatura ambiente, finalmente la pieza es liberada del molde de arena, misma que presenta defectos de fundición, y para obtener una pieza de calidad es necesario realizar un acabado, mediante la utilización de herramientas como: amoladora, torno, taladro entre otros y con ello, alcanzar una buena calidad de la pieza fundida.

La fundición en arena no siempre es una técnica perfecta, ya que en su gran mayoría presentan limitaciones a la hora de obtener una pieza como:

- Porosidad
- Mal acabado superficial
- Tolerancias erróneas

### 3.6.3.2 Preparación de moldeo con arena

El moldeo con arena representa la mayor cantidad de fabricación de piezas utilizados en funciones de acero, bronce, hierro, aluminio y sus aleaciones.

Razón por lo que la arena de moldeo debe poseer un serie de cualidades como: (Nápoles y Salueña 2000, p. 81)

- Refractariedad: Debe resistir altas temperaturas ya que está en contacto con el metal fundido.
- Plasticidad: Se debe adaptar a la forma del modelo. Esto dependerá de la finura y calidad de sus granos, la cantidad de arcilla y la humedad de esta.
- Permeabilidad: Es la propiedad de dejar evacuar los gases de la colada a través suyo, muy importante para evitar los poros internos en las piezas. Depende del tamaño y regularidad de los granos de arena, la cantidad de arcilla, la intensidad de apisonado. Esta permeabilidad puede incrementarse realizando agujeros para salida de gases o secándolas.
- Cohesión: Deben conservar en todo momento la forma de la cavidad y tener cierta resistencia, por lo que se utilizan aditivos aglutinantes orgánicos, resinas fenólicas o resinas foránicas.

Expresado las cualidades de la arena de moldeo, se presenta el procedimiento de moldeo:

1. En este procedimiento se tiene una arena verde de tamaño de grano muy grueso el cual debe ser tratado para obtener un grano más fino, podemos observar en la figura 48-3, que la arena es carreada para el sitio de trabajo.



**Figura 48-3:** Selección de arena verde

**Fuente:** Autores, 2020

2. “En el caso de la arena verde esta contiene muy poca humedad y un decapante de negro mineral de entre un 2 a un 6%. Para el moldeo en verde del magnesio se mezcla con un 5-15% de azufre y un 5-20% de borax”(Nápoles y Salueña 2000, p. 82).

Como observamos en la figura 49-3, la arena verde es preparada para ser humedecida, un factor importante para el moldeo. La cantidad de agua afecta directamente en la arena modificando su resistencia y permeabilidad.



**Figura 49-3:** Humedecido de la arena

Fuente: Autores, 2020

Prueba de humedad en la arena:

- El procedimiento se inicia vertiendo poco a poco agua en la arena hasta que con nuestra mano apretando la arena, esta mantenga la forma sin partirse podremos decir que tiene la humedad indicada, en caso de llegarse a partir aún que falta humedecer la arena (procedimiento utilizado).
3. Para que la humedad sea uniforme por toda la arena es necesario mezclar como se muestra en la figura 50-3:



**Figura 50-3:** Mezcla de arena

**Fuente:** Autores, 2020

4. En el siguiente proceso se hace pasar la arena por un tamiz con el objetivo de obtener arena fina para el moldeo, ver figura 51-3:



**Figura 51-3:** Tamizado artesanal de la arena

**Fuente:** Autores, 2020

5. En la figura 52-3 observamos la arena ya lista para el moldeo:



**Figura 52-3:** Arena lista para moldeo

**Fuente:** Autores, 2020

### 3.6.3.3 Moldeo en arena verde.

1. En este procedimiento es necesario contar ya con las piezas impresas en 3D, con sus modificaciones respectivas teniendo en cuenta para su fundición, la figura 56-3 indica el montaje de las piezas dentro de la caja de moldeo, es necesario aplicar un separador como el talco industrial sobre las piezas para su posterior desmontaje:



**Figura 53-3:** Inicio de moldeo de las manguetas

Fuente: Autores, 2020

2. La figura 54-3 permite observar el recubrimiento de la pieza 3D con la arena en el molde:



**Figura 54-3:** Rumos de arena para cubrir los modelos

Fuente: Autores,2020

3. Observamos en la figura 55-3 el completo llenado de la arena sobre el molde para proceder a un correcto apisonado con el cual garantizamos que la arena tome la forma de la pieza 3D:



**Figura 55-3:** Apisonado final de arena

Fuente: Autores, 2020

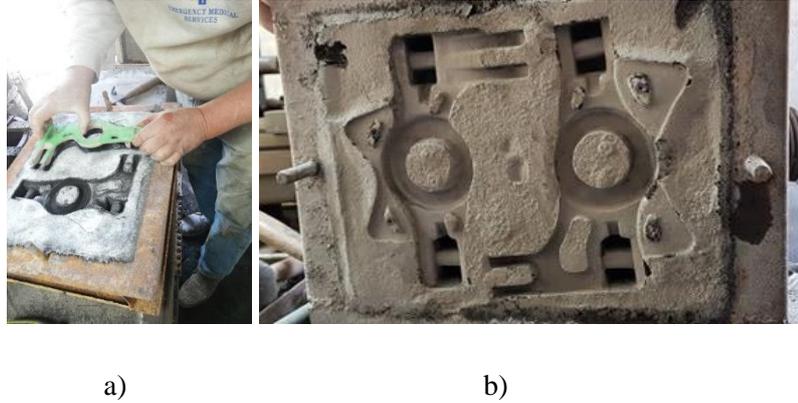
4. Este procedimiento se lo hace de la misma forma ya explicada para los machos de las piezas como se observa en la figura 56-3:



**Figura 56-3:** Machos finales para extraer modelos

Fuente: Autores, 2020

5. En este paso debemos ser muy cuidadosos al retirar la pieza 3D para evitar cualquier fractura en el molde como se muestra en la figura 57-3 (a) y obtener la cavidad moldeada con la forma de la misma figura 57-3 (b), donde será vertido el aluminio fundido.



**Figura 57-3:** Procedimiento final: a) Retiro de modelos base,  
b) Cavidad de modelos  
**Fuente:** Autores, 2020

6. Con un soplete se calientan los moldes con el objetivo de eliminar la humedad como se ve en la figura 58-3, y con ello contrarrestar defectos de fundición como: sopladuras, puntos de alfiler entre otras, cuando el aluminio sea vertido.



**Figura 58-3:** Secado de humedad  
**Fuente:** Autores, 2020

### 3.6.4 Fundición de las manguetas.

1. En este proceso es necesario calentar el crisol, al realizar esto estamos llevando a una temperatura de trabajo de alrededor de unos 800°C, adecuada para la fundición del aluminio, como se muestra en la figura 59-3:



**Figura 59-3:** Crisol

Fuente: Autores, 2020

2. En la figura 60-3 (a), observamos la fundición del alambre de aluminio con 99% de aluminio puro, éste se fundió a 910°C como indica la figura 60-3 (b), en este punto se introduce la aleación de otros metales como: Cromo (0,18-2) %, Cobre (1,2-2) %, Magnesio (2,1-2,9) %, Zinc (5,1-6,1) % y pequeños porcentajes de hierro, silicio, titanio y otros para adquirir la dureza necesaria.



a)

b)

**Figura 60-3:** Fundición de aluminio con su aleación

Fuente: Autores, 2020

3. Proceso de colado, en esta etapa es necesario realizar algunos cálculos para el colado del material en los moldes, por esta razón es necesario conocer los datos del diseño como se muestra en la tabla 7-3.

En la tabla 7-3 se muestra los valores de Volumen y Área de la pieza para realizar los cálculos de la cantidad necesaria del vertido de material.

**Tabla 7-3:** Datos del diseño de las manguetas en CAD.

Área Superficial de la Mangueta	78394.41 mm <sup>2</sup>
Volumen de la Mangueta	359515.48 mm <sup>3</sup>

Realizado por: Autores, 2020

Con estos datos podemos realizar el análisis siguiente:

#### 3.6.4.1 Cálculo de velocidad de vertido.

La velocidad requerida para verter un metal fundido en base del bebedero al molde se da por la siguiente formula presentados en el capítulo anterior:

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

$$V = \sqrt{(2) * (9.81) * (0.15)}$$

$$V = 1.71 \frac{m}{s}$$

#### 3.6.4.2 Determinación del Gasto Volumétrico.

Como dato importante para el cálculo del Gasto Volumétrico tomamos en consideración el diámetro del bebedero de 15mm.

$$Q = A * v \quad (2)$$

$$A = \frac{\pi * d^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi * 15^2}{4}$$

$$A = 176.7mm^2$$

$$Q = (1.767x10^{-4}) * (1.71)$$

$$Q = 3.0215x10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

### 3.6.4.3 Volumen mínimo de mazarota

Capacidad que debe de tener la mazarota para cubrir la contracción de la pieza.

$$V_{MIN MAZA} = V_{Pieza(partes gruesas)} * c * k$$

$$V_{MIN MAZA} = (35951.548) * (0.07) * (2)$$

$$V_{MIN MAZA} = 5033.217 \text{ cm}^3$$

### 3.6.4.4 Tiempo de llenado de la cavidad molde.

Se puede estimar el tiempo que se requiere para llenar la cavidad del molde, de volumen (V), mediante la siguiente formula:

$$T_{MF} = \frac{V}{Q}$$

$$T_{MF} = \frac{3.5951 \times 10^{-4}}{3.0215 \times 10^{-4}}$$

$$T_{MF} = 1.18 \text{ s}$$

El aluminio en estado líquido es vertido en el molde, posterior a esto se espera su solidificación total y por último son liberadas y mecanizadas hasta obtener piezas de calidad como se indica en la figura 61-3.



**Figura 61-3:** Manguetas finales para del F-SAE ESPOCH

**Fuente:** Autores, 2020

**Nota:** La mangueta fundida tiene una contracción en 0.7cm, respecto a la longitud total del modelo impreso.

### 3.7 Análisis de resultados

A través de la ingeniería inversa se puede obtener un nuevo prototipo de manguetas, al ir realizando paso a paso el procedimiento de diseño, optimización, simulación y fabricación; procesos que permiten alcanzar los objetivos planteados. En la siguiente tabla se presenta una comparación de peso entre la mangueta original y el nuevo prototipo de mangueta para el vehículo de la Fórmula SAE de la Carrera de Ingeniería Automotriz.

**Tabla 8-3:** Tabla comparativa de resultados finales

<b>Comparativa de peso de las manguetas del vehículo Fórmula SAE</b>			
<b>Modelo antiguo (A)</b>	<b>Peso (lb)</b>	<b>Nuevo modelo (N)</b>	<b>Peso (lb)</b>
Acero A36 	4.5 lb	Aluminio 7075 -T6 	2.40 lb
<b>Análisis de Deformaciones y Esfuerzos por elementos finitos</b>			
<b>Elemento (A)</b>	<b>Unidad</b>	<b>Elemento (N)</b>	<b>Unidad</b>
<b>Mangueta:</b> Deformación Total Esfuerzo de Von Mises	0.114 mm 104.45 MPa	<b>Mangueta Delantera:</b> Deformación Total Esfuerzo de Von Mises <b>Mangueta Posterior:</b> Deformación Total Esfuerzo de Von Mises	0.413 mm 155.74 MPa 0.108 mm 97.47 MPa

Realizado por: Autores, 2020

### 3.8 Fresado y armado de las manguetas.

#### 3.8.1 Fresado.

Con las manguetas ya listas se realiza un proceso de fresado en CNC para el rodamiento central, este proceso debe ser muy exacto de acuerdo con el diseño en CAD, como se muestra en la figura 62-3:



**Figura 62-3:** Fresado de manguetas

Fuente: Autores, 2020

#### 3.8.2 Prensado del rodamiento.

Una vez realizado el desbaste del agujero central en la máquina CNC, el siguiente paso es hacer uso de la prensa hidráulica de la figura 63-3, para insertar los rodamientos en cada una de las manguetas.



**Figura 63-1:** Prensado del rodamiento en las manguetas

Fuente: Autores, 2020

### 3.8.3 Armado de las manguetas

El ensamble no representa un exceso de complejidad ya que conserva los mismos puntos de anclaje de las manguetas antiguas.

#### 3.8.3.1 Armado de la mangueta delantera

Una vez insertado el conjunto del disco de freno con el eje de la manzana en el rodamiento, se procede a sujetar los pernos de sujeción con los brazos de suspensión y dirección, como se ve en la figura 64-3:

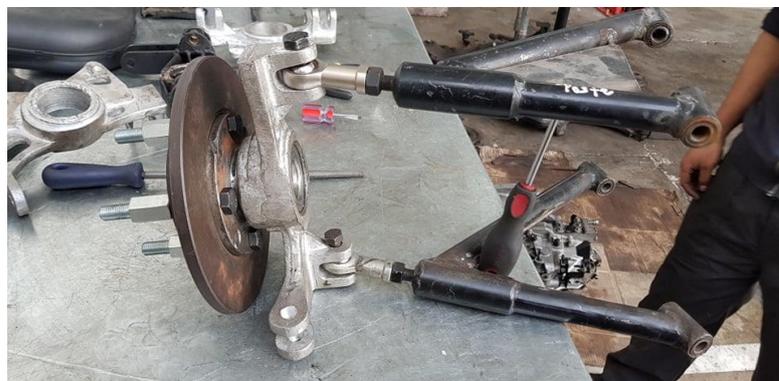


**Figura 64-3:** Armado mangueta delantera

Fuente: Auotres,2020

#### 3.8.3.2 Armando Mangueta Posterior

Para la mangueta posterior sigue el mismo procedimiento de mangueta delantera con la diferencia que se acopla a la junta homocinética, procedimiento que se observa en la figura 65-3:



**Figura 65-3:** Armado mangueta posterior

Fuente: Autores, 2020

## 4. GESTIÓN DEL PROYECTO

### 4.1 Cronograma.

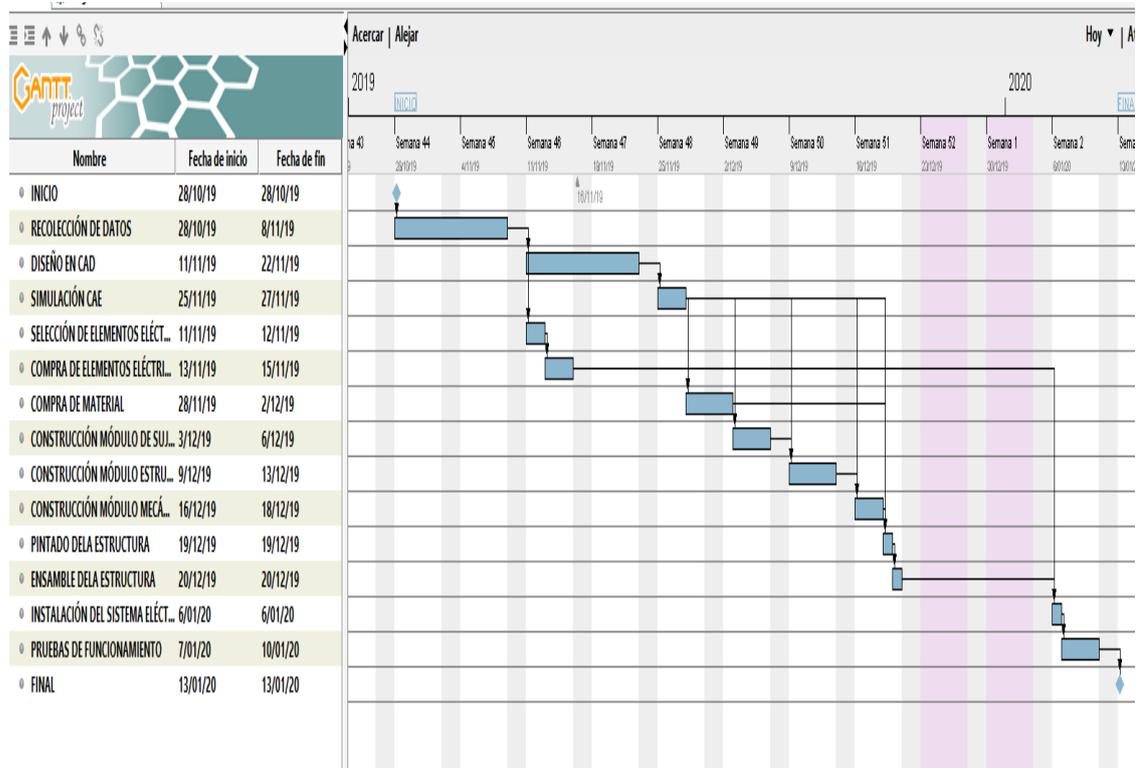


Figura 1-4: Cronograma de actividades desarrolladas en Grant Project

Fuente: Autores, 2020

### 4.2 Presupuesto.

Para el diseño y la construcción de las manguetas se utilizó diversos elementos que representaron gasto e influye en el presupuesto final, estos se detallaran a continuación:

#### 4.2.1 Material.

Para la fabricación de las manguetas se utilizó alambre de aluminio, material muy especial y escaso.

**Tabla 1-4: Costos Directos**

<b>COSTOS DIRECTOS</b>				
<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo Unitario (\$)</b>	<b>Costo Total (\$)</b>
Arena	3	qq	25	75
Impresión 3D	4	u	40	160
Alambre de aluminio	100	m	250	250
Fundición del Aluminio	4	u	200	800
Fundentes	2	u	50	100
Rodamientos	4	unidades	20	80
<b>Total</b>				<b>1465</b>

Realizado por: Autores, 2020

**4.2.2 Mano de Obra.**

Estos consto se debe al trabajo realizado por técnicos especializados en su rama.

**Tabla 2-4: Costo de mano de obra**

<b>COSTOS MANO DE OBRA</b>			
<b>Técnico</b>	<b>No. Horas</b>	<b>Costo Unitario (\$)</b>	<b>Costo Total (\$)</b>
Técnico en Fundición	84	1.6	135
Técnico Mecanizado	48	100	400
<b>Total</b>			<b>535</b>

Realizado por: Autores, 2020

**4.2.3 Costos Indirectos.**

Estos costos son los que no interviene directamente en el proyecto pero que si representa para el presupuesto final.

**Tabla 3-4: Costos indirectos**

<b>COSTOS INDIRECTOS</b>			
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario (\$)</b>	<b>Costo Total (\$)</b>
Transporte	2	50	100
Impresiones y copias	1	30	30
Imprevistos	1	40	40
Otros gastos	1	20	20
<b>Total</b>			<b>190</b>

Realizado por: Autores, 2020

#### 4.2.4 Costo total.

**Tabla 4-1:** Costo total

ITEM	TOTAL
Costos Directos	1465
Costos de Mano Obra	535
Costos Indirectos	190
<b>TOTAL</b>	<b>2190</b>

**Realizado por:** Autores, 2020

## CONCLUSIONES

Mediante la utilización de la ingeniería inversa de la mangueta original se procedió a su diseño en software CAD para llegar al diseño final de la nueva mangueta.

La utilización de nuevas herramientas como la optimización topología permitió la reducción del material excedente del diseño final de la mangueta obteniendo así el diseño listo para su construcción.

La fabricación de la mangueta se la realizo con la obtención del aluminio 7075 mediante la fundición, utilizando criterios técnicos y diversos fundentes que ayudo en gran parte a obtener una pieza con un acabado superficial bueno.

Es posible fabricar diversas piezas automotrices mediante este procedimiento, siempre y cuando exista un previo análisis costo-beneficio de la pieza a fabricar.

En la prueba de peso de las manguetas se observó una reducción considerable obteniendo así un peso para la mangueta delantera de 2.4 lb y para la posterior de 2.2 lb cumpliendo así el propósito de este proyecto.

## **RECOMENDACIONES**

Verificar en el diseño los diferentes parámetros a tomar en cuenta para la fundición como la contracción del metal al pasar de estado líquido a sólido y los ángulos de fundición.

Controlar los niveles de humedad en la arena ya que una excesiva humedad provocará que la arena no tome la forma de la pieza y se destruya al extraer de la are dicha pieza, lo mismo sucederá si la arena esta demasiada seca.

Obtener las herramientas necesarias para los acabados más pequeños en la arena ya que resulta dificultoso realizar reparaciones en la arena sin las herramientas necesarias.

Para fundiciones posteriores o trabajos que conlleve a este procedimiento se recomienda a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo dote de máquinas y herramientas al laboratorio de Fundición y Metalurgia para realizar estos trabajos.

Se recomienda controlar la temperatura de la colada con un pirómetro para evitar que el aluminio se llegue a quemar y verter con exactitud los fundentes.

## GLOSARIO

**Contracción:** Fenómeno de los metales al calentarse aumentan de tamaño y se reducen al enfriarse. Este fenómeno se conoce como dilatación y contracción, respectivamente (Groover 2007, p. 206).

**Fórmula SAE:** También conocida como Formula Student, es una competición entre estudiantes de universidades de todo el mundo que promueve la excelencia en ingeniería a través de una competición donde los miembros del equipo diseñan, construyen, desarrollan y compiten un vehículo monoplace (FÓRMULA SAE s.f.).

**Mangueta:** Es un elemento de la suspensión y dirección del automóvil. Se trata del elemento que contiene el cubo o vástago sobre el que gira la rueda, conectándola al mismo tiempo con los componentes de la suspensión y de la dirección (Mejía 2015).

**Manufactura por adición:** La fabricación aditiva, o fabricación por adición, es un nuevo concepto de producción a través del cual el material (plástico o metal) es depositado capa a capa de manera controlada allí donde es necesario (Bianchi et al. 2019).

**Resistencia:** Capacidad del molde para conservar su forma y resistir la erosión ocasionada por el flujo de un metal fundido; depende de la forma del grano, cualidades adhesivas del aglutinante, y otros factores (Groover 2007, p. 218).

**Optimización:** Hace referencia a la acción y efecto de optimizar. En términos generales, se refiere a la capacidad de hacer o resolver alguna cosa de la manera más eficiente posible y, en el mejor de los casos, utilizando la menor cantidad de recursos (Bianchi et al. 2019).

**Skidpad:** Área circular del pavimento plano usada para las varias pruebas del manejo de un coche. El uso más común del skidpad es la prueba de aceleración lateral (Reglamento Fórmula SAE 2020).

**Topología:** Es una práctica de ingeniería bien establecida que permite optimizar el diseño partiendo de un modelo existente, especialmente para maximizar o minimizar alguna característica deseada (Reddy K. et al. 2016).

## BIBLIOGRAFÍA

**ALBÁN ROJAS, Carlos Darío.** Diseño y construcción de un sistema de dirección para un vehículo tipo fórmula para la Escuela de Ingeniería Automotriz. [En línea] (Trabajo de Titulación). (Tesis de grado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2016 pp. 47-54 [Consulta: 2019-12-23]. Disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/5834/1/65T00194.pdf>.

**ARELLANO VILLACRES, Jean Carlos. & TADAY YUPANQUI, Edison Fernando.** 2016. Diseño y construcción de un sistema de suspensión para un vehículo tipo fórmula para la Escuela de Ingeniería Automotriz. [En línea] (Trabajo de Titulación). (Tesis de grado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2016 pp. 53-56, [Consulta: 2019-12-26]. Disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/6192/1/65T00215.pdf>.

**ASHBY, M.F. & JONES, D.R.H.,** *MATERIALES PARA INGENIERÍA 1: Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño.* [En línea]. Barcelona: Reverté, 2008, ISBN 978-84-291-7255-3. [Consulta: 2020-02-06] Disponible en: <https://www.academia.edu/19982819/Libro-de-ashby-en-espac3b1ol>.

**AUQUILLA OCAMPO, José Luis. & TORRES ROMERO, Cristhian Rigoberto.** 2016. Diseño del sistema de suspensión de un vehículo monoplace eléctrico Fórmula SAE. [En línea] (Trabajo de Titulación). (Tesis de grado) Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. 2016 [Consulta: 2019-12-24]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12131/1/UPS-CT006052.pdf>

**BIANCHI, Matteo, GOVERNI, Lapo, MARZOLA, Antonio et al.** "Enfoque De Ingeniería Asistida Por Ordenador (Cae) Para La Optimización Topológica De La Estructura Soporte Para Un Exoesqueleto De Mano". 2019 *DYNA*, vol. 94, no. 2, pp. 140-144. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8913>

**BUDYNAS, R.G. & NISBETT, J.K.,** 2012. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley.* Novena Edición. Mexico: MCGRAW-HILL. ISBN 978-607-15-0771-6.

**CASTRO GRAZIANO, Daniel de.** Modelo de suspensión de vehículo monoplace mediante ADAMS/CAR. Propuesta de mejoras. [En línea]. (Trabajo de Titulación). (Tesis de grado) Universidad de Madrid, E.T.S.I. Industriales. 2017, p. 21. [Consulta: 2019-12-24]. Disponible en: <http://oa.upm.es/49171/>.

**CEP, E.,** 2010. *Manual de Conductores Mecánicos. Formación para el Empleo*. S.l.: EDITORIAL CEP. ISBN 978-84-681-8487-6.

**CEPEDA Paredes, Cristian Ricardo & TUPIZA Quimbiulco, Christian Alexander.** Rediseño de las manguetas posteriores del vehículo prototipo para competencia en fórmula SAE. [En línea] (Trabajo de Titulación). (Tesis de grado), Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Carrera de Ingeniería Automotriz. Latacunga, Ecuador. 2018 [Consulta: 2019-11-27]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/14951/1/T-ESPEL-MAI-0633.pdf>.

**FORMULA SAE,** s.f. *FORMULA SAE* [En línea]. [Consulta: 27 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.fsaeonline.com/>.

**FRANCO, E.,** 2015. Optimización topológica aplicada al diseño de componentes estructurales mecánicos de peso reducido. *Revista el hombre y la máquina*, vol. 46, pp. 71-78.

**GARCÍA VELAZCO, Calixto.,** Momento de inercia y resistencia a la rodadura. *Informativa* [En línea]. 2005 [Consulta: 2020-02-06]. Disponible en: <https://www.zonagravedad.com/modules.php?name=News&file=article&sid=744>.

**GRANELL, Ignacio.** Diseño y fabricación de las manguetas del vehículo Formula SAE ICAI. [En línea] (Trabajo de Titulación). (Tesis de grado) Universidad Pontificia Comillas, Escuela (Técnica Superior de Ingeniería ICAI). Madrid, España. 2018 [Consulta: 2020-01-14]. Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/22723>.

**GROOVER, M.P.,** *Fundamentos de manufactura moderna* [En línea]. Tercera. Mexico: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. 2007. [Consulta: 2020-04-01]. ISBN 978-970-10-6240-1. Disponible en: [https://www.academia.edu/33002366/Fundamentos\\_de\\_manufactura\\_moderna\\_3edi\\_Groover](https://www.academia.edu/33002366/Fundamentos_de_manufactura_moderna_3edi_Groover).

**GUIZADO CHÁVEZ, Manuel Mesías & PÉREZ PILCO, Diego Paúl.** Diseño y construcción del sistema de frenos de un vehículo de competencia fórmula “SAE”, para la carrera de Ingeniería Automotriz-ESPOCH. [En línea]. (Trabajo de Titulación). (Tesis de grado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. 2016. p. 52 [Consulta: 2020-03-02]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/5931/1/65T00207.pdf>.

**HIBBELER, R.C.,** 2010. *Ingeniería mecánica - Dinámica*. 12. México: Pearson Educación. ISBN 978-607-442-560-4.

**VILLENA IZURIETA, Nadia Priscila, N.P.V.**, 2015. El Ecuador y el proceso de cambio de la matriz productiva: consideraciones para el desarrollo y equilibrio de la balanza comercial. Observatorio de la Economía Latinoamericana [en línea], no. 207. [Consulta: 31 julio 2020]. Disponible en: <https://ideas.repec.org/a/erv/observ/y2015i20717.html>.

**JÁCOME GONZÁLEZ, Guillermo Arturo & MIRANDA VELASCO, Santiago David**, Rediseño de las manguetas delanteras del vehículo prototipo para competencia en la fórmula SAE. [En línea] (Trabajo de Titulación). (Tesis de grado) Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Carrera de Ingeniería Automotriz 2018. [Consulta: 2019-11-27]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/13963/1/T-ESPEL-MAI-0613.pdf>.

**JAZAR, R.N.**, 2008. *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. New York: Springer. ISBN 978-0-387-74242-4.

**KALPAKJIAN, S. y SCHMID, S.R.**, *Manufactura, ingeniería y tecnología* [En línea]. 2002. Primera Edición. S.l.: Pearson Educación. ISBN 978-970-26-0137-1. Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?id=gilYI9\\_KKAoC&printsec=frontcover&hl=es&source=gs\\_b\\_sge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=gilYI9_KKAoC&printsec=frontcover&hl=es&source=gs_b_sge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false).

**MARÍN GARRIDO, Alejandro**. Diseño y cálculo del sistema de frenado para un monoplaza "Formula Student". [En línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de grado) Universitat Politècnica de Valencia, 2018. [Consulta: 2019-12-28]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/107166/MAR%20c3%8dN%20-%20DISE%20c3%91O%20Y%20C%20c3%81LCULO%20DEL%20SISTEMA%20DE%20FRENA%20DO%20PARA%20UN%20MONOPLAZA%20FORMULA%20STUDENT.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

**MARTÍNEZ CASTAÑEDA, José**. ¿Qué es la Fórmula Student? | Pistonudos. [En línea]. 2016. [Consulta: 2019-11-29]. Disponible en: <https://www.pistonudos.com/reportajes/que-es-la-formula-student/>.

**MATWEB**, MatWeb, su fuente de información sobre materiales. [En línea]. 2020. [Consulta: 2020-02-07]. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4f19a42be94546b686bbf43f79c51b7d&ckck=1>.

**MEDINA TOLEDO, Wilson Paúl & MOROCHO SALINAS, Jonatan Fabricio**. Diseño y construcción de manguetas y cubos de rueda de un vehículo de competencia formula SAE eléctrico. [En línea] (Trabajo de Titulación). (Tesis de grado) Universidad Politécnica Salesiana,

Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz. Cuenca, Ecuador. 2017. [Consulta: 2019-12-17]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15056/1/UPS-CT007433.pdf>

**MEJÍA GONZÁLEZ, David Santiago.** Diseño de manguetas delanteras y posteriores de un vehículo monoplace para la competición en la formula SAE. [En línea] (Trabajo de Titulación). (Tesis de grado) Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz. Cuenca, Ecuador 2015. [Consulta: 2019-12-17]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7547/1/UPS-CT004482.pdf>.

**MENA MENA, Euro Rodrigo.,** Optimización Estructural Topológica de las Manguetas Delanteras para un Vehículo Prototipo Formula Student Mediante El Análisis De Elementos Finitos. [en línea] (Trabajo de Titulación). (Maestría) Universidad Internacional SEK 2017 [Consulta: 2019-12-24]. Disponible en: <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2678/1/Optimizaci%3fb3n%20de%20la%20mangueta.pdf>.

**MILLIKEN, W.F. y MILLIKEN, D.L.,** 1995. *RACE CAR VEHICLE DYNAMIC*. Segunda impresión. Warrendale, PA 1596-0001 U.S.A.: Society of Automotive Engineers, Inc. ISBN 1-56091-526-9.

**MIRLISENNA, Giuseppe.,** Método de los elementos finitos: ¿qué es? [En línea]. 2016. [Consulta: 2020-02-06]. Disponible en: <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>.

**NAGIB ELMEKAWY, Ahmed.,** *Introduction to ANSYS Meshing* [En línea]. 2018. S.l.: ALEXANDRIA UNIVERSITY. Disponible en: [http://drahmednagib.com/CAD\\_2018/Lecture\\_3\\_Meshing\\_2.pdf](http://drahmednagib.com/CAD_2018/Lecture_3_Meshing_2.pdf).

**NÁPOLES ALBERRO, Amelia. & SALUEÑA BERNA, Xavier.,** *Tecnologia-Mecanica* [En línea]. Primera. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL. 2000. [Consulta: 2020-04-09]. ISBN 84-8301-449-1. Disponible en: <https://www.academia.edu/8651338/20194374-Tecnologia-Mecanica>.

**NARANJO VARGAS, Andrés Francisco & SANUNGA TENENUELA, Milton Alejandro.** Rediseño de un chasis y puesta a punto de un vehículo fórmula SAE de la carrera de Ingeniería Automotriz de la ESPOCH. [en línea] (Trabajo de Titulación). (Tesis de grado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador., 2018. [Consulta: 2020-02-06]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/9956/1/65T00283.pdf>.

**PALACIOS GALLEGOS, Juan Carlos & SANGOPANTA BONETE, Lenin Paúl.** Rediseño de la suspensión delantera del vehículo prototipo para competencia en la fórmula SAE. [En línea] (Trabajo de Titulación). (Tesis de grado) Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. Latacunga, Ecuador. 2018. [Consulta: 2019-12-17]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/14150>.

**PARERA, A.M.,** 1993. *Frenos ABS*. S.l.: Marcombo. ISBN 978-84-267-0915-8.

**PÉREZ GONZÁLEZ, A.,** Método de los elementos finitos. [En línea]. 2014. [Consulta: 2020-01-06]. Disponible en: [http://www.mecapedia.uji.es/metodo\\_de\\_los\\_elementos\\_finitos.htm](http://www.mecapedia.uji.es/metodo_de_los_elementos_finitos.htm).

**RAC ESCUELA DE PILOTOS S.A.S.,** Relación mecánica entre transferencia de carga y coeficiente de adherencia. *Transferencias de cargas* [En línea]. 2019 [Consulta: 2020-02-05]. Disponible en: <https://www.jbianchirac.com.ar/index.php/escuela-de-pilotos/informacion-tecnica/transferencias-de-cargas>.

**REDDY K., S.N., MARANAN, V., SIMPSON, T.W., PALMER, T. y DICKMAN, C.J.,** 2016. Application of Topology Optimization and Design for Additive Manufacturing Guidelines on an Automotive Component. *ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* [En línea]. S.l.: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, [Consulta: 2019-12-17]. DOI 10.1115/DETC2016-59719. Disponible en: <https://asmedigitalcollection.asme.org/IDETC-CIE/proceedings/IDETC-CIE2016/50107/V02AT03A030/258430>.

**REESE, S.,** ¿Es exagerado el énfasis en el diseño generativo? Estos ejemplos podrían justificarlo. *Redshift ES* [En línea]. 2019 [Consulta: 2019-11-27]. Disponible en: <https://www.autodesk.es/redshift/ejemplos-diseno-generativo/>.

**REGLAMENTO FORMULA SAE, 2020.** *Formula SAE Rules 2020* [En línea]. 2020. S.l.: SAE Internaitonal. Disponible en: <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>.

**REMACHE, Á., LEGUISAMO, J. y TAMAYO, E.,** 2019. Topological analysis using the Finite Element Method of the chassis of a competition motorcycle. *Enfoque UTE*, vol. 10, no. 3, pp. 81-97. ISSN 1390-6542. DOI 10.29019/enfoque.v10n3.454.

**REYES JIMÉNEZ, David Adolfo.** Diseño de las manguetas delanteras y posteriores para un vehículo Formula SAE mediante técnicas de optimización estructural y manufactura con CNC. [En línea] (Trabajo de Titulación). (Maestría) Universidad del Azuay, Departamento de

Posgrados. Cuenca, Ecuador.2016 [Consulta: 2019-11-27]. Disponible en: <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/6486/1/12625.pdf>.

**SAE, Iternational.** Student Events - Events - Collegiate Design Series. [En línea]. 2019 [Consulta: 2019-11-27]. Disponible en: <https://www.sae.org/attend/student-events>.

**SEWARD, D.,** 2014. *Race Car Design*. S.l.: Macmillan International Higher Education. ISBN 978-1-137-03015-3.

**TRIMAKER, PLA y ABS:** ¿Qué filamento elegir en Impresión 3D por FDM? *Trimaker* [En línea]. 2016. [Consulta: 2020-04-07]. Disponible en: <https://trimaker.com/pla-y-abs-que-filamento-elegir-en-impresion-3d-por-fdm/>.

**UARAC P, P., CENDOYA H, P. y SANHUEZA O, J.P.,** 2015. Optimización topológica bidireccional con esquema de penalización de material y restricciones de desplazamiento. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 23, no. 1, pp. 75-84. ISSN 0718-3305. DOI 10.4067/S0718-33052015000100009.

**UPMRACING, Formula Student Germany.** *UPMRacing* [En línea]. 2015. [Consulta: 2020-04-01]. Disponible en: <http://www.upmracing.es/8974/formula-student-germany-2015>.

**VETTURAZZI, Rafael.** Optimización Topológica: Cómo reducir sus costes con materia prima y superar más rápidamente la crisis. *ESSS* [En línea]. 2017. [Consulta: 2019-11-27]. Disponible en: <https://www.esss.co/es/blog/optimizacion-topologica-como-reducir-sus-costes-con-materia-prima-y-superar-mas-rapidamente-la-crisis/>.

