

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Optimización estructural topológica de las manguetas delanteras para un vehículo prototipo Formula Student mediante el análisis de elementos finitos

Ing. Euro Rodrigo Mena Mena

Universidad Internacional SEK

Nota de Autor

Ing. Euro Rodrigo Mena Mena , Maestría en DISEÑO MECÁNICO, Universidad Internacional SEK; Director Ing. Antonio Edilberto Llanes Cedeño, PhD.

Codirector Ing. Juan Carlos Rocha Hoyos.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:
emena.mdm@uisek.edu.ec

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Declaración Juramentada

Yo, Euro Rodrigo Mena Mena, con cédula de identidad 1712681046, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Euro Rodrigo Mena Mena

CI: 1712681046

ÍNDICE DE CONTENIDO

Introducción	13
Justificación	14
Topología de optimización	17
Manguetas	20
Materiales.....	24
Clasificación de los metales y aleaciones.	30
Método por elementos finitos.	31
Control numérico computarizado	31
Trabajos realizados sobre manguetas	33
Método	35
Tipo de investigación.....	35
Métodos empírico – analítico	36
Metodología	37
Proceso de optimización	37
Medios	48
Instrumentos.....	49
Resultados	50
Proceso de mecanizado por software.....	64
Desbaste	65

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Proceso de mecanizado por máquina CNC.....	68
Análisis de los Resultados	74
Conclusiones.....	81
Recomendaciones	81
Bibliografía	82
Anexo 1. Encuesta	84
Anexo 2. Encuestas llenas	85
Anexo 3. Datos del rodamiento	87
Anexo 5. Plano de la mangueta	88
Anexo 6. Parte del código G para la fabricación de la mangueta.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Datos del aluminio 7075 T6.</i>	41
Tabla 2. <i>Fuerzas que afectan a la mangueta delantera.</i>	45
Tabla 3. <i>Procesos del mecanizado y velocidades.</i>	64
Tabla 4. <i>Comparación de las manguetas.</i>	74
Tabla 5. <i>Comparación de las manguetas inicial y propuesta.</i>	75

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Masas no suspendidas en un vehículo.	13
<i>Figura 2.</i> Optimización de una mangueta mediante <i>software Inventor</i>	21
<i>Figura 3.</i> Análisis de una mangueta mediante <i>software Inventor</i>	22
<i>Figura 4.</i> Cargas aplicadas sobre la mangueta	24
<i>Figura 5.</i> Diagrama esfuerzo – deformación unitaria para el acero.	25
<i>Figura 6.</i> Diagrama esfuerzo – deformación unitaria para el aluminio.....	26
<i>Figura 7.</i> CAD de la mangueta en <i>Inventor</i>	38
<i>Figura 8.</i> Selección del generador de forma.....	39
<i>Figura 9.</i> Activación del generador de forma en <i>Inventor</i>	39
<i>Figura 10.</i> Ventana del generador de forma.....	40
<i>Figura 11.</i> Activación del icono para asignar material al componente.	40
<i>Figura 12.</i> Asignación de material	41
<i>Figura 13.</i> Activación del conservador de regiones.	42
<i>Figura 14.</i> Selección y asignación de la región a conservar	43
<i>Figura 15.</i> Mangueta con regiones protegidas	43
<i>Figura 16.</i> Activación del bloqueador de movimiento.....	44
<i>Figura 17.</i> Restricción de la mangueta.....	44
<i>Figura 18.</i> Activación de las fuerzas en la mangueta.....	45
<i>Figura 19.</i> Fuerzas aplicadas al CAD.....	46
<i>Figura 20.</i> Activación del mallado.....	46
<i>Figura 21.</i> Mallado aplicado al componente.....	47
<i>Figura 22.</i> Configuración del generador de forma.....	47
<i>Figura 23.</i> Activación del generador de forma.....	48
<i>Figura 24.</i> Mangueta optimizada con el software a 50, 60 Y 70%.	50

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE MANGUETAS

<i>Figura 25.</i> Visualización del CAD y la forma optimizada.....	50
<i>Figura 26.</i> Cambio del estilo de visualización a sombreado con aristas.....	51
<i>Figura 27.</i> Activado el boceto para redibujar el CAD.	51
<i>Figura 28.</i> Boceto realizado	52
<i>Figura 29.</i> Mangueta optimizada por el software.....	52
<i>Figura 30.</i> Mangueta optimizada con ayuda del software.....	53
<i>Figura 31.</i> Activación de análisis de tensión.....	53
<i>Figura 32.</i> Activación del simulador de tensiones.	54
<i>Figura 33.</i> Visualización del valor de Von Mises.....	54
<i>Figura 34.</i> Visualización del desplazamiento.....	55
<i>Figura 35.</i> Visualización del coeficiente de seguridad.....	55
<i>Figura 36.</i> Visualización del nuevo CAD.	56
<i>Figura 37.</i> Valores de tensiones con CAD modificado.....	56
<i>Figura 38.</i> Valores de desplazamiento con CAD modificado.....	57
<i>Figura 39.</i> Valores de coeficiente de seguridad con CAD modificado.....	57
<i>Figura 40.</i> Incorporación del nervio al CAD en la zona afectada.	58
<i>Figura 41.</i> Tensiones con la incorporación del nervio al CAD.....	58
<i>Figura 42.</i> Desplazamiento con la incorporación del nervio al CAD.	59
<i>Figura 43.</i> Coeficiente de seguridad con la incorporación del nervio al CAD.	59
<i>Figura 44.</i> CAD en acero.	60
<i>Figura 45.</i> Desplazamiento de tensión de la mangueta de acero.....	60
<i>Figura 46.</i> Análisis de desplazamiento de la mangueta de acero.	61
<i>Figura 47.</i> Análisis del coeficiente de seguridad de la mangueta de acero.....	61
<i>Figura 48.</i> Tensión de Von Mises aplicando fuerza de giro.	62
<i>Figura 49.</i> Desplazamiento aplicando fuerza de giro.....	63

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

<i>Figura 50.</i> Coeficiente de seguridad aplicando fuerza de giro.....	63
<i>Figura 51</i> Bloque de aluminio a desbastar.	65
<i>Figura 52.</i> Desbaste de la mangueta.....	66
<i>Figura 53.</i> Mecanizado de la parte delantera de la mangueta.	66
<i>Figura 54.</i> Mangueta en la fase de terminado.	67
<i>Figura 55.</i> Fresadora vertical de tres ejes.....	68
<i>Figura 56.</i> Proceso de alivianado de la mangueta.	69
<i>Figura 57.</i> Pesaje de la mangueta con rodamiento.....	69
<i>Figura 58.</i> Verificación del anclaje superior de la suspensión.....	70
<i>Figura 59.</i> Verificación del anclaje inferior de la suspensión.....	70
<i>Figura 60.</i> Verificación del anclaje de las mordazas de freno.	71
<i>Figura 61.</i> Instalación de la manzana y adaptador.	71
<i>Figura 62.</i> Instalación del disco de freno al adaptador.....	72
<i>Figura 63.</i> Instalación de la manzana a la mangueta.....	72
<i>Figura 64.</i> Instalación de la mangueta.....	73
<i>Figura 65.</i> Instalación de la rueda.	73
<i>Figura 66.</i> Factibilidad de mecanizar en una máquina CNC.	76
<i>Figura 67.</i> Tipo de fresadora para mecanizar.....	76
<i>Figura 68.</i> Tipo de fresadora para mecanizar.....	77
<i>Figura 69.</i> Facilidad de montaje de la mangueta.....	78
<i>Figura 70.</i> Posibilidad de construir la mangueta.....	78
<i>Figura 71.</i> Pesaje de la mangueta de acero.	79
<i>Figura 72.</i> Mangueta de acero.....	79
<i>Figura 73.</i> Manguetas de acero y aluminio.	80

DEDICACIÓN

Dedico esta tesis a mis padres, quienes me formaron con buenos sentimientos, hábitos y valores.

A mi esposa e hijas, porque me brindaron su apoyo incondicional y son mi aliento para continuar en la vocación de enseñar y todo lo que conlleva esta hermosa profesión.

A la familia porque siempre están pendiente de mis acciones y apoyándome en la formación de mis hijas.

Euro Rodrigo

AGRADECIMIENTO.

Agradezco a los maestros de la Universidad por potenciar mis habilidades y destrezas, especialmente a los señores ingenieros Roberto Beltrán, Edilberto LLanes, Yoandrys Morales y Juan Rocha por su amistad; a los compañeros por compartir sus conocimientos y grandes momentos de camaradería; al grupo de estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga que trabajan conmigo por un gran sueño, que muy pronto será una realidad, obtener un vehículo de excelentes prestaciones mecánicas.

Mi agradecimiento a mis compañeros de trabajo que me apoyaron cuando solicite su ayuda. Finalmente deseo agradecer a mi hermosa esposa Nancy, a ti por dedicarles el cariño que no pude ofrecer a mis hijas Stephany, Mishell y Shirley en mis tiempos de estudio y a ellas también mil gracia por su comprensión, al igual que a mis padres, hermanos y mi tía, por no haberles visitado durante esta jornada de estudios.

Euro Rodrigo

RESUMEN

El exceso de peso en un vehículo se refleja en el mayor consumo de combustible y dificultad en la maniobrabilidad. Por tal motivo, la presente investigación tiene como objetivo optimizar estructuralmente las manguetas delanteras de un vehículo prototipo *Formula Student* mediante un *software* CAD para la disminución de las masas no suspendidas. Para conseguir esto se realizó una revisión bibliográfica que permitió identificar las magnitudes de las fuerzas que actúan sobre la mangueta; se optimizó mediante la utilización de una herramienta CAD como el Inventor 2017, aplicando acero A36 y aluminio 7075 T6 como propuestas de materiales para su posterior valoración y selección; la propuesta del *software* fue analizada para reducir las zonas de riesgo de deformación o ruptura y que sea mecanizable mediante máquinas CNC. La validación se realizó mediante encuestas a los coordinadores de los equipos nacionales que compitieron en eventos *Formula Student*, sobre la factibilidad de manufactura en una fresadora de control numérico computarizado y la facilidad de montaje. Para confirmar las afirmaciones de los expertos nacionales en esta área se realizó la simulación del mecanizado en el *software* NX, donde se evidencia la factibilidad del mecanizado. En la parte del método se utilizó la metodología de usabilidad para el cumplimiento del objetivo propuesto en todas las etapas, teniendo como resultado una mangueta maquinada en una fresadora CNC de tres ejes, utilizando como material aluminio 7075 T6, con este material la reducción de peso es del 61,14 % y un coeficiente de seguridad de 218,5% superior con relación al componente si se fabricara en acero.

Palabras Claves: Optimización vehicular, mangueta, vehículo prototipo, elementos finitos.

ABSTRACT

Excess weight in a vehicle is reflected in increased fuel consumption and difficulty in maneuverability. For this reason, the present research aims to structurally optimize the front upright of a prototype Formula Student vehicle using CAD software for the reduction of non-suspended masses. To achieve this, a bibliographic review was carried out to identify the magnitudes of the forces acting on the upright; Was optimized by using a CAD tool such as Inventor 2017, applying A36 steel and 7075 T6 aluminum as material proposals for further evaluation and selection; The software proposal was analyzed to reduce areas of risk of deformation or rupture and that is machinable by CNC machines. The validation was done through surveys of the coordinators of the national teams that competed in Formula Student events, on the feasibility of manufacturing in a numerical control computerized milling machine and the ease of assembly. In order to confirm the assertions of the national experts in this area, the machining simulation was performed in the NX software, where the feasibility of the machining is evidenced. In the part of the method, the usability methodology was used for the accomplishment of the proposed objective in all the stages, resulting in an upright machined in a three axis CNC milling machine, using as material aluminum 7075 T6, with this material the reduction of weight is 61.14% and a safety factor of 218.5% higher than the component if it is made of steel.

Keywords: Vehicle optimization, mangueta, prototype vehicle, finite elements.

Introducción

El exceso de peso en un vehículo se refleja en el mayor consumo de combustible y dificultad en la maniobrabilidad. Cuando se trata de masas suspendidas, significaría reducción del rendimiento de la suspensión, por no permanecer en constante contacto el neumático con la calzada; el sistema de impulsión y carrocería suma al peso total del vehículo, perjudicando al rendimiento peso potencia.

El objetivo principal de un sistema de suspensión es mantener de forma óptima el contacto del vehículo sobre el suelo a través de los neumáticos; soportar las fuerzas longitudinales, verticales y laterales, en aceleración y frenado, bajo las peores condiciones, como sería en curvas e irregularidades de la calzada.

Cuando se habla de suspensiones, existe un concepto muy importante que es masa no suspendida y suspendida. La primera la constituyen la llanta, los discos de frenos, mordazas, manguetas, manzana, tirantes de la suspensión, etc. Mientras que la masa suspendida lo constituye el resto del vehículo (Figura 1).

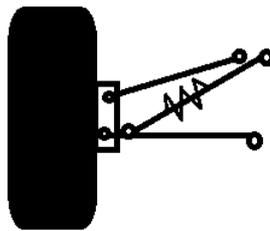


Figura 1. Masas no suspendidas en un vehículo.

Fuente: Autor

Es primordial disminuir las masas no suspendidas del vehículo para mejorar la aceleración, frenado, maniobrabilidad, comodidad y disminuir el consumo de combustible.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

La investigación tiene como objetivo general, optimizar la estructura de las manguetas delanteras de un vehículo prototipo *Formula Student* mediante *software* CAD para la disminución de las masas no suspendidas.

Para lograr el objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos: identificar las magnitudes de las fuerzas que actúan sobre las manguetas mediante revisión bibliográfica para la optimización del componente, proponer un diseño optimizado de la mangueta mediante la aplicación de un *software* CAD para su posterior análisis utilizando dos materiales metálicos, seguidamente evaluar la manufacturabilidad mediante la aplicación de encuestas a los coordinadores de los equipos nacionales de *Formula Student* y modelación en sistema CAD. Finalmente evaluar la mangueta mecanizada mediante su instalación en el equipo *Formula Student* para la validación de los resultados.

Formulación de hipótesis

El análisis topológico de la mangueta delantera de vehículo *Formula Student* mediante la aplicación de los elementos finitos, permitirá optimizar el diseño reduciéndose el peso con respecto al diseño actual manteniéndose los requerimientos mecánicos.

Justificación

El trabajo a realizarse, permite obtener una mangueta de menor peso que la actual que se pueda mecanizar, utilizando un *software* CAD como herramienta de optimización y análisis.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

La optimización de un componente permite reducir su peso, en el caso de una autoparte, significa mejorar la relación peso potencia, y específicamente en la mangueta reducir la masa no suspendida. Los equipos *Formula SAE* con presupuestos altos, tienen la posibilidad de adquirir costosos *software*, que requieren computadoras tipo estaciones de trabajo, algo que para los equipos pequeños es inalcanzable. Esta investigación demuestra que la utilización de un *software* CAD de costo moderado puede utilizarse como herramienta para optimizar un componente automotriz, especialmente de vehículos prototipos aplicando los conocimientos de ingeniería y metodologías no tradicionales en la ingeniería mecánica.

Fórmula SAE

La *Formula Student* es organizada por la SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices). El propósito del evento es ofrecer al estudiante universitario de pregrado y posgrado la oportunidad de aplicar los conocimientos teóricos en un caso práctico de forma multidisciplinar, mediante la construcción de un monoplaza de competición tipo Fórmula, poniendo en práctica el aprendizaje basado en proyectos.

El aprendizaje basado en proyectos, permite al estudiante universitario, adaptarse a las demandas del mercado laboral cada vez más competitivo, donde la industria no sólo busca a jóvenes profesionales técnicos, sino que, adicionalmente dispongan de competencias transversales, como habilidades comunicativas, trabajo en equipo, liderazgo, e iniciativa propia.

Existen múltiples trabajos aplicados a vehículos prototipos, entre ellos están los *Formula Student* bajo las reglas alemanas, los mismos que son diseñados y construidos por estudiantes, la competencia generalmente no es ganada por el equipo con el prototipo

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

más veloz, el triunfador suele ser el equipo que completa con los mejores puntajes las pruebas estáticas y dinámicas.

En las pruebas estáticas está el diseño de ingeniería, plan de negocios y reporte de costos. En las dinámicas se incluye aceleración lineal, *Skid pad* (Aceleración lateral), *autocross*, resistencia y eficiencia de combustible.

En la fase de diseño de ingeniería, los estudiantes presentan a los jueces las soluciones constructivas aplicadas al vehículo y las ventajas por escrito. En la competencia los jueces examinan las construcciones y las discuten con los estudiantes. La puntuación máxima es de 150 puntos (Germany, 2016).

La estimación de costos y técnicas de fabricación en la construcción de un vehículo *Formula Student*, son importantes, por eso se discute con los jueces sobre el prototipo manufacturado y la mano de obra. La valoración máxima es de 100 puntos (Germany, 2016)

El plan de negocios, está basado en vender al vehículo a un supuesto fabricante, representado por los jueces, se pretende convencer que el prototipo cumple con las necesidades del grupo objetivo. Los equipos tienen diez minutos para persuadir a los jueces y cinco para contestar sus preguntas. La valoración máxima será de 75 puntos (Germany, 2016)

En las pruebas dinámicas, los equipos deben demostrar la maniobrabilidad del vehículo con dos pilotos a excepción de la resistencia. La mejor prueba realizada, contará para el puntaje del equipo.

En la prueba de aceleración, el vehículo debe alcanzar una distancia de 75 metros en 4 segundos. La valoración máxima es de 75 (Germany, 2016).

La prueba de *skid pad*, los vehículos son conducidos por una pista en forma de 8. Existen dos vueltas consecutivas, la segunda es cronometrada. Los vehículos demuestran

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

con una vuelta rápida cuánta aceleración lateral pueden generar (hasta 1.4g). La valoración máxima es de 75 puntos (Germany, 2016).

La prueba de *autocross*, los vehículos son conducidos por un kilómetro a través de rectas y curvas. El tiempo de vuelta sirve como indicador de la dinámica de conducción y de las cualidades de manejo. Los resultados de la disciplina de *Autocross* determinan el orden de salida en la prueba de resistencia. La valoración máxima es de 100 puntos (Germany, 2016).

En la prueba de resistencia, se proporciona la mayor cantidad de puntos, convirtiéndose en la prueba principal. En un recorrido de 22 kilómetros los vehículos tienen que probar su durabilidad bajo condiciones a largo plazo. Esta prueba también exige habilidades de manejo del conductor porque, puede haber hasta cuatro prototipos en la pista al mismo tiempo. Cada equipo sólo tiene un intento, teniendo que cambiar de piloto después de 11 kilómetros. La valoración máxima es de 325 puntos (Germany, 2016).

En el consumo de combustible, el cálculo se basa en un promedio por vuelta completada que permite una evaluación de equipos que no terminaron el kilometraje requerido. Los equipos que son 33% más lentos que el equipo de menor tiempo, así como los equipos que utilizan más de 5,72 litros en la prueba de resistencia, no recibirán puntos. La valoración máxima es de 100 puntos (Germany, 2016).

Topología de optimización

La topología de optimización (Maranan, Simpson, Palmer, & Dickman, 2016) en el diseño del componente automotriz, parte del diseño CAD y se integra con el análisis de elementos finitos, para mejorar el proceso de diseño, obteniéndose soluciones óptimas

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

(Boonpan & Bureerat, 2012) , y de peso ligero, sin sacrificar la eficacia y eficiencia (Durgun & Yildiz, 2012); durante la optimización la estructura cambia pero la topología es constante (Yildiz, Kaya, Ozturk, & Alankus, 2004). En la actualidad se utiliza *software* CAE con topología de optimización para integrar el proceso de desarrollo del producto.

El diseño de un vehículo o autoparte, tiene diferentes enfoques, se puede empezar analizando el material disponible, cargas a las que estará sometido, geometría y usabilidad.

Los materiales son importantes en el proceso de diseño (Simões, 2001). Entonces, es determinante seleccionar los materiales que pueden ocuparse en la construcción de un componente, considerando especialmente los de fácil adquisición en el mercado local o exportación.

Las cargas extremas a la que está sometida una autoparte determinan la forma y el espesor del mismo (Badih A Jawad & Polega, 2002), sino existe otro limitante. Para la obtención de las formas de componentes de la suspensión, se han propuesto modelos matemáticos que pueden evaluar las cargas laterales generadas durante las curvas de un vehículo, considerando la masa, centro de gravedad y ancho de vía (Sampo, Sorniotti, & Crocomb, 2010)

Las dimensiones del lugar donde se ubicará el componente automotriz, limita el tamaño del mismo y su forma. Esto se relaciona con los materiales, porque de su elección, permite alcanzar correctamente la forma deseada (Simões, 2001).

El diseño óptimo de un componente automotriz, además de relacionarse con el material, debe considerar la factibilidad de manufactura y para esto se han creado metodologías (Uzair N., Muhammad, & Umair N., 2013).

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

La optimización por *software* (Bonte, Van den Boogaard, & Huétink, 2008), se basa en aplicar modelos matemáticos para reducir la masa del componente a construir, aplicar un mallado acorde al producto y utilizar un *solver* apropiado.

La topología de optimización ayuda a desarrollar componentes eficientes que minimizan la contaminación, reduciendo el consumo de energía en la construcción y utilización de la autoparte. Permite seleccionar las variables de diseño, elegir una función objetivo a optimizar y considerar las restricciones (Chiandussi, Gaviglio, & Ibba, 2004).

Ejecutar una simulación por el método de los elementos finitos, puede ser visto como un modelo de entrada-rendimiento-respuesta (Chiandussi et al., 2004) para una optimización, donde el resultado dependerá de las condiciones de entorno y porcentaje de rendimiento volumétrico.

Los datos para los análisis lineales estáticos deben determinarse correctamente. Debe agregarse el esfuerzo máximo permisible para las condiciones de carga estática y debe especificarse el peso de cada condición de carga única para la optimización de la topología de la condición de carga múltiple (Muzzupappa, Barbieri, & Bruno, 2011). Para otros autores las cargas adoptadas en el diseño deben estar definidas haciendo referencia a las peores condiciones de aceleraciones laterales y longitudinales máximas (Badih A Jawad & Polega, 2002).

La elección de un *software* de simulación específico depende en gran medida del proceso, del producto y de la preferencia del usuario (Chiandussi et al., 2004).

En esta última década el uso de *software* para realizar simulaciones de maquinado, diseño y análisis de componentes o máquinas se ha incrementado, incluso las topologías de optimización se han estudiado desde el punto de vista ambiental (Qiu, Sun, Liu, & Zhang, 2013). Para reducir la cantidad de material utilizado y el uso de material amigable

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

para el ambiente. Finalmente la optimización también se la analiza desde los costos y los tiempos de producción.

La topología de optimización se ha convertido en un trabajo multidisciplinario, ha permitido incorporar nuevas formas de afrontar los problemas, encontrando nuevas y mejores soluciones a los existentes, sin salirse de los estándares de calidad y seguridad, permitiendo masificar los conocimientos y el enriquecimiento de las áreas de conocimiento.

Una de las tareas importantes de un diseñador, es especificar el material a construir y para esto, debe primeramente establecer las funciones del componente, la forma y el proceso de manufactura.

Manguetas

En la construcción de vehículos, se debe considerar la mejora de los diseños para reducir costos y tiempo de producción, además de disminuir peso. Bajo ese criterio se utiliza en la actualidad, *software* de simulación CAD (Dibujo Asistido por Computador) y CAE (Ingeniería Asistido por Computador), que permite determinar previamente si un componente o mecanismo soportara las cargas y restricciones.

Para establecer en el diseño la forma, dimensión y material, se debe conocer las funciones de las manguetas, las cuales se detallan:

- Resistir las fuerzas alrededor del eje transversal del vehículo, causados por la tracción y frenado.
- Soportar los momentos de torsión alrededor del eje longitudinal del vehículo, cuando el vehículo curva y/o pasa sobre superficies irregulares.
- Encajar dentro del aro de la rueda y sostener las mordazas de freno.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

- Resistir las fuerzas que transmite y recibe de la suspensión.

En los últimos años, el desarrollo del *software* para simulación de maquinado y análisis de elementos finitos, permiten comprobar la factibilidad de construcción del componente, evitando gastos de prueba y error que se realizaban cuando se carecía de estas aplicaciones.

En la figura 2 se observa la optimización de una mangueta, mediante la interpretación de datos realizados por el *software*.

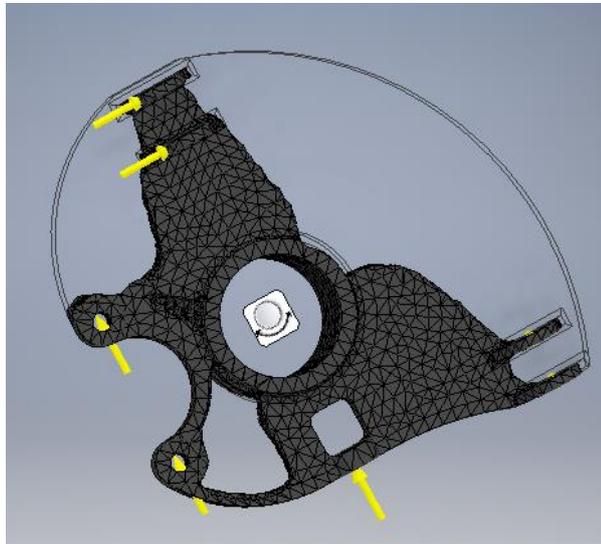


Figura 2. Optimización de una mangueta mediante software Inventor.

Fuente: Autor.

La construcción de un componente automotriz demanda de conocimientos en ingeniería y experiencia. En la primera, se aplica en la utilización de *software* de simulación y análisis como herramientas para la selección y aplicación de la forma, dimensión, materiales y proceso de manufactura que permiten optimizar recursos tecnológicos, costo y tiempo.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

La segunda se obtiene construyendo vehículos prototipos, donde se pueden aplicar mejoras por simple observación.

En la figura 3 se observa una mangueta que es analizada para determinar los sitios donde se puede optimizar, reduciendo material o mejorando el diseño para aumentar el factor de seguridad.

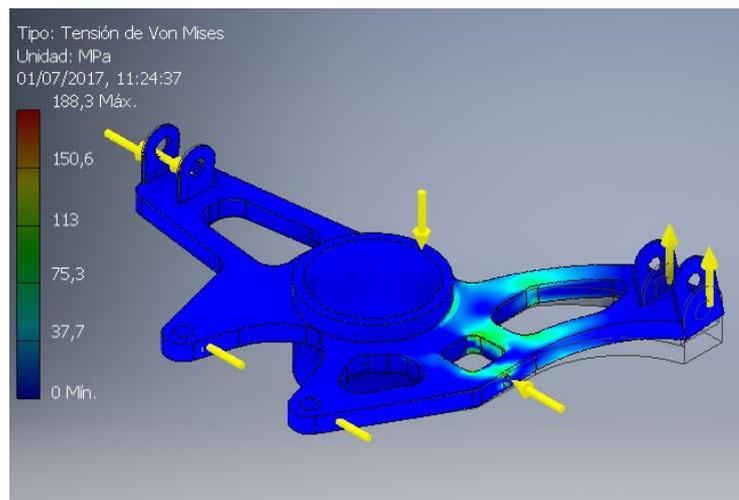


Figura 3. Análisis de una mangueta mediante *software Inventor*.

Fuente: Autor.

Fuerzas que actúan en las manguetas.

Para la determinación de las cargas, se calcula a partir del mayor peso vehicular de los prototipos, la máxima aceleración y desaceleración. Los valores se determinaron mediante las ecuaciones 1 y 2.

$$a = v/t \quad (1)$$

$$-a=v/t \quad (2)$$

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE MANGUETAS

Para el cálculo de la fuerza y aceleración centrífuga se considera el radio de giro del vehículo, la máxima velocidad y la masa del prototipo, como se observa en las ecuaciones 3 - 4.

$$F_{centr} = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (3)$$

$$a_{centr} = \frac{F_{centr}}{m} \quad (4)$$

El sistema de suspensión provoca una carga extra por las fuerzas laterales, la misma que se calcula por la ecuación 5.

$$F_o = \frac{w}{2} + F_{centr} \cdot \frac{H_{cg}}{A} \quad (5)$$

Donde,

W = Peso

Hcg = Altura del centro de gravedad

A = Ancho de vía

Fcentr = Fuerza centrífuga

Otro valor a considerar es la fuerza normal,

$$H_o = m \cdot a_{centr} - F_o \cdot \sin \alpha - w \cdot \sin \alpha \quad (6)$$

En la siguiente figura se observa las fuerzas que actúan sobre la mangueta delantera de un vehículo.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

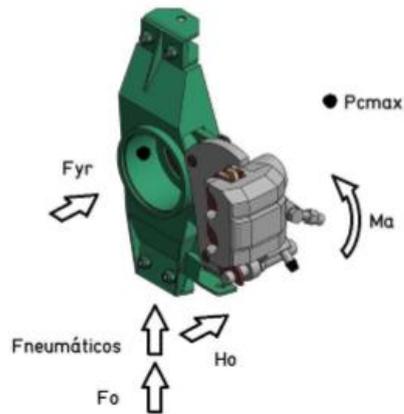


Figura 4. Cargas aplicadas sobre la mangueta

Fuente: (Reyes Jiménez, 2016)

Materiales

Los componentes mecánicos de las masas no suspendidas de un vehículo de baja gama generalmente son construidos de acero, los de alta gama como BMW, Audi, Porsche, Alfa Romeo y competencia tienen algunas partes de aluminio.

A continuación se describe las propiedades de los materiales que inciden en el diseño de un componente automotriz.

Las propiedades de resistencia, elasticidad y ductilidad de los metales se determinan mediante una prueba de tensión, la misma que consiste en tensar lentamente una barra redonda o plana hasta que se rompa. Los resultados del ensayo darán la magnitud de la fuerza ejercida y la deformación.

El esfuerzo es proporcional a la fuerza aplicada y se obtiene al dividir la fuerza aplicada y el área transversal de la barra.

Resistencia a la tensión (Su).

Es el punto máximo de la curva esfuerzo – deformación, es la resistencia última a la tensión. En esta prueba se mide el máximo esfuerzo aparente en la barra de prueba como se muestra en las figuras. El esfuerzo aparente se calcula al dividir la carga entre el área de la sección inicial de la probeta.

Una vez alcanzada la máxima carga, existe una disminución del diámetro de la barra y posteriormente existe el esfuerzo a la ruptura.

Los ensayos de compresión – deformación se realizan de forma similar a los de tracción, con la diferencia que en lugar de estirar la probeta, ahora se comprime. La fuerza de compresión se considera negativa, produciendo un esfuerzo negativo (Callister, 2002). En la figura del diagrama de esfuerzo – deformación unitaria para el acero se observa donde se encuentran el límite de proporcionalidad y elástico; punto de fluencia y resistencia a la tensión.

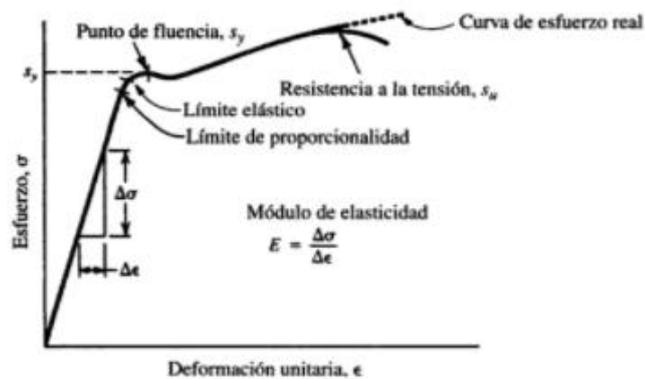


Figura 5. Diagrama esfuerzo – deformación unitaria para el acero.

Fuente: (Mott, 2006)

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

En la figura 6 se observa el diagrama de esfuerzo – deformación unitaria para el aluminio o metales no ferrosos.

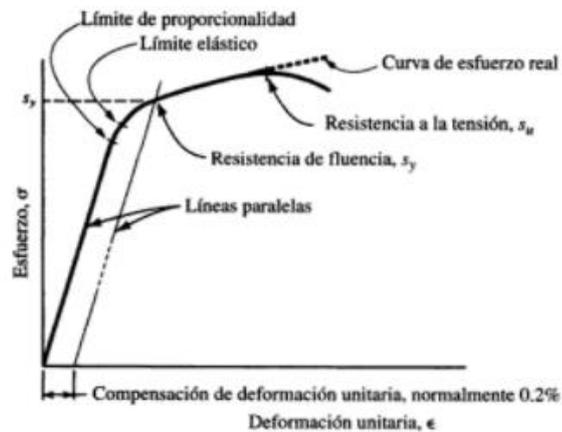


Figura 6. Diagrama esfuerzo – deformación unitaria para el aluminio.

Fuente: (Mott, 2006)

Resistencia de fluencia (S_y)

Donde existe un gran incremento de la deformación con poco o ningún aumento del esfuerzo en el diagrama anterior, se denomina resistencia de fluencia. Esto ocurre cuando la barra se deforma permanentemente. Si el punto de fluencia es notable, la propiedad se denomina punto de fluencia, caso contrario se llama resistencia de fluencia.

En la figura 6 se observa un diagrama esfuerzo deformación unitaria de metales no ferrosos o de ciertos aceros de alta resistencia, donde no existe un marcado punto de fluencia, pero el material ha cedido cerca del valor del esfuerzo señalado como S_y . El punto de intersección entre una paralela recta a la curva trazada a la derecha y compensándose en un 0,20 % se define como la resistencia de fluencia del material.

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE MANGUETAS

Límite elástico

Cuando la barra retorna a su forma original después de aplicar una fuerza, decimos que se encuentra en la zona elástica y si se mantiene deformada significa que llego a la zona plástica. El límite elástico se encuentra cerca de la resistencia de fluencia.

Módulo de elasticidad

En el diagrama – esfuerzo deformación unitaria, se visualiza en la primera parte una recta, esto indica que el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria y el valor del módulo de elasticidad es la constante de proporcionalidad definida y la pendiente de la recta del diagrama. El módulo de elasticidad indica la rigidez o resistencia a la deformación del material.

Ductilidad y porcentaje de elongación

Los componentes contruidos en materiales dúctiles, se detecta con facilidad una eminente falla, es decir no es común una falla repentina; entonces lo contrario de ductilidad es la fragilidad. La ductilidad es la deformación de un material antes de su fractura final. Los componentes fabricados en materiales dúctiles resisten mejor que los contruidos en materiales frágiles a cargas repetitivas.

La ductilidad es el porcentaje de elongación, este a su vez es la diferencia entre la longitud final y original, dividida para la longitud original; para convertirlo en porcentaje se multiplica por cien. Cuando el porcentaje es mayor al 5%, el material es dúctil, caso

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE MANGUETAS

contrario es frágil. Materiales con elongaciones mayores al 12% son recomendadas para componentes que deben soportar cargas repetitivas.

Relación de Poisson

La relación de la deformación unitaria de contracción y tensión se denomina relación de Poisson. Los valores típicos para el acero son de 0,27 a 0,30 y para el aluminio de 0,30 a 0,33.

Dureza

La dureza de un material, es la resistencia a ser penetrado. Los equipos más utilizados para medir dureza son Brinell y Rockwell. El primero ocupa como penetrador una bola de acero endurecido de 10 mm de diámetro, la carga es de 3 000 kg fuerza o 500 kg dependiendo del metal.

El durómetro Rockwell utiliza una bola de 1/16 pulgada de diámetro de acero endurecido, con una carga de 100 kg para metales blandos. En aceros con tratamiento térmico, se utiliza la escala Rockwell C, la carga es de 150 kg, el penetrador es de diamante y tiene una forma cónica esférica.

Maquinabilidad

Es la facilidad con que se maquina un material, con una duración razonable de la herramienta y un buen acabado superficial. Solo por comparación se puede determinar si un material da facilidades de maquinabilidad.

Tenacidad

Es la capacidad para absorber energía aplicada que tiene un material, sin que sufra fractura, Los componentes sometidos a cargas aplicadas repentinamente deben tener un alto nivel de tenacidad.

Resistencia a la fatiga.

Los componentes cuando son sometidos a aplicaciones de cargas repetitivas o condiciones de esfuerzo que varían en función del tiempo durante miles o millones de ciclos, fallan debido al fenómeno de fatiga. Todos los componentes que se aplican en ingeniería están sometidos a procesos de fatiga y fractura, existiendo diferentes tipos de fracturas que deben ser evaluadas para mejorar los materiales (Alcalá Cabrelles, Llanes Pitarch, García, Manuel, & Salán Ballesteros, 2002).

Para el cálculo del límite de tensión hay que basarse a la norma de la Federación Europea de Manejo de Materiales (FEM), donde se establece que el material, la naturaleza de la carga y los ciclos de variación son factores a considerar para determinar el límite de fatiga (Rodríguez, 2004).

Densidad

La densidad es una propiedad física del material y se define como la masa por unidad de volumen.

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE MANGUETAS

Clasificación de los metales y aleaciones.

Existen asociaciones industriales como la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE), El Instituto Estadounidense del Hierro y Acero (AISI), y la Asociación del Aluminio (AA), que establecen normas para clasificar metales y aleaciones;

Acero

La mayor parte de los aceros estructurales reciben la designación ASTM (Asociación Americana de Ensayo de Materiales). Un grado frecuente es el A36, que tiene un punto de fluencia mínimo de 248 MPa y es muy dúctil. Es un acero de bajo carbono, disponible en láminas, placas, barras y perfiles estructurales (Mott, 2006).

La oxidación es uno de los principales problemas de los aceros, deben evitarse que se agrieten, que sus acabados sean lisos, no estén expuestos a líquidos corrosivos o salinos; para evitar este inconveniente se deben realizar tratamientos a las superficies de los aceros (SCHUCH, 1999).

Aluminio

Su aplicación es en estructuras y componentes mecánicos. Las principales propiedades son el bajo peso, resistencia a la corrosión, facilidad de maquinado y apariencia agradable. La densidad de un aluminio comparada con el acero es de un tercio.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Método por elementos finitos.

El desarrollador de nuevos productos busca métodos que le ayuden a mejorar el producto y minimizar costos de producción. Esto se consigue implementando nuevas tecnologías de análisis de productos, convirtiéndoles en más eficientes y económicos. (Avilés, 2005).

Es un método numérico para la solución de problemas de ingeniería, donde la resolución involucra un alto grado de dificultad, porque tienen geometrías complejas, cargas no distribuidas y están en función de las propiedades de los materiales y porque las soluciones analíticas generalmente requieren la solución de ecuaciones diferenciales parciales u ordinarias que no son posibles de resolver.

Los problemas a resolver por elementos finitos son: análisis de estructuras, transferencia de calor, flujo de fluidos, etc. Este método propone que el problema sea planteado como una serie de ecuaciones algebraicas simultáneas, en lugar de utilizar la resolución de ecuaciones diferenciales complejas. En el método por elementos finitos como el problema debe ser discretizado, significa que al igual que otros métodos numéricos, arrojan valores aproximados, porque consiste en la división del cuerpo en otros de menor tamaño, interconectados por medio de puntos comunes llamados nodos, los cuales forman superficies y se comportan como volúmenes de control independiente, los que son afectados por las condiciones de frontera que afectan al cuerpo.

Control numérico computarizado

Existen una gran variedad de procesos de manufactura para producir componentes, y casi siempre existe más de uno. Entre ellos está la fundición, conformado, maquinado,

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

soldados, etc. (Kalpakjian & Schmid, 2002), y métodos más modernos denominados *Direct Metal Laser Sintering* que conjuntamente con la metodología de topología de optimización dan buenos resultados (Farias, Schommer, Haselein, Soliman, & de Oliveira, 2015).

En la actualidad las máquinas CNC están ganando espacio por las ventajas que presentan al momento de mecanizar, es decir, motores controlados por una computadora determinan la posición y velocidad de los ejes, pudiéndose ejecutar formas tridimensionales complejas.

Un conjunto de órdenes que siguen una secuencia lógica constituyen un programa de maquinado, la misma que se puede realizar de forma manual o automática. La primera se escribe únicamente por medio de razonamiento y cálculos hechos por el operador. La segunda, los cálculos los realiza una computadora.

El programa de mecanizado contiene instrucciones necesarias para los procesos en varios bloques. La secuencia inicia con las funciones geométricas, máquina y tecnológicas. Los caracteres usados se rigen bajo la norma DIN 66024 y 660025.

La función G se utiliza para indicar la forma de la trayectoria, tipo de corrección de herramienta, parada programada, ciclos automáticos, programación relativa y absoluta. A esta función le acompañan un número de dos cifras, permitiendo programar hasta 100 funciones diferentes, a continuación veremos las de mayor uso.

G00: Posicionamiento rápido;

G01: Interpolación lineal;

G02: Interpolación lineal en sentido horario;

G03: Interpolación lineal en sentido anti horario;

G21: Comienzo de uso de unidades métricas;

G28: Retornar al home de la máquina;

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE MANGUETAS

G36: Compensación automática de la herramienta en X;

G96: Comienzo de desbaste a velocidad tangencial constante;

G97: Fin de desbaste a velocidad tangencial constante;

La función M, es para especificar la dirección correspondiente a las funciones auxiliares o complementarias. Se utiliza para indicar a la máquina que se realicen operaciones como: parada programada, rotación del husillo, cambio de herramienta, etc. A la letra M, le precede un número de dos cifras que permite programar hasta 100 funciones auxiliares diferentes, algunos ejemplos se describen a continuación.

M00: Parada opcional;

M02: Reset del programa;

M03: Girar el husillo en sentido horario;

M04: Girar el husillo en sentido anti horario;

M05: Frenar el husillo;

M06: Cambiar de herramienta;

M98: Llamada a subprograma;

M99: Retorno de subprograma;

Trabajos realizados sobre manguetas

Existe trabajos realizados sobre las manguetas de los vehículos prototipos *Formula Student o SAE*, desde diferentes enfoques, entre los cuales tenemos.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

El estudio sobre la optimización de las manguetas enfocadas a las diferentes formas que pueden tener, sin importar el tipo de mecanizado o fabricación que debe emplearse para su construcción (Reiher & Koch, 2015).

El diseño de una mangueta utilizando el *software hypermesh* tanto en fase de optimización como de análisis de elementos finitos demuestra que es factible reducir el peso del componente (Prajwal).

La reducción del peso de una mangueta en un 41% (Sedláček, 2014) son trabajos que permiten orientar la presente investigación.

En el próximo capítulo se describirá el tipo de investigación que se escogió para la solución al problema, también se menciona el método, la metodología e instrumentos usados.

Método

Esta investigación, se centra en encontrar una optimización topológica de las manguetas delanteras para un vehículo prototipo *Formula Student* utilizando dos tipos de materiales, aplicando el promedio entre las cargas máximas y mínimas encontradas mediante revisión bibliográfica, utilizando como herramienta un software CAD que pueda realizar el análisis por elementos finitos, validar la propuesta mediante encuestas a profesionales con experiencia, finalmente construirla y montarla en el vehículo.

A continuación se describe el tipo de investigación, el método, la metodología, material e instrumentos a utilizar.

Tipo de investigación

La investigación documental bibliográfica es utilizada en la primera fase de la investigación, para la identificación de las cargas en que trabajan las manguetas y determinar las máximas y mínimas cargas que permitan promediar. Este valor de carga serán las aplicadas para la optimización y análisis de las mismas.

La segunda fase se basa en un tipo de investigación experimental, que se centra en la manipulación de variables independientes en condiciones controladas para medir el efecto sobre la variable dependiente, de tal forma que se induzca a obtener el mismo resultado en un objeto distinto. En este tipo de investigación no solo se identificarán las diferentes formas de la mangueta, sino también determinar el peso, factor de seguridad y la geometría para el posterior mecanizado.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

En la última fase se utilizará la investigación cualitativa, que plantea, que observadores competentes y cualificados pueden informar con objetividad, claridad y precisión acerca de sus propias observaciones y experiencias de forma no cuantificable los datos. Lo que permitirá establecer si la mangueta puede ser mecanizable en un equipo fresador CNC y de fácil montaje en el vehículo.

Métodos empírico – analítico

Este es un modelo de investigación científica, que se basa en la experimentación y la lógica empírica, es decir, se apoya de la observación y los conocimientos. Busca fundamentalmente el determinar la adecuación o no de la hipótesis a la realidad mediante observación, experimentación, medición y en el estudio, poder establecer si se puede mecanizar la mangueta.

Por experimentación en el presente estudio, representa la aplicación de cargas y restricciones como variables independientes en dos materiales para que el software CAD optimice inicialmente y permita mediante el análisis mejorar la forma para que sea mecanizable y minimizar las zonas de riesgo.

Algunas ventajas de este procedimiento en la aplicación del *software* como una herramienta para optimizar, es que se puede reproducir cuantas veces se necesite y modificar las cargas. Para el diseño de la mangueta se inició el proceso utilizando el aluminio 7075 T6 por tener mejores propiedades mecánicas.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Metodología

En la investigación se aplicará la metodología del análisis orientado a la usabilidad y optimización, que consiste en una primera etapa, en buscar la información sobre la aplicabilidad del componente, los requerimientos, análisis de funciones y establecer metas de confiabilidad. En la etapa de diseño, se considerará las formas y dimensiones del componente, manteniendo los puntos de anclaje para la comparación de peso y eficiencia.

En la etapa de implementación se estableció el tipo de mallado, que para el presente estudio se permitió al software mallar de acuerdo a la forma del componente; además, de incorporar las cargas y restricciones. Para la etapa de evaluación, se solicitó a los jefes de equipos de las universidades de la zona 3 (Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca y Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE) sobre la factibilidad de construir la mangueta y la facilidad de montaje, esto se consigue a través de una encuesta y modelación del proceso de mecanizado en el software NX y el componente fabricado mediante mecanizado CNC.

Proceso de optimización

El proceso de optimización parte de la selección de los materiales a ocuparse en la investigación y están relacionados a aquellos que en la fase de investigación bibliográfica se encontró que son utilizados por equipos que tienen sus vehículos por debajo del peso promedio y los equipos novatos. Los primeros utilizan aluminio 7075 T6 y los segundos de Acero A36 (Joshi & Joshi, 2016) (ver tabla 1).

El acero ASTM A36 es aplicado en la construcción de una gran variedad de perfiles estructurales laminados en caliente y a placas de la misma calidad que están disponibles

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

en nuestro mercado. Tiene un esfuerzo de fluencia de 250 MPa y un esfuerzo de ruptura en tensión es de 400 a 550 MPa, y su soldabilidad es adecuada. Su densidad es de 7,85 gramos por centímetro cúbico.

El aluminio 7075 es usado en aplicaciones náuticas, el automovilismo y la aviación, debido a su alto ratio de resistencia-densidad. Tiene un límite elástico de 450 MPa y un límite a la fatiga de 300 MPa y un esfuerzo de ruptura en tensión es de 530 a 570 MPa, y es de difícil soldabilidad pero fácil de mecanizar. La densidad es de 2,80 gramos por centímetro cúbico.

A continuación, se explica sobre el procedimiento para la obtención del componente optimizado con el *software Inventor* a partir del CAD como se observa en la figura 7. En el CAD de la mangueta se completó el área que no perjudica la movilidad del neumático u otras partes del sistema de suspensión o dirección con la finalidad de permitir al *software* establecer la mejor opción.

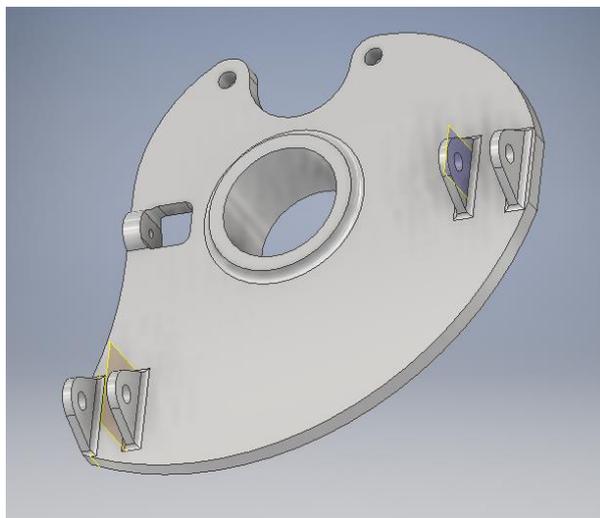


Figura 7. CAD de la mangueta en Inventor.

El *software Inventor* tiene en la pestaña módulo 3D, un icono denominado generador de forma, que se debe activar dando un clip como se muestra en la siguiente figura.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

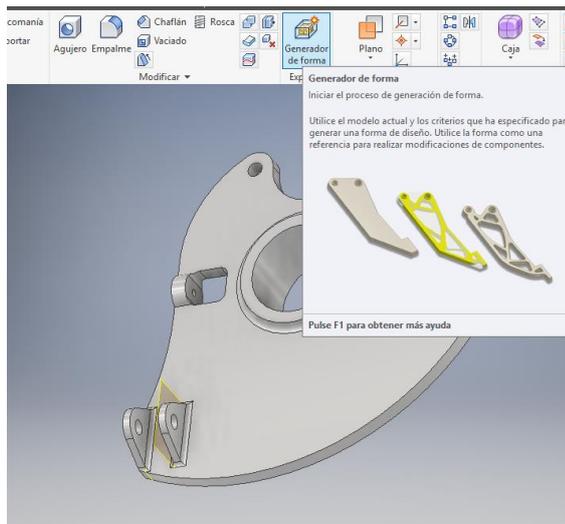


Figura 8. Selección del generador de forma.

El generador de forma se utiliza como guía conceptual para el diseño preliminar de un componente, posterior a eso se debe realizar un análisis para comprobar que los niveles de tensión son aceptables. En la figura 9 se observa la activación del generador de forma.



Figura 9. Activación del generador de forma en Inventor.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

En la pantalla aparecerá en la parte superior los iconos para incorporar el material, las cargas, restricciones, configurador del generador de forma, mallado, etc. En la parte izquierda aparecen los parámetros a medida que se agreguen como se visualiza en la figura.

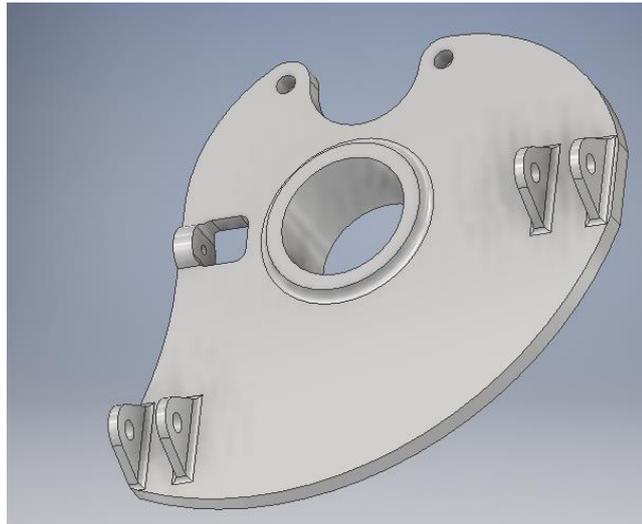


Figura 10. Ventana del generador de forma.

Para iniciar la fase de optimización se debe asignar el material del componente como se muestra en la figura 11.

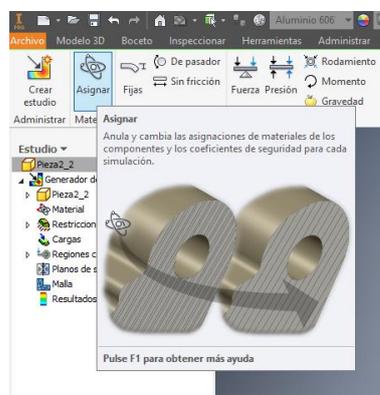


Figura 11. Activación del icono para asignar material al componente.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

En la siguiente tabla se evidencia los valores ingresados en el software para poder asignar el material requerido.

Tabla 1.

Datos del aluminio 7075 T6.

Módulo de Young	Coefficiente de	Módulo cortante	Densidad
GPa	Poisson	MPa	g/cm³
72	0,33	530	2,8

En el listado de materiales del *software* no existe el material que se requiere, teniendo que crearse, asignando las propiedades físicas y mecánicas. En la figura 12 se observa que en opciones de material original y de anulación debe estar especificado el material a utilizarse.

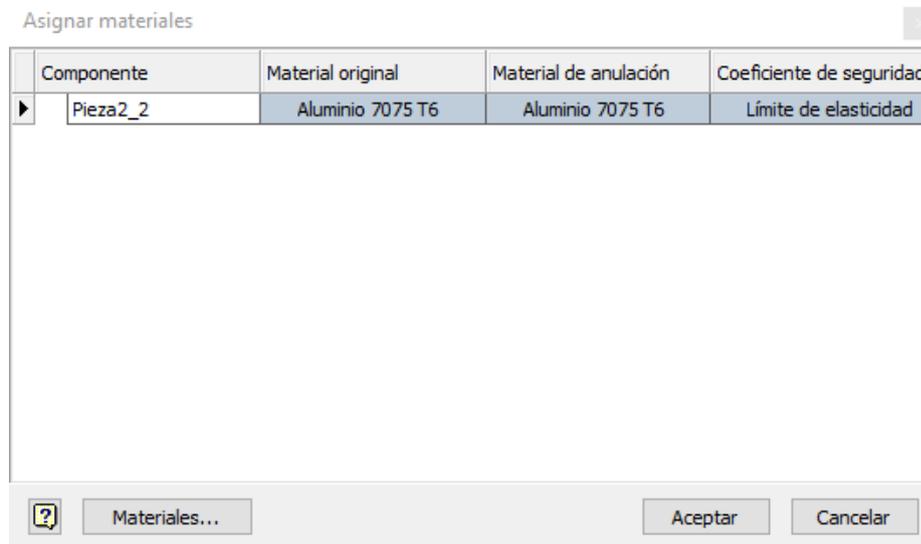


Figura 12. Asignación de material

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Para iniciar la fase de optimización se debe establecer las regiones que no deben ser modificables, como los puntos de anclaje (ver figura 13).

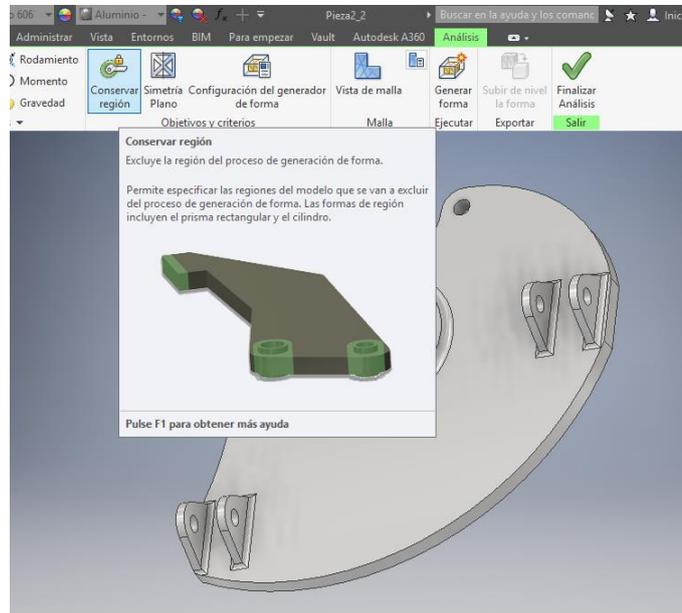


Figura 13. Activación del conservador de regiones.

En el componente se debe señalar la cara que se desea conservar y en la ventana desplegada la distancia a proteger, en este caso es 12 mm, de forma automática se despliega las coordenadas del punto central. Este procedimiento se realiza en cada región que se desea como se observa en la figura 14.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

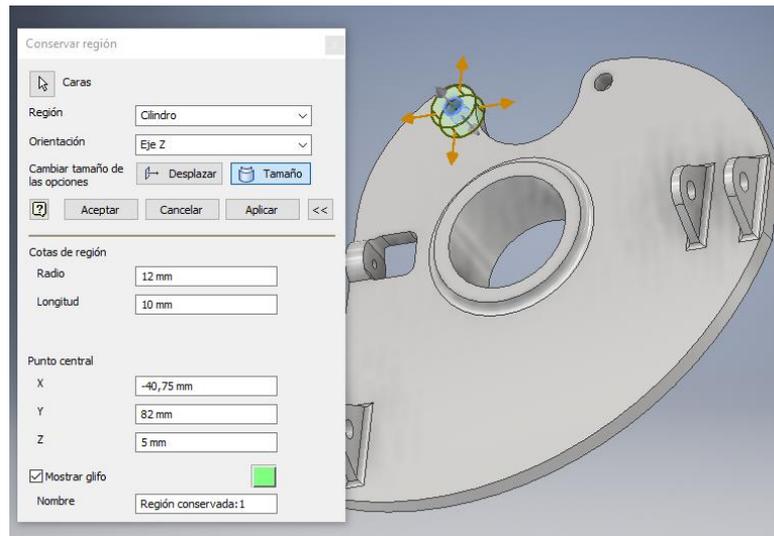


Figura 14. Selección y asignación de la región a conservar

Posteriormente seleccionado las regiones a conservar, la mangueta debe visualizarse como en la figura 15.

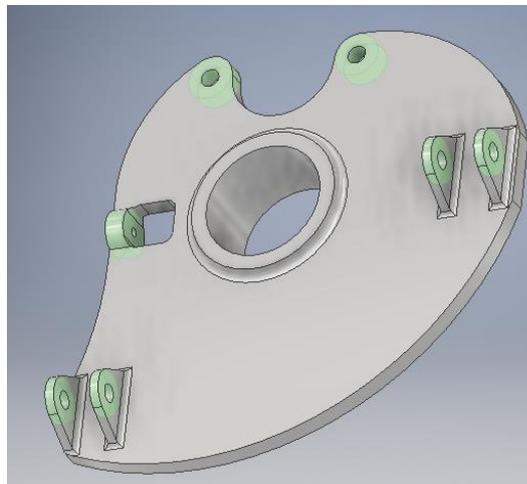


Figura 15. Mangueta con regiones protegidas

La mangueta debe tener un punto fijo para el análisis estático, esto se consigue activando el icono de pasador como se observa en la figura 16.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

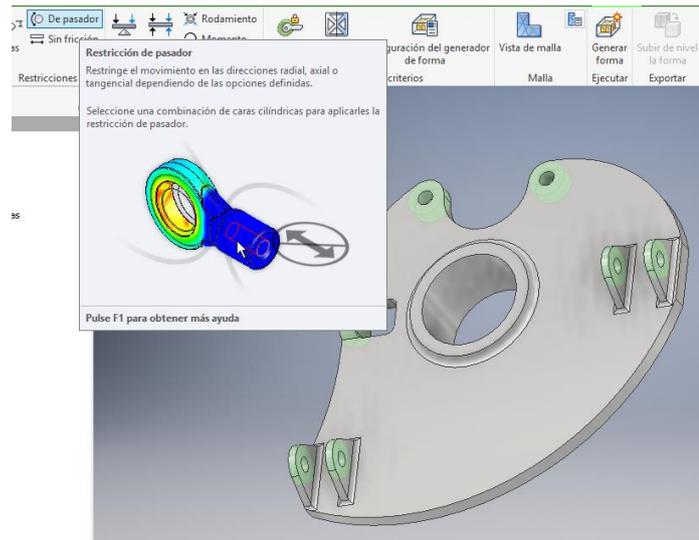


Figura 16. Activación del bloqueador de movimiento

Activado el icono aparece la pantalla que permite establecer los tipos de restricciones de movimiento y seleccionar la zona donde se aplicará. La zona escogida es donde estará el rodamiento para la incorporación de la manzana.

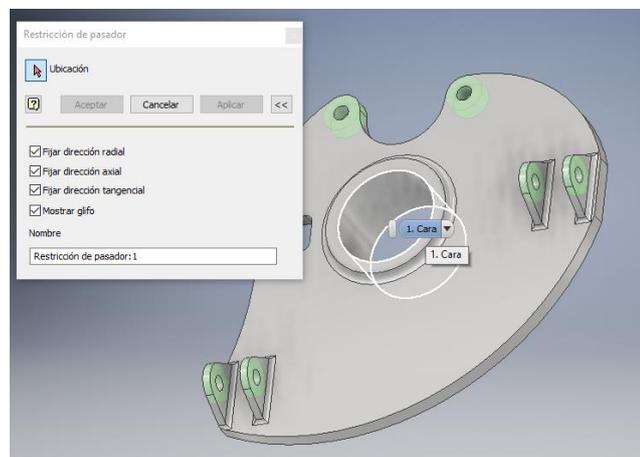


Figura 17. Restricción de la mangueta.

Una vez seleccionado la restricción de movimiento se debe insertar las fuerzas que se ejercerán en los puntos de anclaje (figura 18).

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

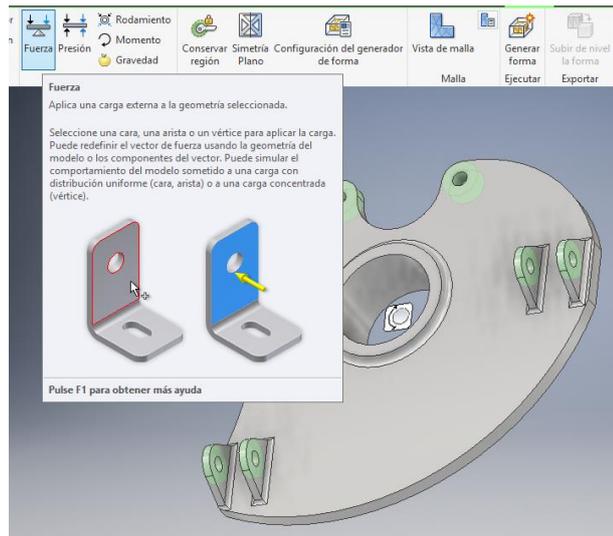


Figura 18. Activación de las fuerzas en la mangueta.

Las fuerzas a introducirse en el *software* son las promediadas entre los valores máximos y mínimos encontrados por investigación documental bibliográfica. En la Tabla 1 se observa los valores de las fuerzas. Para el apoyo de la dirección se considera el promedio entre la aplicada a la mangueta actual 741 N (Cruz Castro & Mesías Izurieta, 2013) y la 256 N (Reyes Jiménez, 2016).

Tabla 2.

Fuerzas que afectan a la mangueta delantera.

Fuente	Pinza de freno	Apoyo inferior	Apoyo superior	Dirección	Material
(Badih A. Jawad & Baumann, 2002)	1 121	2 304	895		7075 T6
(Muzzupappa et al., 2011)					7075 T6
(Kakria & Singh, 2015)					7075 T6
(Joshi & Joshi, 2016)	1 120				7075 T6
(Reyes Jiménez, 2016)	3 048	3 438	2 068	256	7075 T6
Autor	2 085	2 871	1 482	494	7075 T6

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

En la figura 19 se visualizan las cargas con flechas de color amarillo, en todos los puntos de anclaje.

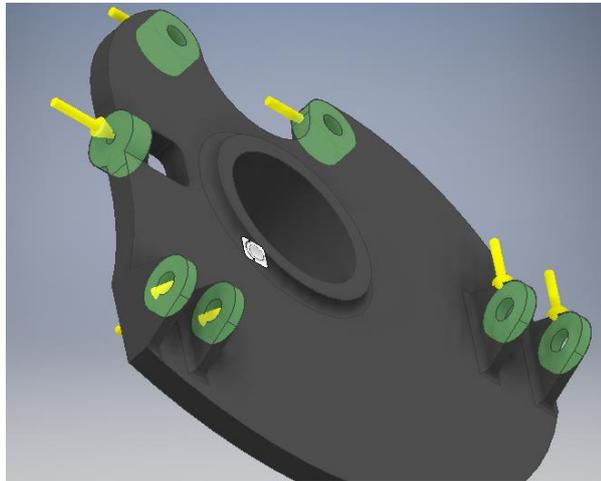


Figura 19. Fuerzas aplicadas al CAD.

Luego debe mallarse el componente, en esta fase se utilizó el mallado por defecto que el *software* CAD otorga de acuerdo a las áreas y volumen del componente como se observa en la figura 20.

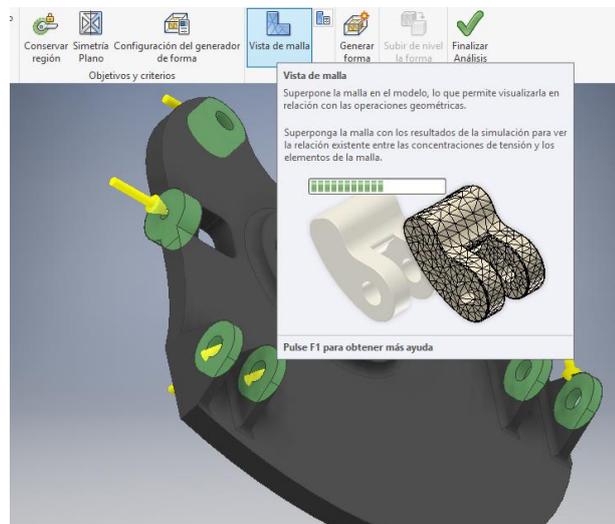


Figura 20. Activación del mallado.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

El componente mallado debe quedar como en la figura 21, para proceder a establecer la configuración del porcentaje de optimización.

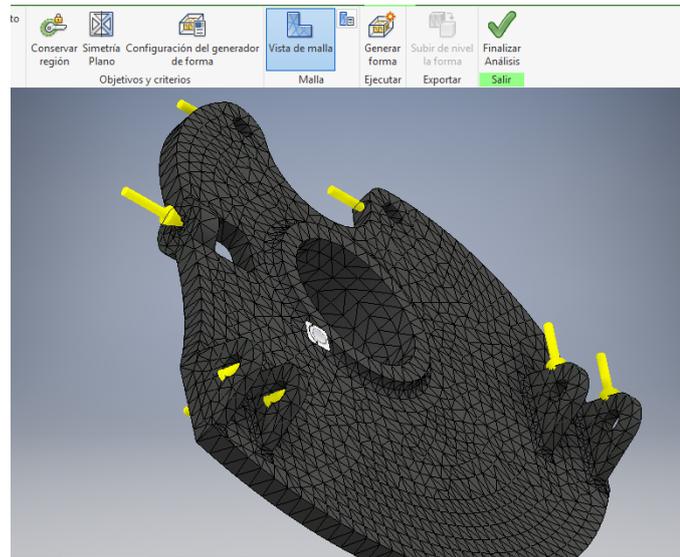


Figura 21. Mallado aplicado al componente.

Luego se escoge el configurador del generador de forma para poder establecer el porcentaje de reducción de la masa, que en este caso es 60 %.

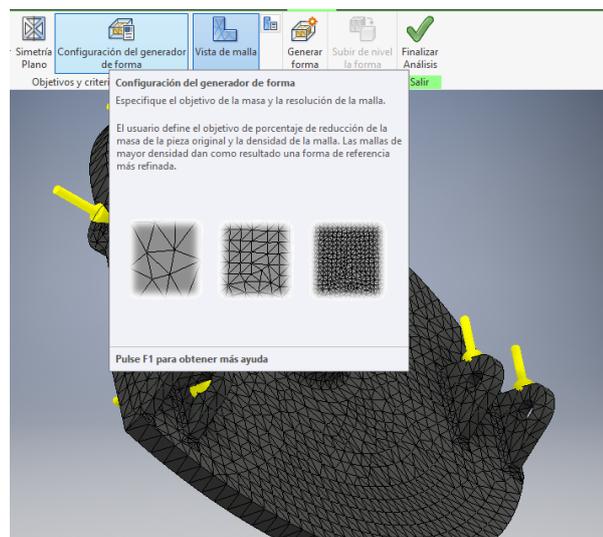


Figura 22. Configuración del generador de forma.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

El porcentaje de optimización de masa dependerá de la forma inicial del componente y esto se refleja en el factor de seguridad y los puntos críticos, para obtener la reducción de peso de la mangueta se ejecuta el icono generador de forma (figura 23).

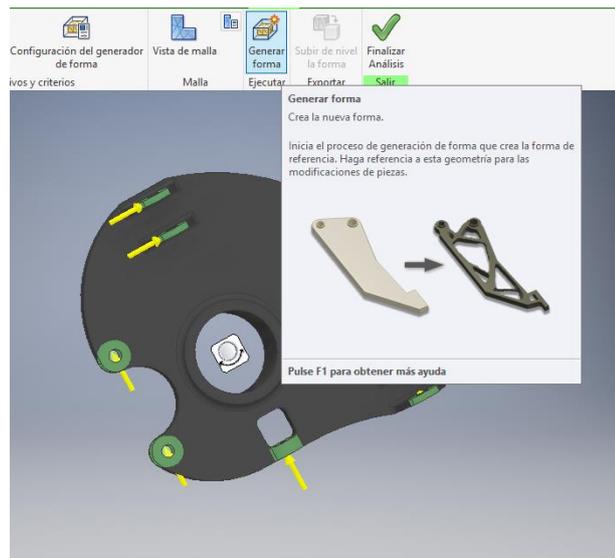


Figura 23. Activación del generador de forma.

Obtenida la forma optimizada por el software, se procede a evaluar su posibilidad de ser mecanizado, para lo cual se genera un nuevo boceto tomando como referencia el optimizado. El nuevo boceto se procesa nuevamente bajo las mismas cargas para la determinación final del campo de tensiones y deformaciones.

Medios

Los medios a utilizar son el *software Inventor* para el proceso de optimización y análisis de elementos finitos, además de cuestionarios para la fase de determinar si el

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

componente puede ser mecanizable y de fácil montaje en el vehículo y la simulación del mecanizado en el software NX.

Instrumentos.

El instrumento que se requiere para la fase de investigación cualitativa y que se relaciona con las metodologías a seguir es el cuestionario (Anexo1), esto porque en él se formula una serie de preguntas que permiten medir las variables.

Resultados

Una vez obtenida la forma de la mangueta que el *software* sugiere se procede a realizar un análisis para observar donde posiblemente exista problemas de deformación, ruptura y mecanizado con fresadora con control numérico computarizado.

En la figura 24 se observa la mangueta optimizada al 50, 60, 70% existiendo la posibilidad de reducir o aumentar el porcentaje.

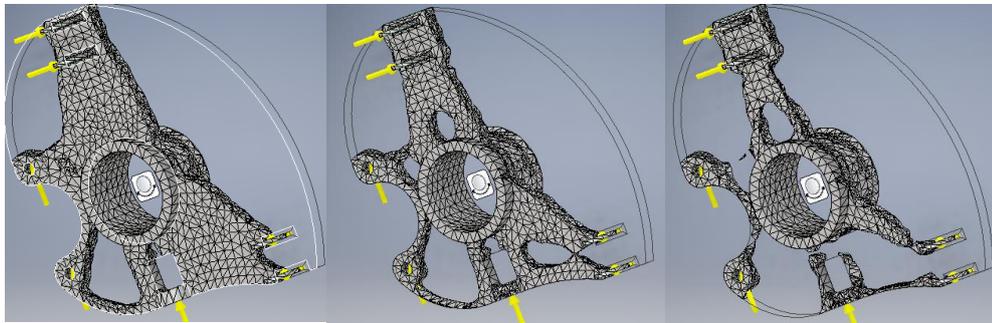


Figura 24. Mangueta optimizada con el software a 50, 60 Y 70%.

Seleccionada en el porcentaje que se trabajará, se activa el componente base, para observar la reducción volumétrica del componente.

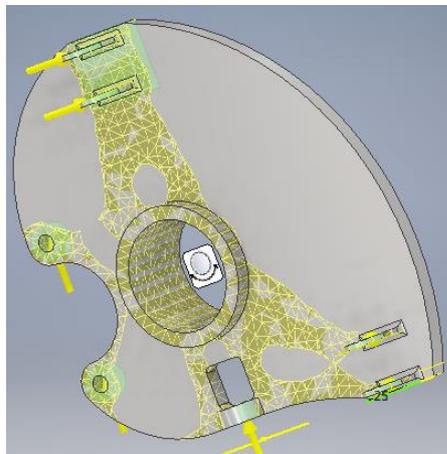


Figura 25. Visualización del CAD y la forma optimizada.

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE MANGUETAS

Se mejora la visualización, al seleccionar sombreado con aristas en la opción vista, como se muestra en la figura 26.

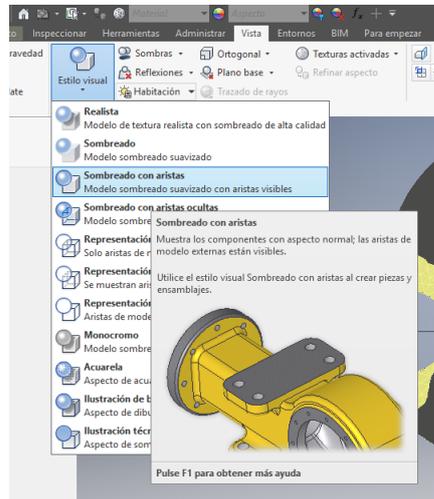


Figura 26. Cambio del estilo de visualización a sombreado con aristas.

Activar un nuevo boceto para corregir las formas irregulares que el software proporciona de la mangueta como se observa en la figura 27.

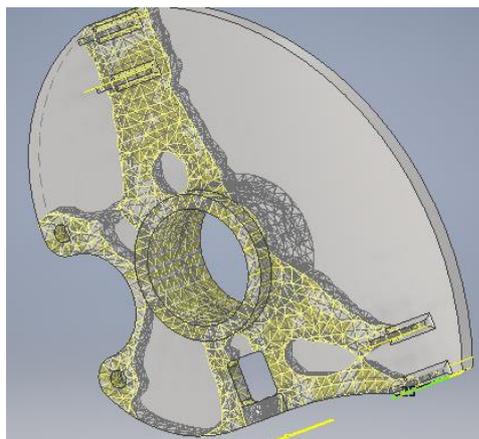


Figura 27. Activado el boceto para redibujar el CAD.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Realizar el boceto por el perfil del componente sugerido por el CAD como se observa en la figura 28.

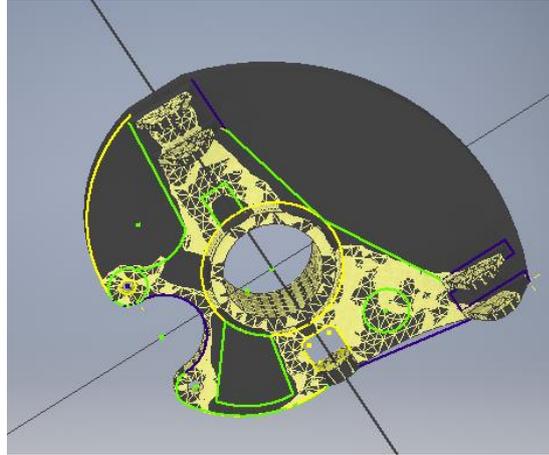


Figura 28. Boceto realizado

Suprimiendo el componente inicial, la mangueta optimizada queda como se muestra en la figura 29, donde se puede observar irregularidades en la geometría.



Figura 29. Mangueta optimizada por el software

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Una vez obtenida la forma del CAD sugerido por el software, como se muestra en la figura 30, se debe realizar un análisis por elementos finitos.



Figura 30. Mangueta optimizada con ayuda del software.

La opción de análisis de tensión, permite realizar la valoración del CAD sugerido, por lo cual se debe ingresar, los mismos datos que fueron ingresados en la fase del generador de forma.

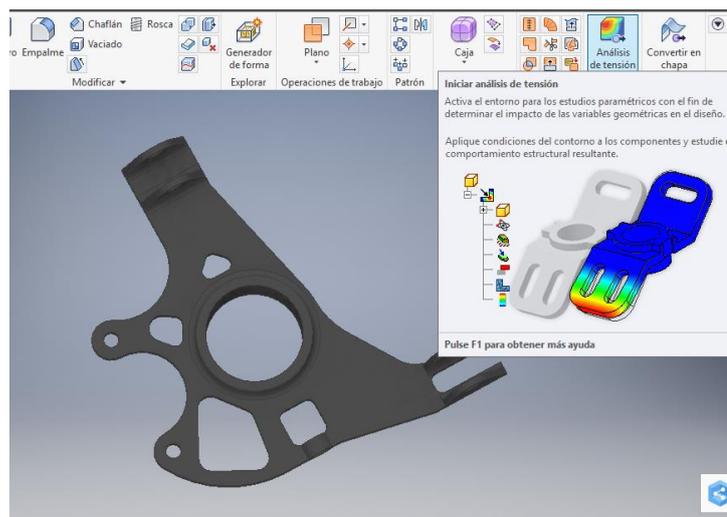


Figura 31. Activación de análisis de tensión.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Ingresada las fuerzas y restricciones, se procede a ejecutar la opción de simulador, para observar los puntos críticos del CAD sugerido.

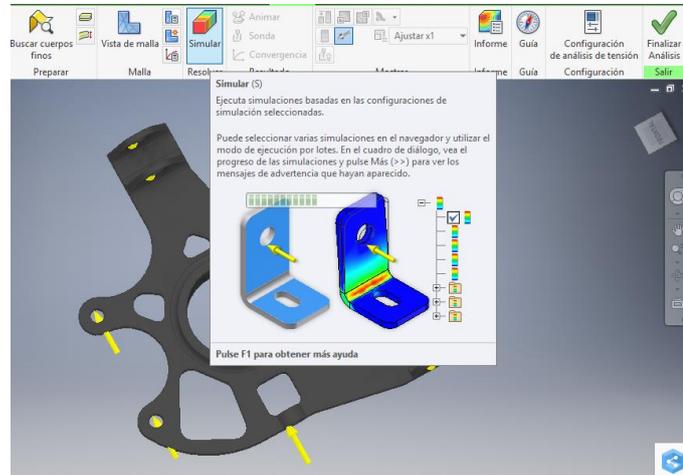


Figura 32. Activación del simulador de tensiones.

El software por defecto permite inicialmente visualizar la tensión de Von Mises como se observa en la figura 33.

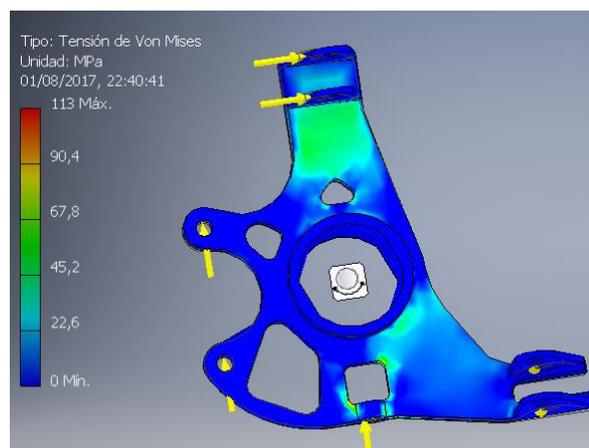


Figura 33. Visualización del valor de Von Mises.

En la figura 34, se observa los valores del desplazamiento que sufre la mangueta con las fuerzas y restricciones ingresadas.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

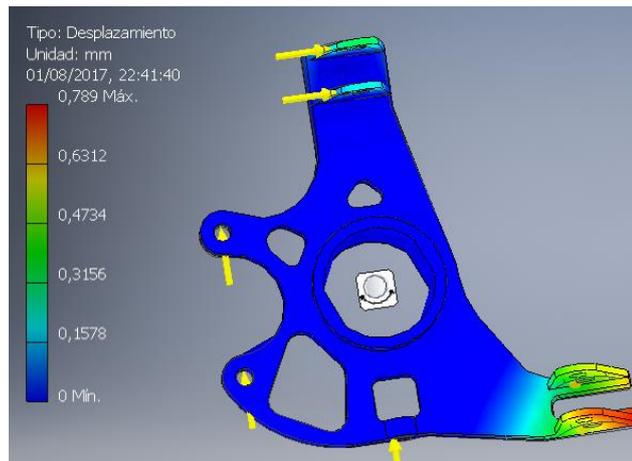


Figura 34. Visualización del desplazamiento.

El coeficiente de seguridad también se observa en la simulación como se muestra en la figura 35.

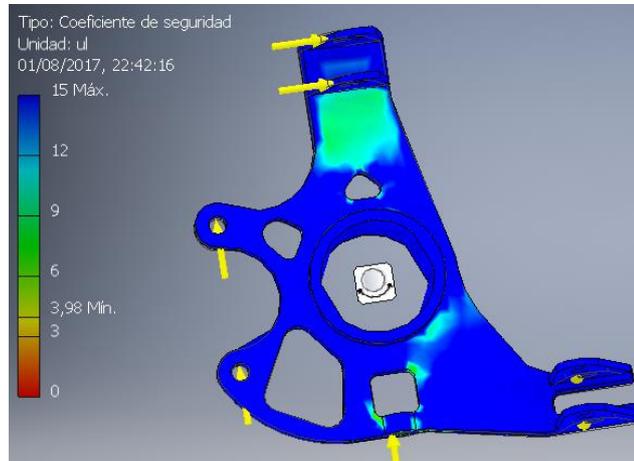


Figura 35. Visualización del coeficiente de seguridad.

Observando las zonas afectadas que el software proporciona y analizando los valores, se procede a mejorar el CAD. En la mangueta se procede a eliminar el agujero donde se visualiza deficiencia. Para compensar el peso, se procede a realizar dos agujeros donde no se observa áreas que pueden ser mecanizadas.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS



Figura 36. Visualización del nuevo CAD.

A continuación se procede a realizar un nuevo análisis de tensiones, para observar los cambios y mejoras que se ha conseguido.

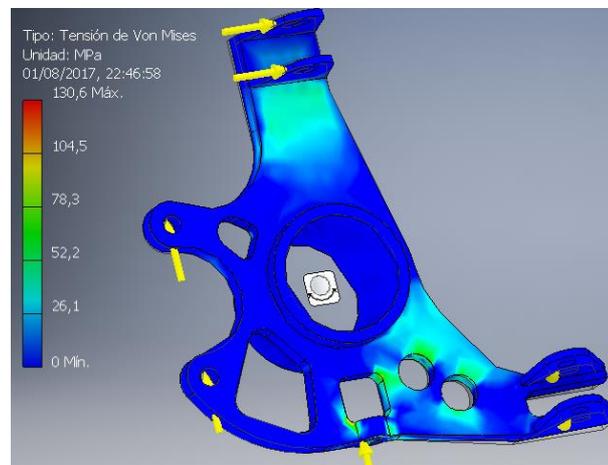


Figura 37. Valores de tensiones con CAD modificado.

Los valores de desplazamiento también se modificaron como se observa en la siguiente figura.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

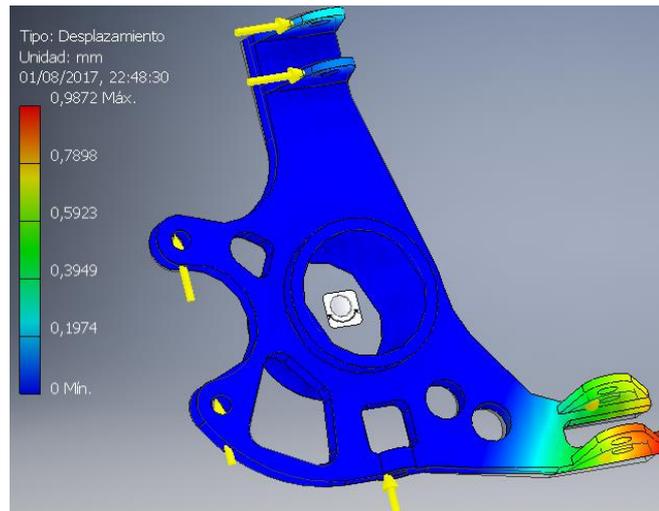


Figura 38. Valores de desplazamiento con CAD modificado.

En el coeficiente de seguridad, también se observa una ligera disminución.

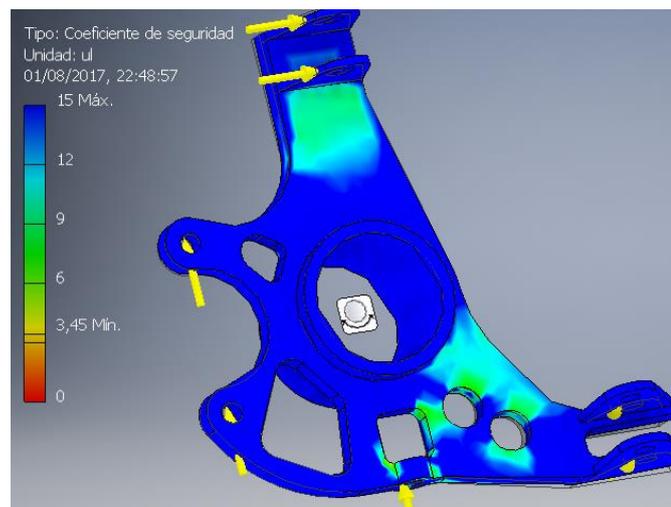


Figura 39. Valores de coeficiente de seguridad con CAD modificado.

A pesar de la mejora en la zona más afectada desde un inicio, se pueden observar que todavía se puede realizar nuevas modificaciones al CAD que no afecten en su función, funcionamiento o mecanizado.

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE MANGUETAS

Se realiza una última mejora para el diseño, con la finalidad de mejorar la eficiencia del componente. En el CAD se ha incorporado un nervio en la zona afectada como se puede observar en la figura 40.



Figura 40. Incorporación del nervio al CAD en la zona afectada.

Se consiguió disminuir los valores de tensión en la zona afectada en un 50% aproximadamente.

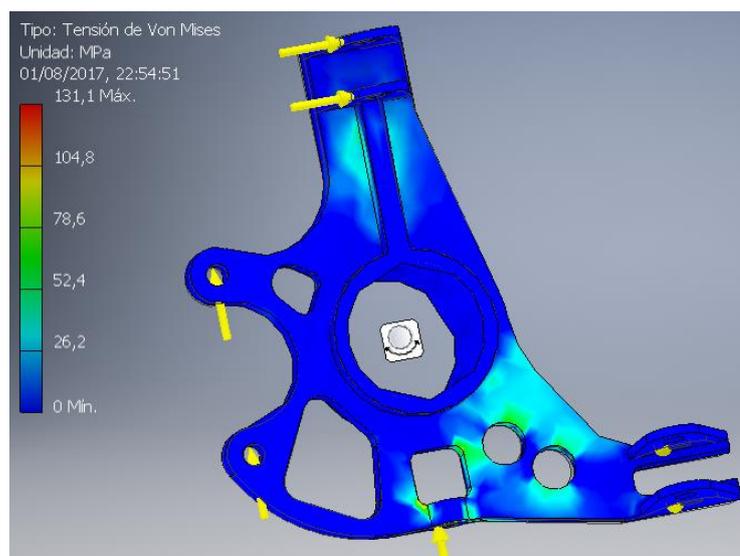


Figura 41. Tensiones con la incorporación del nervio al CAD.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

El desplazamiento se redujo notoriamente en la zona inicialmente afectada, pero se afectó con su rigidez a la parte que se sujeta el varillaje del sistema de dirección.

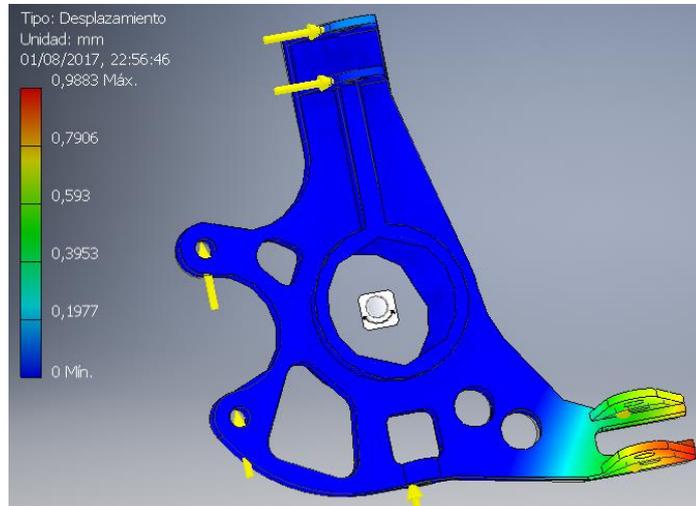


Figura 42. Desplazamiento con la incorporación del nervio al CAD.

El coeficiente de seguridad aumento como se observa en la figura 43. Esta propuesta de CAD mejorada se comparará manteniendo la geometría con el segundo material propuesto.

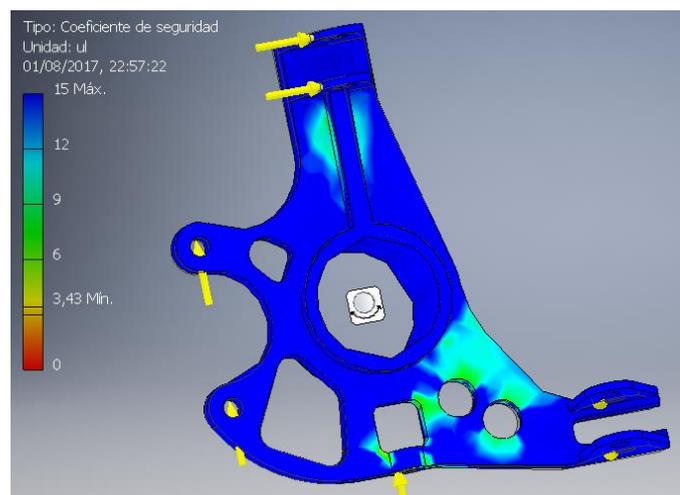


Figura 43. Coeficiente de seguridad con la incorporación del nervio al CAD.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Una vez establecido la forma de la mangueta en aluminio, que cumple con los criterios de reducir el peso y maximizar la rigidez (Fikri & Salleh, 2015), se procede a realizar el análisis en acero para comparar los resultados obtenidos. En la siguiente figura 44 se visualiza el componente en acero.



Figura 44. CAD en acero.

Las cargas y restricciones se mantienen, para poder comparar las manguetas de aluminio y acero posteriormente.

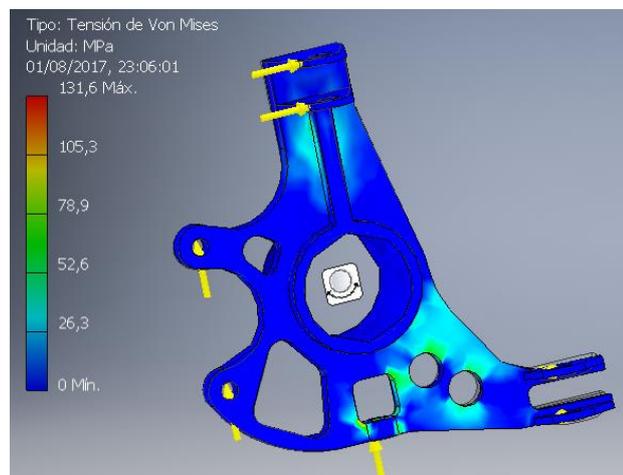


Figura 45. Desplazamiento de tensión de la mangueta de acero.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

El desplazamiento también se visualiza para poder comparar con la mangueta de aluminio, existe una reducción del desplazamiento en un 60 % aproximadamente en la zona donde se instala el sistema de varillaje de la dirección.

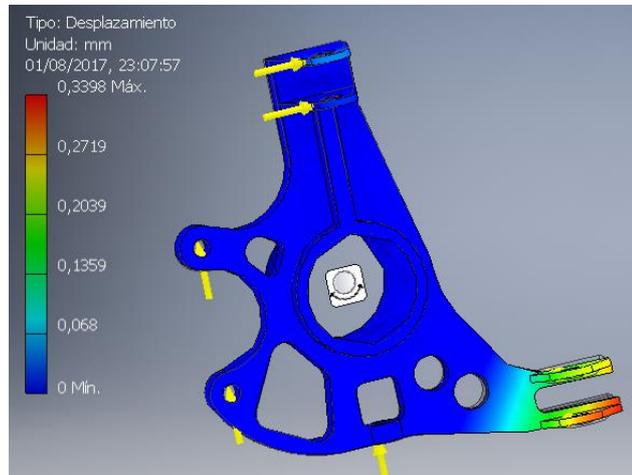


Figura 46. Análisis de desplazamiento de la mangueta de acero.

El factor de seguridad se ha visto afectado con una reducción del 50 % aproximadamente en la zona más afectada.

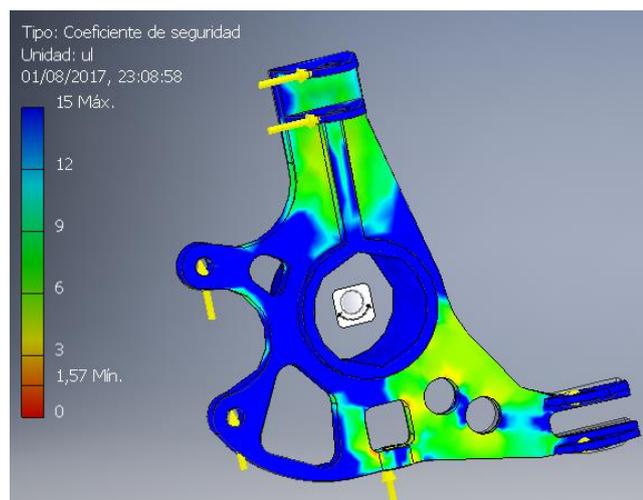


Figura 47. Análisis del coeficiente de seguridad de la mangueta de acero.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Aplicación de fuerza de giro

Adicional se ha considerado en este estudio, que los neumáticos giran sobre el eje vertical sin desplazarse el vehículo, esto con la finalidad de comparar los datos proporcionados en la tesis los señores Gabriel Cruz y Manuel Mesías, que aplican una fuerza de 731 N en el brazo de la mangueta, donde se instala la varilla del sistema de suspensión (Cruz Castro & Mesías Izurieta, 2013).

El punto crítico se encuentra en la parte superior del agujero donde apunta la flecha de color negro.

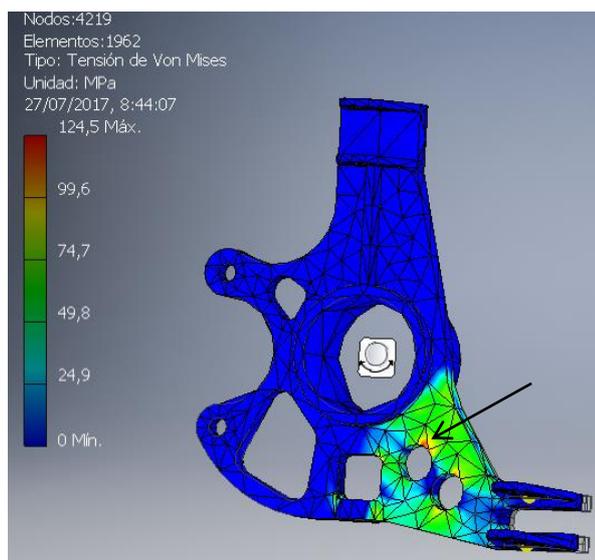


Figura 48. Tensión de Von Mises aplicando fuerza de giro.

El desplazamiento llega a 1,585 mm como máximo aplicando la carga antes mencionada como se observa en la siguiente figura 49. Esto ocurre en la zona donde se aplica la fuerza, manteniendo fijo la parte central y sin aplicarlas en el resto del componente.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

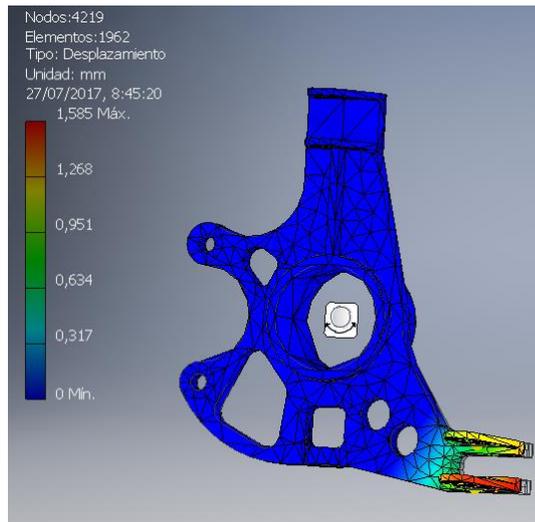


Figura 49. Desplazamiento aplicando fuerza de giro.

El coeficiente de seguridad es de 2,21 como mínimo como se observa en la siguiente figura.

La flecha apunta la zona donde se encuentra el mínimo coeficiente de seguridad en la mangueta.

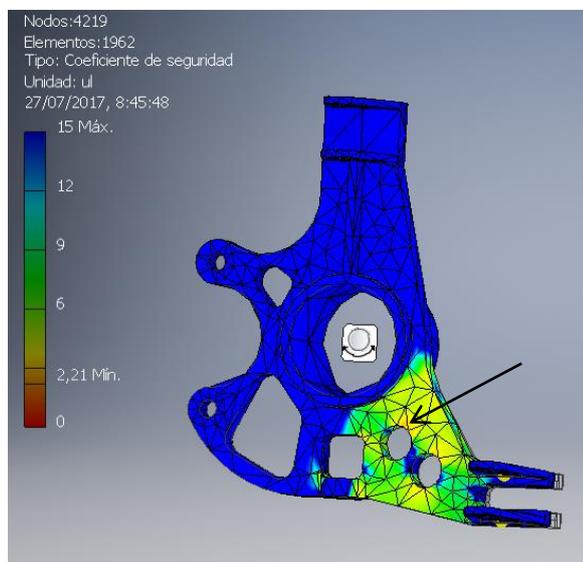


Figura 50. Coeficiente de seguridad aplicando fuerza de giro.

Estos son los resultados obtenidos mediante la utilización del software en la fase de optimización y análisis.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

En el anexo 2 se presenta los resultados de la encuesta a los coordinadores de los equipos de *Formula Student* Nacionales, además como proceso de verificación se procede al mecanizado por software.

Proceso de mecanizado por software

Para el proceso de mecanizado se consideró el *software* NX 10, bajo las condiciones que el material a utilizarse para la mangueta es aluminio 7075 T6 y la máquina es de tres ejes. A continuación, en la tabla se describe los procesos y las velocidades.

Tabla 3.

Procesos del mecanizado y velocidades.

Ord.	Proceso	Herr.	Vc	Avance	V. Av.
				mm/rev	mm/min
1	Desbaste	End mil 12	120	0,30	3819,6
2	Semi acabado	Ball mil 6	150	0,20	6366
3	Acabado	Ball mil 4	120	0,15	5729,4

En la próxima tabla se evidencia las revoluciones que deben trabajar el husillo de la máquina, la cantidad de material removido en un minuto y la potencia que se requiere para el trabajo.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Tabla 4.

Procesos del mecanizado de la mangueta

Ord.	Proceso	N	Q	Potencia
		r.p.m	cm ³ /min	kw
1	Desbaste	3183	3514	70
2	Semi acabado	7957	5856	29
3	Acabado	9549	659	13

Desbaste

Es esta fase se remueve la mayor cantidad de material con una herramienta de dimensiones menores a la separación entre los tirantes de la mangueta como se muestra en la simulación (figura 51), pero de mayor tamaño a las herramientas de los posteriores procesos.

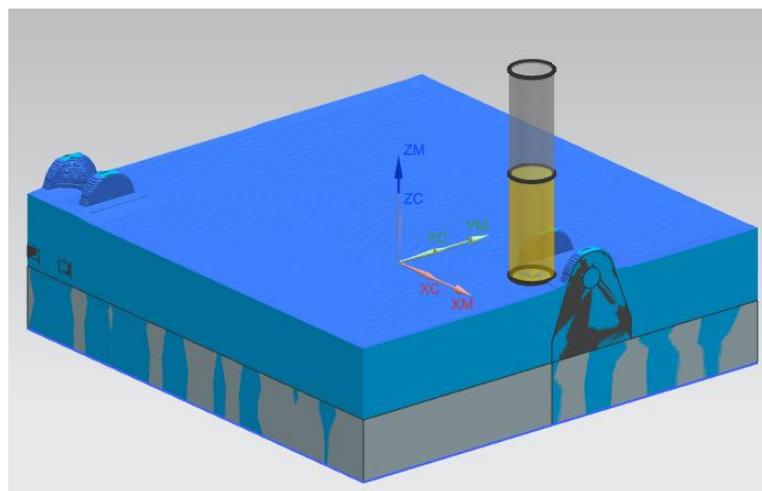


Figura 51 Bloque de aluminio a desbastar.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

En la figura 52 se observa la mangueta terminada la fase de desbaste, por eso tiene sectores con acumulación de material.

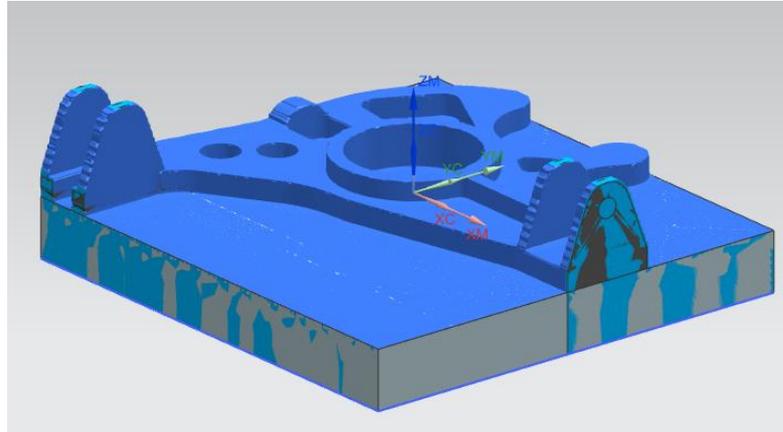


Figura 52. Desbaste de la mangueta.

Para mejorar el acabado superficial se debe realizar una pasada adicional a la mangueta con una herramienta a mayor velocidad a la inicial y la fase se denomina semi acabado.

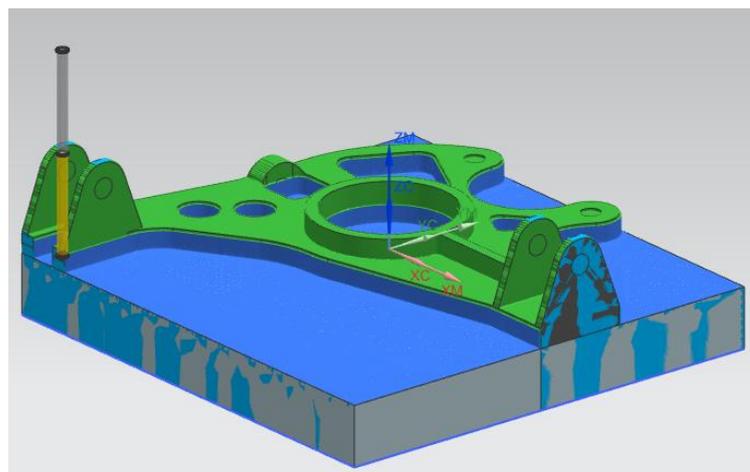


Figura 53. Mecanizado de la parte delantera de la mangueta.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Una vez semi desbastada la superficie delantera, se realizan el acabado a velocidades mayores a las iniciales como se observa en la figura 54.

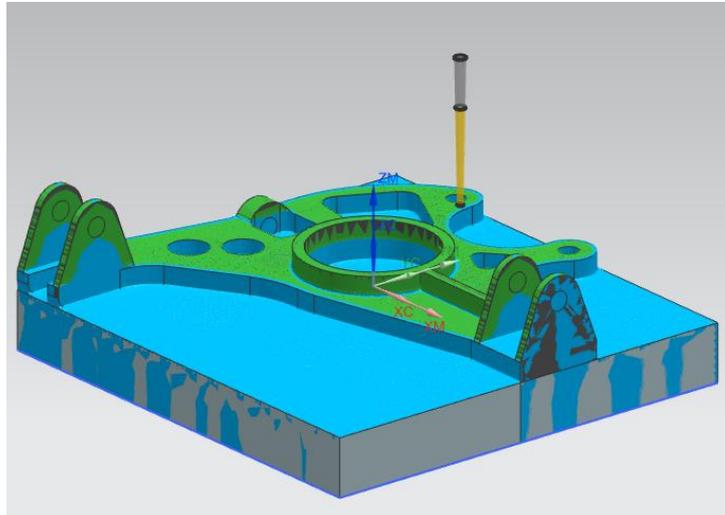


Figura 54. Mangueta en la fase de terminado.

A continuación se presentan los códigos G más utilizados en la realización de la mangueta y en anexo 6 una parte de la programación.

G0 para el posicionamiento rápido;

G1 para la interpolación lineal;

G17 para trabajar en el plano XY

G21 para el comienzo de uso de unidades métricas;

G40 para cancelar la compensación de radio de curvatura de la herramienta;

G54 para traslado de origen

G80 para anular los ciclos fijos.

G90 para operar en valores absolutos;

G91 para operar de modo incremental;

M6 para cambio de herramienta;

M8 para abrir el paso del refrigerante;

OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE MANGUETAS

Dicho código generado proporciona las bases para el proceso de mecanizado por la máquina CNC en el proceso de fabricación.

Proceso de mecanizado por máquina CNC

Finalmente se establece el método de mecanización, el cual se realizó mediante una máquina CNC (VDL 600A), la mangueta propuesta se fabricó en aluminio 7075 T6 en un bloque de 240x230x90. A continuación se presentan las características básicas de la fresadora y el proceso de mecanizado.

La máquina utilizada en la construcción de la mangueta tiene en los ejes X/Y/Z un recorrido de 600/420/520 mm respectivamente. La mesa de trabajo tiene 800x420 mm. La velocidad máxima del eje de rotación principal es de 8000/10000. La capacidad del cambiador de la herramienta es de 16/24. El peso es de 4800 kg y la máxima carga de la mesa es de 500 kg. En la figura 55 se visualiza la fresadora utilizada.



*Figura 55.*Fresadora vertical de tres ejes.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

A continuación se describe los procesos utilizados y los principales datos utilizados en la fabricación de la mangueta.



Figura 56. Proceso de alivianado de la mangueta.

La mangueta tiene un peso de 1,155 kg, incluido el rodamiento, el mismo que pesa 0,445 kg (figura 57). Con una dimensión de 34x64x37 de la marca SKF modelo BAH-0092, utilizado en los vehículos Chevrolet Aveo en los ejes de las ruedas delanteras (Anexo 3).



Figura 57. Pesaje de la mangueta con rodamiento.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Se verifica que los pernos pasen con facilidad por los agujeros superiores de la mangueta, anclándose a los tirantes de la suspensión como se observa en la figura 58.



Figura 58. Verificación del anclaje superior de la suspensión.

De igual forma debe revisarse que el tirante inferior de la suspensión se acople con facilidad y no obstruyan el libre movimiento que la mangueta debe tener.



Figura 59. Verificación del anclaje inferior de la suspensión.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Se comprueba que la mordaza de freno se acople con facilidad y que los pernos ingresen sin un juego excesivo para evitar posteriores deformaciones.



Figura 60. Verificación del anclaje de las mordazas de freno.

Una vez comprobado los sistemas de anclajes de la mangueta al sistema de frenos, suspensión y dirección, se procede a empernar la manzana al adaptador para el disco de freno. Los pernos son M10 de grado 5.



Figura 61. Instalación de la manzana y adaptador.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Los pernos que sujetan al disco de freno son Allen M10 de grado 5.



Figura 62. Instalación del disco de freno al adaptador.

Instalado el disco de freno a la manzana se procede a insertar a la mangueta, mediante una prensa hidráulica por el tipo de ajuste entre el eje de la manzana y rodamiento como se observa en la figura 63.



Figura 63. Instalación de la manzana a la mangueta.

Acoplada la manzana a la mangueta por ajuste forzado, se procede a instalar en el vehículo, verificando que los pernos que sujetan a la suspensión y dirección tengan tuercas de seguridad nuevas.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS



Figura 64. Instalación de la mangueta.

La llanta debe ser instalada apretando las tuercas en cruz a la especificación según el tipo de perno.



Figura 65. Instalación de la rueda.

Finalmente se presentará el análisis de los resultados de la metodología y el método empleado.

Análisis de los Resultados

El análisis de los resultados se inició comparando la mangueta de acero y aluminio propuesta en esta investigación como se observa en la tabla 2.

Tabla 4.

Comparación de las manguetas.

Mangueta	Peso (kg)	Factor de seguridad	Desplazamiento (mm)	Módulo de Von Mises (MPa)
Acero propuesta	1,835	1.57	0.339	131,6
Aluminio propuesta	0,713	3,43	0,988	131,1

El material seleccionado para construir la mangueta es el aluminio 7075 T6 por presentar un 38,9 % del peso del componente en acero y un 218,5 % mayor el factor de seguridad, aunque el desplazamiento se vea afectado.

Otra comparación se realiza entre la investigación de los señores ingenieros Gabriel Cruz y Diego Mesías en su tesis “Diseño, construcción e implementación de sistemas de suspensión, dirección y frenos del vehículo de competencia fórmula SAE 2012”, y los datos proporcionados en el análisis de este estudio (Cruz Castro & Mesías Izurieta, 2013).

Se debe considerar que la comparativa se realiza solamente aplicando fuerza en el brazo de anclaje del sistema de dirección. Los datos se observa en la tabla 3.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Tabla 5.

Comparación de las manguetas inicial y propuesta.

Mangueta	Peso (kg)	Factor de seguridad	Desplazamiento (mm)
Acero inicial	2,135	1,675	2,670
Aluminio propuesta	0,670	2,21	1,585

Los valores de la tabla nos indica que el coeficiente de seguridad de la mangueta de aluminio en esta prueba subió un 132 % y su desplazamiento se redujo en un 59.4 %.

Existen varios trabajos en relación a la construcción de manguetas de vehículos Fórmula SAE que utilizan aluminio 7075 T6 que constan en la bibliografía de este trabajo y se referencian en la tabla 1, motivo por el cual se determinó construir en este material.

Al vehículo no alcanzó los 75 metros en menos de 4 segundos con ninguna de las dos manguetas (acero – aluminio), esto se debe a que la reducción del peso de la mangueta representa un 0,54 % del peso del vehículo.

Soportó las cargas que en la aceleración se generó, el no cumplir con los tiempo establecido se debe principalmente por la restricción de aire que tiene por reglamento el motor y el peso excesivo que se mantiene.

Como tercer análisis de la presente investigación se ha podido comprobar mediante encuestas y desarrollo del producto, que es factible construir la mangueta propuesta con una fresadora CNC de tres ejes con excepción de los agujeros laterales que requieren de un taladrado adicional.

La encuesta fue realizada al Ing. Jonathan Pozo, docente de la Universidad Politécnica Salesiana y al Ing. Henry Iza docente de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Sobre la primera pregunta *Observe los planos del Anexo A, y de acuerdo a su experiencia, manifieste si la mangueta es mecanizable en una máquina CNC*. En la figura se observa que los dos docentes encuestados manifiestan que la mangueta propuesta si es mecanizable en una máquina CNC.

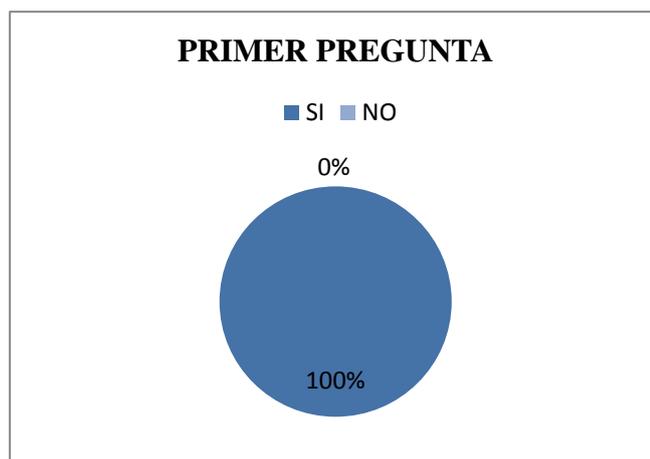


Figura 66. Factibilidad de mecanizar en una máquina CNC.

En la segunda pregunta sobre *Cuál de las siguientes máquinas CNC, cree usted que permitiría mecanizar la mangueta*. El docente de la ESPE señala una de cinco ejes y el de la Salesiana una de tres ejes como se visualiza en la figura 67.

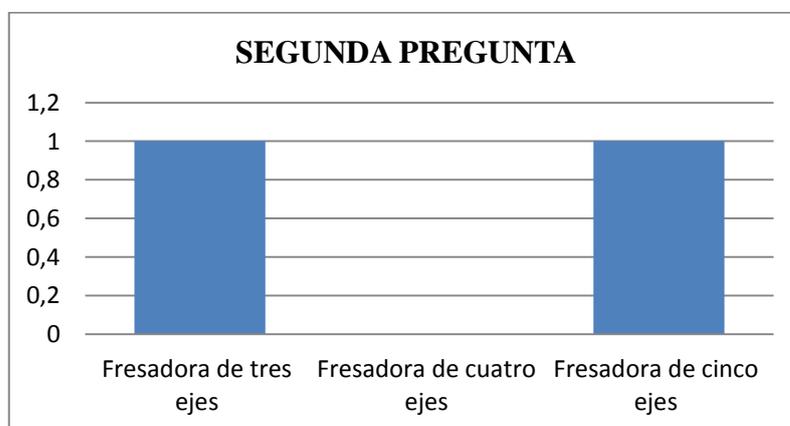


Figura 67. Tipo de fresadora para mecanizar.

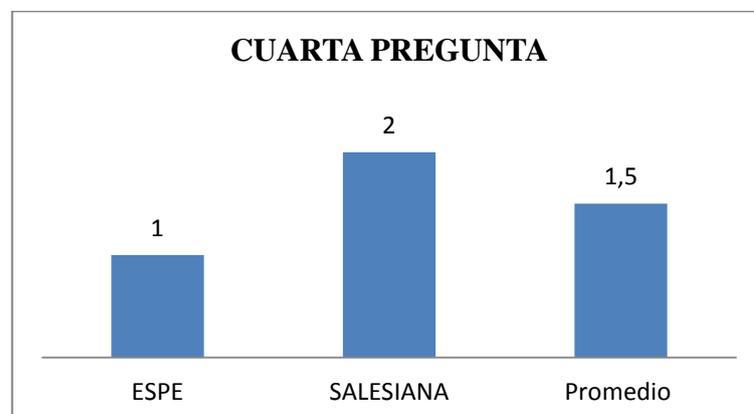
OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

La tercera pregunta *De acuerdo a su experiencia considera que la mangueta si se puede instalar en un vehículo Formula SAE*. Los dos encuestados determinan que si es instable en el vehículo.



Figura 68. Tipo de fresadora para mecanizar.

Sobre la cuarta pregunta *Considerando una escala del 1 al 10, Uno como fácil y diez como imposible, Que dificultad encuentra en instalar la mangueta*. El promedio seria de 1.5, considerándose como de fácil montaje como se muestra (Figura 69).



OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

Figura 69. Facilidad de montaje de la mangueta.

Finalmente sobre la quinta pregunta sobre si *La universidad a la cual representa su equipo de competencia, está en la posibilidad de construir la mangueta propuesta.* Ellos consideran que si poseen la tecnología para mecanizar la mangueta propuesta.

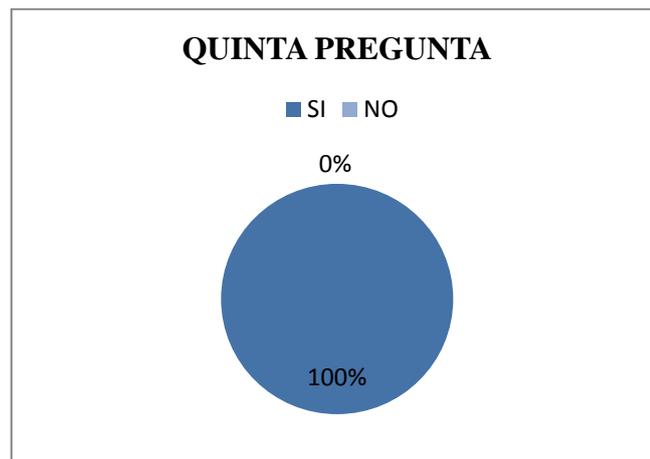


Figura 70. Posibilidad de construir la mangueta.

Una vez realizada confirmado que se puede mecanizar y es factible su instalación se procede a comparar el peso de la mangueta actual de acero con la propuesta en la presente investigación.

En la figura se observa los pesos de las manguetas en acero que tiene el vehículo y la construida en aluminio, realizadas en una balanza digital.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS



Figura 71. Pesaje de la mangueta de acero.

El peso de la mangueta de aluminio incluye al rodamiento que es de 445 gramos según indica el fabricante. Se observa en la figura 72 que la mangueta de acero actual tiene una perforación en la parte superior, esto se debe al análisis que se realizó en su diseño, donde las fuerzas calculadas se aplican individualmente aunque en las pruebas de frenado y aceleración realizadas soportaron las cargas.



Figura 72. Mangueta de acero.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

El acabado de la mangueta de aluminio como se observa en la figura es mejor, puede aplicarse una fresadora de cinco ejes para realizar los agujeros en la misma máquina sin moverse el componente.



Figura 73. Manguetas de acero y aluminio.

Finalmente se realiza las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de investigación.

Conclusiones

La investigación documental bibliográfica permitió obtener las magnitudes de las fuerzas a aplicar en la mangueta delantera del vehículo prototipo.

Se utilizó el *software Inventor* como herramienta de optimización y análisis para obtener una mangueta con un coeficiente de seguridad del 132 % superior, comparado con el componente patrón.

Los datos favorables en las encuestas nos permitieron realizar la simulación de mecanización mediante una fresadora de tres ejes y su posterior construcción, reduciéndose a un 31,38 % del peso de la mangueta patrón.

La mangueta fue instalada en el vehículo, para realizar las comparativas de aceleración, obteniéndose resultados similares registrados con la mangueta de acero patrón, esto se debe, por que la reducción del peso de la mangueta, representa un 0,54 % del peso vehicular.

Recomendaciones

Modificar la geometría del sistema de suspensión para comprobar si se logra reducir el peso o aumentar su coeficiente de seguridad.

Aplicar mejoras en los nervios de los soportes del varillaje del sistema de dirección y de empalmes en las aristas a 90°, lo cual podría ayudar a que la mangueta obtenga mayor rigidez y coeficiente de seguridad.

Bibliografía

- Alcalá Cabrelles, J., Llanes Pitarch, L. M., García, M., Manuel, A., & Salán Ballesteros, M. N. (2002). *Fractura de materiales*: Edicions UPC.
- Avilés, R. (2005). *Análisis de fatiga en máquinas*: Ediciones Paraninfo, SA.
- Bonte, M. H. A., Van den Boogaard, A. H., & Huétink, J. (2008). An optimisation strategy for industrial metal forming processes. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 571-586.
- Boonpan, A., & Bureerat, S. (2012). Multi-stage design of an automotive component. *International Journal of Vehicle Design*, 60(1/2), 84-99.
- Callister, W. D. (2002). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales* (Vol. 1): Reverté.
- Cruz Castro, G. A., & Mesías Izurieta, D. F. (2013). *Diseño, construcción e implementación de sistemas de suspensión, dirección y frenos del vehículo de competencia fórmula SAE 2012*. LATACUNGA/ESPE/2013.
- Chiandussi, G., Gaviglio, I., & Ibba, A. (2004). Topology optimisation of an automotive component without final volume constraint specification. *Advances in Engineering Software*, 35(10), 609-617.
- Durgun, İ., & Yildiz, A. R. (2012). Structural design optimization of vehicle components using cuckoo search algorithm. *Materials Testing*, 54(3), 185-188.
- Farias, L. T., Schommer, A., Haselein, B. Z., Soliman, P., & de Oliveira, L. C. (2015). Design of a Brake Caliper using Topology Optimization Integrated with Direct Metal Laser Sintering: SAE Technical Paper.
- Fikri, Z., & Salleh, M. (2015). Design And Development Functional Prototyping Formula SAE Knuckle.
- Formula Student Rules 2017, V1.1 C.F.R. (2016).
- Jawad, B. A., & Baumann, J. (2002). Design of Formula SAE Suspension. *SAE International* 382. doi: 10.4271/2002-01-3310
- Jawad, B. A., & Polega, B. D. (2002). Design of Formula SAE Suspension Components: SAE Technical Paper.
- Joshi, T., & Joshi, V. (2016). Design and Analysis of Suspension and Steering Components of F1 Prototype. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 2(4).
- Kakria, S., & Singh, D. (2015). CAE analysis, optimization and fabrication of formula SAE vehicle structure: SAE Technical Paper.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*: Pearson Educación.
- Maranan, V., Simpson, T. W., Palmer, T., & Dickman, C. J. (2016). *Application of Topology Optimization and Design for Additive Manufacturing Guidelines on an Automotive Component*. Paper presented at the ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference.
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*: Pearson educación.
- Muzzupappa, M., Barbieri, L., & Bruno, F. (2011). Integration of topology optimisation tools and knowledge management into the virtual Product Development Process of automotive components. *International Journal of Product Development*, 14 - 33.

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

- Prajwal, P. B. Design Optimization of Formula One Student Sports Car Upright Using Hypermesh. *International Journal Of Mechanical And Industrial Engineerin (IJMIE)*, ISSN(2231-6477), 54-59.
- Qiu, L. M., Sun, L. F., Liu, X. J., & Zhang, S. Y. (2013). Material selection combined with optimal structural design for mechanical parts. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A.*, 383-392.
- Reiher, T., & Koch, R. (2015). *FE-Optimization and data handling for Additive Manufacturing of structural parts*. Paper presented at the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium.
- Reyes Jiménez, D. A. (2016). *Diseño de las manguetas delanteras y posteriores para un vehículo Formula SAE mediante técnicas de optimización estructural y manufactura con CNC*. Universidad del Azuay.
- Rodríguez, J. L. C. (2004). *Elementos de máquinas: teoría y problemas*: Universidad de Oviedo.
- Sampo, E., Sorniotti, A., & Crocomb, A. (2010). Chassis Torsional Stiffness: Analysis of the Influence on Vehicle Dynamics (No. 2010-01-0094). *SAE INTERNATIONAL*.
- SCHUCH, F. W. (1999). *Manual de la Técnica del Automóvil*: Reverte.
- Sedláček, F. (2014). SVOČ–FST 2014.
- Simões, J. (2001). Icarus: the design process of a conceptual vehicle. *Materials & Design*, 22(4), 251-257.
- Uzair N., M., Muhammad, B. M., & Umair N., M. (2013). Application of Advance CAE Tools to Design & Manufacture a Racecar. *CogInfoCom*, 671 - 676.
- Yildiz, A. R., Kaya, N., Ozturk, F., & Alankus, O. (2004). Optimal design of vehicle components using topology design and optimisation. *International Journal of Vehicle Design*, 34(4), 387-398.

Anexo 1. Encuesta



Encuesta para los Coordinadores de los Equipos Formula SAE en Ecuador.

Nombre de la universidad: _____

Fecha: _____

Objetivo: Determinar si la mangueta optimizada con la ayuda del Software Inventor, es mecanizable con equipo CNC, el grado de dificultad para el montaje y desmontaje que observan los Coordinadores de los equipos de las Universidades nacionales que han fabricados vehículos Formula SAE.

1. Observe los planos del Anexo A, y de acuerdo a su experiencia, manifieste si la mangueta es mecanizable en una máquina CNC.

Si No

Si selecciono NO, indique usted las consideraciones por las cuales, no se podría mecanizar:

2.Cuál de las siguientes máquinas CNC, cree usted que permitiría mecanizar la mangueta.

- A. Fresadora de tres ejes.
- B. Fresadora de cuatro ejes.
- C. Fresadora de cinco ejes.

3. De acuerdo a su experiencia considera que la mangueta si se puede instalar en un vehículo Formula SAE.

Si No

4. Considerando una escala del 1 al 10, Uno como fácil y diez como imposible, Que dificultad encuentra en instalar la mangueta

Valor

5. La universidad a la cual representa su equipo de competencia, está en la posibilidad de construir la mangueta propuesta.

Si No

Gracias por su aporte

Anexo 2. Encuestas llenas



Encuesta para los Coordinadores de los Equipos Formula SAE en Ecuador.

Nombre de la universidad: Universidad Politécnica Salesiana

Fecha: 4 de agosto del 2017

Objetivo: Determinar si la mangueta optimizada con la ayuda del Software Inventor, es mecanizable con equipo CNC, el grado de dificultad para el montaje y desmontaje que observan los Coordinadores de los equipos de las Universidades nacionales que han fabricados vehículos Formula SAE.

1. Observe los planos del Anexo A, y de acuerdo a su experiencia, manifieste si la mangueta es mecanizable en una máquina CNC.

Si No

Si selecciono NO, indique usted las consideraciones por las cuales, no se podría mecanizar:

- 2.Cuál de las siguientes máquinas CNC, cree usted que permitiría mecanizar la mangueta.

- A. Fresadora de tres ejes.
B. Fresadora de cuatro ejes.
C. Fresadora de cinco ejes.

3. De acuerdo a su experiencia considera que la mangueta si se puede instalar en un vehículo Formula SAE.

Si No

4. Considerando una escala del 1 al 10, Uno como fácil y diez como imposible, Que dificultad encuentra en instalar la mangueta

Valor

5. La universidad a la cual representa su equipo de competencia, está en la posibilidad de construir la mangueta propuesta.

Si No

Gracias por su aporte

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS



Encuesta para los Coordinadores de los Equipos Formula SAE en Ecuador.

Nombre de la universidad: De las Fuerzas Armadas Espe Latacunga

Fecha: 26 Junio 2017

Objetivo: Determinar si la mangueta optimizada con la ayuda del Software Inventor, es mecanizable con equipo CNC, el grado de dificultad para el montaje y desmontaje que observan los Coordinadores de los equipos de las Universidades nacionales que han fabricados vehículos Formula SAE.

1. Observe los planos del Anexo A, y de acuerdo a su experiencia, manifieste si la mangueta es mecanizable en una máquina CNC.

Si No

Si selecciono NO, indique usted las consideraciones por las cuales, no se podría mecanizar:

•

2.Cuál de las siguientes máquinas CNC, cree usted que permitiría mecanizar la mangueta. Por favor subraye.

- A. Fresadora de tres ejes.
- B. Fresadora de cuatro ejes.
- C Fresadora de cinco ejes.

3. De acuerdo a su experiencia considera que la mangueta si se puede instalar en un vehículo Formula SAE.

Si No

4. Considerando una escala del 1 al 10, Uno como fácil y diez como imposible, Que dificultad encuentra en instalar la mangueta

Valor

5. La universidad a la cual representa su equipo de competencia, está en la posibilidad de construir la mangueta propuesta.

Si No

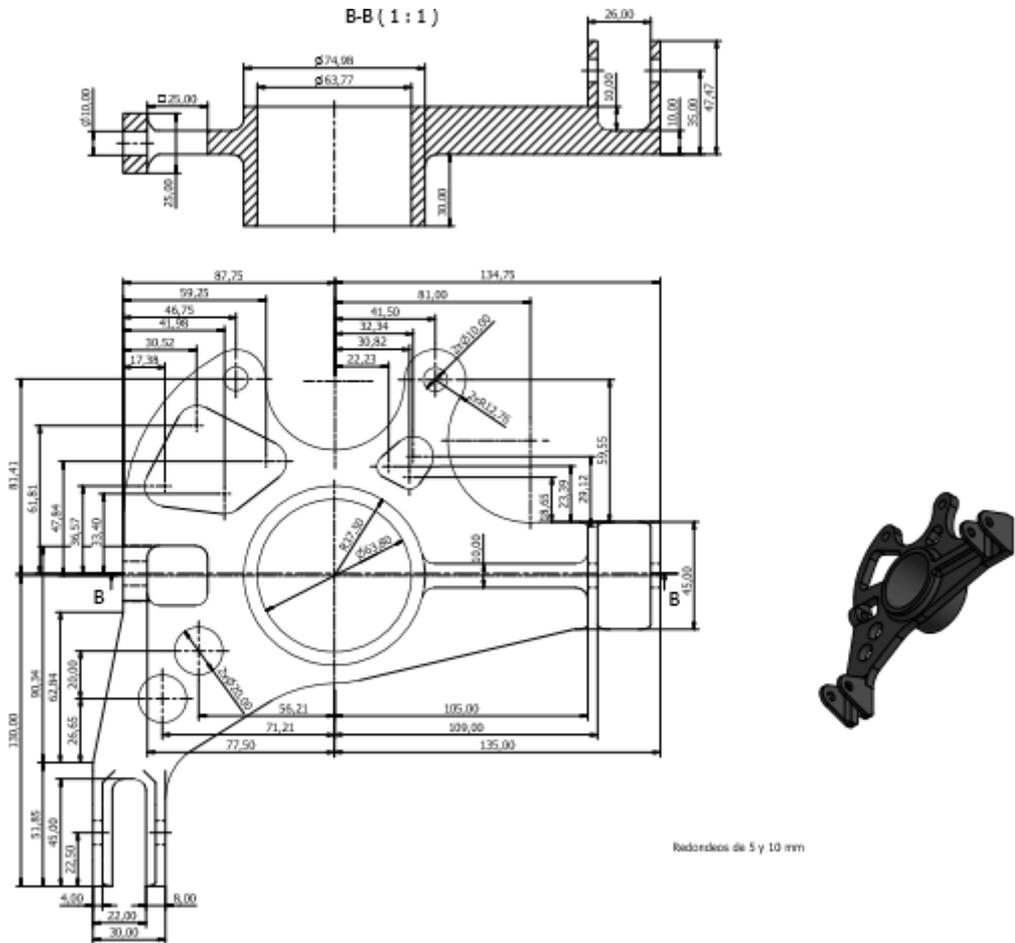
Gracias por su aporte

Anexo 3. Datos del rodamiento

Brand	SKF
Item Number	BAH-0092
Category	Angular Contact Ball Double Row
Weight	0,445 kg
Inner (d) MM	34
Outer (D) MM	64
Width (B) MM	37

Fuente: <http://webshop.abfbearings.com/Bearing/BAH-0092-SKF/709599>

Anexo 5. Plano de la mangueta



Anexo 6. Parte del código G para la fabricación de la mangueta

O1003
G0 G30 G91 Z0
G0 G90 G17 G21 G40 G80 G90 G64
G0 G90 G54 X0 Y0
(Horizontal Roughing)
T5 M6
M8
G90 G0 X44.188 Y173.529 S1500 M3
G90 G43 Z10. H5
G1 Z6.643 F120.
X11.218 Z-5.357
X-123.571
Y-147.271
X161.473
Y173.529
X11.218
Y163.129
X-113.171
Y-136.871
X151.073
Y163.129
X11.218
Y152.729
X-102.771
Y-126.471
X140.673
Y152.729
X11.218
G0 Z10.
G1 X23.017 Y142.329 F3183.
Z6.643 F120.
X17.993 Z4.814
X18.364 Y141.962 Z4.624
X19.346 Y140.666 Z4.032
X19.776 Y139.93 Z3.722
X20.362 Y138.622 Z3.201
X20.838 Y136.882 Z2.544
X20.973 Y135.866 Z2.171
X21.009 Y130.786 Z0.322
X20.941 Y129.77 Z-0.049
X20.77 Y128.754 Z-0.424
X20.108 Y126.722 Z-1.202
X19.589 Y125.706 Z-1.617
X18.917 Y124.69 Z-2.06
X18.055 Y123.674 Z-2.545
X16.924 Y122.658 Z-3.098
X15.282 Y121.606 Z-3.808
X14.266 Y121.144 Z-4.214
X13.25 Y120.802 Z-4.605
X12.234 Y120.565 Z-4.984

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

X11.218 Y120.435 Z-5.357
X-11.134 Y120.439
X-12.487 Y120.626
X-14.182 Y121.135
X-15.289 Y121.642
X-16.214 Y122.192
X-17.23 Y122.958
X-18.246 Y123.946
X-18.856 Y124.69
X-19.527 Y125.706
X-20.044 Y126.722
X-20.434 Y127.738
X-20.709 Y128.754
X-20.946 Y130.786
X-20.913 Y135.866
X-20.538 Y137.898
X-20.187 Y138.914
X-19.715 Y139.93
X-19.097 Y140.946
X-17.934 Y142.329
X-92.371
Y-116.071
X130.273
Y142.329
X17.993
X18.364 Y141.962
X19.346 Y140.666
X19.776 Y139.93
X20.362 Y138.622
X20.838 Y136.882
X20.973 Y135.866
X21.009 Y130.786
X20.941 Y129.77
X20.77 Y128.754
X20.108 Y126.722
X19.589 Y125.706
X18.917 Y124.69
X18.055 Y123.674
X16.924 Y122.658
X15.282 Y121.606
X14.266 Y121.144
X13.25 Y120.802
X12.234 Y120.565
X11.218 Y120.435
G0 Z10.
G1 X28.032 Y119.641 F3183.
Z6.643 F120.
X26.846 Y117.961 Z5.894
X25.006 Y115.939 Z4.899
X23.876 Y114.923 Z4.346
X22.533 Y113.9 Z3.732
X20.376 Y112.568 Z2.809
X20.709 Y111.482 Z2.395
X21.001 Y109.45 Z1.648
X20.993 Y104.37 Z-0.201

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

X20.883 Y103.354 Z-0.573
X20.671 Y102.338 Z-0.95
X20.351 Y101.322 Z-1.338
X19.912 Y100.306 Z-1.741
X19.334 Y99.29 Z-2.166
X18.33 Y97.971 Z-2.77
X17.314 Y96.976 Z-3.287
X16.298 Y96.207 Z-3.751
X15.282 Y95.606 Z-4.181
X14.266 Y95.144 Z-4.587
X13.25 Y94.8 Z-4.977
X12.234 Y94.564 Z-5.357
X10.202 Y94.399
X-8.086 Y94.391
X-11.134 Y94.433
X-12.15 Y94.561
X-13.166 Y94.796
X-14.408 Y95.226
X-15.198 Y95.595
X-16.289 Y96.242
X-17.568 Y97.258
X-18.527 Y98.274
X-19.272 Y99.29
X-19.849 Y100.306
X-20.29 Y101.322
X-20.61 Y102.338
X-20.931 Y104.37
X-20.938 Y109.45
X-20.845 Y110.466
X-20.648 Y111.482
X-20.322 Y112.555
X-22.473 Y113.886
X-24.483 Y115.505
X-26.289 Y117.353
X-27.534 Y118.96
X-28.793 Y120.985
X-29.756 Y123.
X-30.472 Y125.02
X-31.038 Y127.545
X-31.346 Y130.855
X-31.339 Y131.929
X-81.971
Y-105.671
X88.954
X88.393 Y-104.926
X87.798 Y-103.91
X87.343 Y-102.894
X87.01 Y-101.878
X86.786 Y-100.862
X86.665 Y-99.846
X86.645 Y-94.766
X86.728 Y-93.75
X86.912 Y-92.734
X87.203 Y-91.718
X87.61 Y-90.702

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

X88.149 Y-89.686
X88.845 Y-88.67
X89.74 Y-87.654
X90.919 Y-86.638
X92.585 Y-85.622
X94.53 Y-84.891
X95.949 Y-84.606
X95.649 Y-83.59
X94.53 Y-83.358
X93.514 Y-83.039
X92.437 Y-82.574
X91.482 Y-82.035
X90.466 Y-81.305
X89.45 Y-80.366
X88.733 Y-79.526
X88.042 Y-78.51
X87.418 Y-77.296
X86.817 Y-75.462
X86.636 Y-74.446
X86.557 Y-73.43
X86.578 Y-68.35
X86.703 Y-67.334
X86.93 Y-66.318
X87.418 Y-64.931
X88.324 Y-63.27
X89.095 Y-62.254
X90.466 Y-60.921
X91.482 Y-60.191
X92.498 Y-59.623
X93.514 Y-59.188
X94.53 Y-58.868
X96.562 Y-58.538
X118.914 Y-58.573
X119.873 Y-58.768
Y131.929
X31.401
X31.317 Y129.07
X31.027 Y127.033
X30.658 Y125.531
X29.996 Y123.499
X29.369 Y121.989
X28.264 Y119.97
X26.846 Y117.961
X25.006 Y115.939
X23.876 Y114.923
X22.533 Y113.9
X20.376 Y112.568
X20.709 Y111.482
X21.001 Y109.45
X20.993 Y104.37
X20.883 Y103.354
X20.671 Y102.338
X20.351 Y101.322
X19.912 Y100.306
X19.334 Y99.29

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

X18.33 Y97.971
X17.314 Y96.976
X16.298 Y96.207
X15.282 Y95.606
X14.266 Y95.144
X13.25 Y94.8
X12.234 Y94.564
X13.079 Y84.199
X10.185 Y83.999
X-11.151 Y84.033
X-13.448 Y84.242
X-15.511 Y84.664
X-17.811 Y85.399
X-19.594 Y86.17
X-21.595 Y87.298
X-22.757 Y88.098
X-24.036 Y89.114
X-25.133 Y90.121
X-26.914 Y92.125
X-28.315 Y94.153
X-29.391 Y96.169
X-30.208 Y98.195
X-30.883 Y100.716
X-31.204 Y102.748
X-31.331 Y104.355
X-31.336 Y107.704
X-33.729 Y110.087
X-35.754 Y112.587
X-37.626 Y115.495
X-39.141 Y118.52
X-40.269 Y121.529
X-71.571
Y-95.271
X76.247
X76.363 Y-92.901
X76.679 Y-90.878
X77.205 Y-88.855
X77.957 Y-86.833
X78.962 Y-84.813
X79.34 Y-84.187
X78.167 Y-82.048
X77.534 Y-80.532
X76.934 Y-78.698
X76.398 Y-76.274
X76.157 Y-73.385
X76.178 Y-68.305
X76.379 Y-66.072
X76.782 Y-64.043
X77.607 Y-61.481
X78.287 Y-59.953
X79.193 Y-58.291
X80.039 Y-56.983
X80.81 Y-55.967
X81.845 Y-54.797
X83.216 Y-53.464

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

X84.4 Y-52.473
X86.407 Y-51.114
X88.406 Y-50.062
X90.386 Y-49.27
X92.86 Y-48.603
X94.892 Y-48.272
X96.578 Y-48.138
X109.473 Y-48.158
Y121.529
X40.292
X39.6 Y119.509
X38.492 Y116.998
X36.762 Y113.975
X35.344 Y111.965
X34.538 Y110.961
X31.958 Y108.203
X31.398 Y107.701
X31.333 Y103.257
X31.064 Y101.23
X30.59 Y99.21
X29.898 Y97.196
X28.953 Y95.166
X27.609 Y92.991
X26.605 Y91.671
X25.604 Y90.538
X23.594 Y88.686
X21.59 Y87.254
X19.589 Y86.14
X17.597 Y85.292
X15.604 Y84.67
X13.079 Y84.199
X13.797 Y73.824
X10.168 Y73.599
X-12.094 Y73.676
X-15.531 Y74.053
X-18.676 Y74.757
X-21.939 Y75.853
X-24.701 Y77.11
X-27.496 Y78.733
X-29.225 Y79.954
X-31.07 Y81.454
X-32.906 Y83.211
X-34.687 Y85.215
X-35.472 Y86.215
X-37.489 Y89.255
X-39.036 Y92.278
X-40.255 Y95.507
X-41.155 Y99.093
X-41.571 Y101.926
X-41.688 Y103.405
X-44.497 Y106.957
X-46.926 Y110.839
X-47.071 Y111.129
X-61.171
Y-84.871

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

X67.591
X67.826 Y-84.239
X66.779 Y-80.943
X66.243 Y-78.519
X66.034 Y-77.14
X65.757 Y-73.34
X65.82 Y-67.373
X66.178 Y-64.047
X66.883 Y-60.855
X68.105 Y-57.253
X69.156 Y-54.974
X70.461 Y-52.643
X71.754 Y-50.697
X73.021 Y-49.076
X74.596 Y-47.34
X76.54 Y-45.49
X78.567 Y-43.863
X81.565 Y-41.909
X84.543 Y-40.406
X87.68 Y-39.228
X91.191 Y-38.338
X94.063 Y-37.906
X96.595 Y-37.738
X99.073 Y-37.742
Y111.129
X47.116
X45.26 Y107.98
X43.455 Y105.455
X41.737 Y103.433
X41.643 Y101.89
X41.189 Y98.852
X40.425 Y95.829
X39.327 Y92.809
X37.802 Y89.702
X35.884 Y86.691
X34.4 Y84.787
X32.649 Y82.888
X30.639 Y81.037
X29.642 Y80.226
X26.648 Y78.167
X23.663 Y76.571
X20.693 Y75.363
X17.514 Y74.447
X13.797 Y73.824
X14.44 Y63.443
X10.132 Y63.199
X-12.13 Y63.276
X-16.665 Y63.715
X-20.949 Y64.609
X-25.25 Y65.994
X-29.008 Y67.644
X-33.493 Y70.237
X-35.783 Y71.883
X-38.264 Y73.943
X-40.678 Y76.301

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

X-42.867 Y78.793
X-44.138 Y80.465
X-46.155 Y83.505
X-48.294 Y87.541
X-49.984 Y91.833
X-50.771 Y94.684
Y-74.471
X55.412
X55.357 Y-73.23
X55.48 Y-66.26
X56.023 Y-61.806
X57.034 Y-57.513
X58.661 Y-52.897
X60.08 Y-49.896
X61.8 Y-46.885
X63.56 Y-44.292
X65.319 Y-42.088
X67.426 Y-39.807
X70.03 Y-37.38
X72.889 Y-35.149
X76.878 Y-32.625
X80.887 Y-30.67
X85.123 Y-29.147
X88.673 Y-28.249
Y100.729
X52.86
X51.757 Y99.204
X51.272 Y96.305
X50.199 Y92.276
X48.663 Y88.226
X46.574 Y84.115
X44.087 Y80.298
X42.046 Y77.737
X39.695 Y75.238
X37.199 Y72.966
X35.536 Y71.657
X31.551 Y68.995
X27.58 Y66.937
X23.572 Y65.37
X19.235 Y64.191
X14.44 Y63.443
X15.03 Y53.06
X10.096 Y52.799
X-13.132 Y52.924
X-18.788 Y53.534
X-24.138 Y54.71
X-29.429 Y56.471
X-34.214 Y58.64
X-39.561 Y61.791
X-40.371 Y62.373
Y-64.071
X45.27
X45.9 Y-59.421
X47.226 Y-54.056
X49.259 Y-48.452

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

X51.049 Y-44.738
X53.195 Y-41.044
X55.43 Y-37.807
X57.68 Y-35.03
X60.335 Y-32.199
X63.634 Y-29.179
X67.328 Y-26.361
X71.317 Y-23.837
X72.319 Y-23.278
X77.37 Y-20.883
X78.273 Y-20.558
Y90.329
X60.443
X59.923 Y88.587
X57.934 Y83.515
X55.288 Y78.439
X52.22 Y73.816
X49.621 Y70.611
X46.695 Y67.547
X43.631 Y64.793
X41.314 Y63.01
X37.328 Y60.347
X36.336 Y59.761
X31.367 Y57.251
X26.301 Y55.334
X21.964 Y54.155
X20.837 Y53.915
X15.03 Y53.06
X15.58 Y42.675
X10.04 Y42.399
X-13.188 Y42.525
X-19.903 Y43.194
X-21.02 Y43.376
X-27.422 Y44.842
X-29.971 Y45.69
Y-53.671
X36.608
X37.449 Y-50.509
X39.891 Y-43.936
X42.056 Y-39.515
X44.637 Y-35.135
X47.35 Y-31.259
X50.094 Y-27.916
X53.313 Y-24.528
X57.327 Y-20.91
X61.767 Y-17.573
X66.249 Y-14.755
X67.873 Y-13.876
Y79.929
X67.699
X67.156 Y78.707
X63.953 Y72.688
X60.298 Y67.265
X57.143 Y63.429
X53.646 Y59.81

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

X49.974 Y56.552
X47.091 Y54.362
X42.618 Y51.393
X41.025 Y50.478
X35.048 Y47.524
X29.029 Y45.299
X24.132 Y43.984
X22.351 Y43.626
X15.58 Y42.675
X16.63 Y32.36
X16.097 Y32.288
X9.983 Y31.999
X-14.22 Y32.176
X-19.571 Y32.709
Y-43.271
X29.044
X30.551 Y-39.362
X33.096 Y-34.235
X36.117 Y-29.171
X39.311 Y-24.661
X42.554 Y-20.753
X46.35 Y-16.803
X51.079 Y-12.595
X56.233 Y-8.768
X57.473 Y-7.988
Y49.302
X56.265 Y48.27
X52.843 Y45.698
X47.797 Y42.374
X45.633 Y41.155
X38.655 Y37.77
X31.726 Y35.254
X26.182 Y33.788
X23.798 Y33.327
X16.63 Y32.36
X18.017 Y22.085
X16.587 Y21.899
X9.907 Y21.599
X-9.171 Y21.739
Y-32.871
X22.162
X24.164 Y-28.907
X27.629 Y-23.161
X31.307 Y-18.02
X35.054 Y-13.547
X39.437 Y-9.032
X44.878 Y-4.246
X47.073 Y-2.616
Y30.294
X42.204 Y27.994
X34.386 Y25.2
X28.155 Y23.577
X25.188 Y23.02
X18.017 Y22.085
X19.357 Y11.801

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

X17.054 Y11.51
X9.831 Y11.2
X1.229 Y11.262
Y-22.471
X15.901
X19.171 Y-17.109
X23.335 Y-11.341
X27.592 Y-6.304
X32.568 Y-1.224
X36.673 Y2.388
Y15.049
X30.072 Y13.355
X26.532 Y12.707
X19.357 Y11.801
X20.661 Y1.483
X17.5 Y1.119
X11.629 Y0.867
Y-9.789
X15.392 Y-4.628
X20.162 Y0.974
X20.661 Y1.483
G0 Z10.
G1 X130.273 Y-83.485 F3183.
Z-5.357 F120.
X119.873
X119.412 Y-83.59
X119.113 Y-84.606
X119.873 Y-84.774
Y-83.485
G0 Z10.
G1 X19.024 Y124.851 F3183.
Z6.643 F120.
X18.917 Y124.69 Z6.572
X18.055 Y123.674 Z6.087
X16.924 Y122.658 Z5.534
X15.282 Y121.606 Z4.824
X14.266 Y121.144 Z4.418
X13.25 Y120.802 Z4.028
X12.234 Y120.565 Z3.648
X11.218 Y120.435 Z3.275
X-11.134 Y120.439 Z-4.86
X-12.487 Y120.626 Z-5.357
X-14.182 Y121.135
X-15.289 Y121.642
X-16.214 Y122.192
X-17.23 Y122.958
X-18.246 Y123.946
X-18.856 Y124.69
X-19.527 Y125.706
X-20.044 Y126.722
X-20.434 Y127.738
X-20.709 Y128.754

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

X-20.946 Y130.786
X-20.913 Y135.866
X-20.538 Y137.898
X-20.187 Y138.914
X-19.715 Y139.93
X-19.097 Y140.946
X-18.246 Y142.028
X-17.23 Y143.009
X-15.881 Y143.994
X-14.182 Y144.838
X-13.166 Y145.179
X-12.15 Y145.413
X-10.118 Y145.582
X11.218 Y145.537
X12.234 Y145.408
X13.25 Y145.172
X14.266 Y144.83
X15.282 Y144.367
X16.298 Y143.767
X17.335 Y142.978
X18.364 Y141.962
X19.346 Y140.666
X19.776 Y139.93
X20.362 Y138.622
X20.838 Y136.882
X20.973 Y135.866
X21.009 Y130.786
X20.941 Y129.77
X20.77 Y128.754
X20.108 Y126.722
X19.589 Y125.706
X18.917 Y124.69
X18.055 Y123.674
X16.924 Y122.658
X15.282 Y121.606
X14.266 Y121.144
X13.25 Y120.802
X12.234 Y120.565
X11.218 Y120.435
X-11.134 Y120.439
X-12.487 Y120.626
G0 Z10.
G1 X17.69 Y97.344 F3183.
Z6.643 F120.
X17.314 Y96.976 Z6.451
X16.298 Y96.207 Z5.988
X15.282 Y95.606 Z5.558
X14.266 Y95.144 Z5.152
X13.25 Y94.8 Z4.761
X12.234 Y94.564 Z4.382

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

X10.202 Y94.399 Z3.64
X-8.086 Y94.391 Z-3.017
X-9.102 Y94.452 Z-3.387
X-11.134 Y94.433 Z-4.127
X-12.15 Y94.561 Z-4.499
X-13.166 Y94.796 Z-4.879
X-14.408 Y95.226 Z-5.357
X-15.198 Y95.595
X-16.289 Y96.242
X-17.568 Y97.258
X-18.527 Y98.274
X-19.272 Y99.29
X-19.849 Y100.306
X-20.29 Y101.322
X-20.61 Y102.338
X-20.931 Y104.37
X-20.938 Y109.45
X-20.845 Y110.466
X-20.648 Y111.482
X-20.346 Y112.498
X-19.923 Y113.514
X-19.262 Y114.699
X-18.653 Y115.546
X-17.23 Y117.016
X-16.214 Y117.781
X-15.198 Y118.379
X-14.182 Y118.838
X-13.166 Y119.179
X-11.134 Y119.547
X11.218 Y119.546
X13.25 Y119.172
X14.266 Y118.829
X15.282 Y118.367
X16.571 Y117.578
X17.314 Y116.997
X18.715 Y115.546
X19.43 Y114.53
X19.987 Y113.514
X20.405 Y112.498
X20.709 Y111.482
X21.001 Y109.45
X20.993 Y104.37
X20.883 Y103.354
X20.671 Y102.338
X20.351 Y101.322
X19.912 Y100.306
X19.334 Y99.29
X18.33 Y97.971
X17.314 Y96.976
X16.298 Y96.207

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

X15.282 Y95.606
X14.266 Y95.144
X13.25 Y94.8
X12.234 Y94.564
X10.202 Y94.399
X-8.086 Y94.391
X-9.102 Y94.452
X-11.134 Y94.433
X-12.15 Y94.561
X-13.166 Y94.796
X-14.408 Y95.226
G0 Z10.
G1 X125.448 Y-106.41 F3183.
Z6.643 F120.
X124.914 Y-106.958 Z6.364
X123.994 Y-107.697 Z5.935
X122.978 Y-108.341 Z5.497
X120.946 Y-109.216 Z4.692
X119.93 Y-109.481 Z4.31
X117.898 Y-109.704 Z3.566
X96.562 Y-109.681 Z-4.2
X95.546 Y-109.56 Z-4.573
X93.467 Y-108.99 Z-5.357
X92.498 Y-108.558
X91.473 Y-107.974
X90.147 Y-106.958
X89.158 Y-105.942
X88.393 Y-104.926
X87.798 Y-103.91
X87.343 Y-102.894
X87.01 Y-101.878
X86.786 Y-100.862
X86.665 Y-99.846
X86.645 Y-94.766
X86.728 Y-93.75
X86.912 Y-92.734
X87.203 Y-91.718
X87.61 Y-90.702
X88.149 Y-89.686
X88.845 Y-88.67
X89.74 Y-87.654
X90.919 Y-86.638
X92.585 Y-85.622
X94.53 Y-84.891
X95.949 Y-84.606
X95.649 Y-83.59
X94.53 Y-83.358
X93.514 Y-83.039
X92.437 Y-82.574
X91.482 Y-82.035

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

X90.466 Y-81.305
X89.45 Y-80.366
X88.733 Y-79.526
X88.042 Y-78.51
X87.418 Y-77.296
X86.817 Y-75.462
X86.636 Y-74.446
X86.557 Y-73.43
X86.578 Y-68.35
X86.703 Y-67.334
X86.93 Y-66.318
X87.418 Y-64.931
X88.324 Y-63.27
X89.095 Y-62.254
X90.466 Y-60.921
X91.482 Y-60.191
X92.498 Y-59.623
X93.514 Y-59.188
X94.53 Y-58.868
X96.562 Y-58.538
X118.914 Y-58.573
X120.946 Y-58.985
X121.962 Y-59.35
X122.978 Y-59.837
X123.994 Y-60.467
X125.01 Y-61.275
X126.026 Y-62.323
X126.737 Y-63.27
X127.335 Y-64.286
X127.796 Y-65.302
X128.133 Y-66.318
X128.482 Y-68.35
X128.507 Y-73.43
X128.245 Y-75.462
X127.957 Y-76.478
X127.555 Y-77.494
X127.02 Y-78.51
X126.33 Y-79.526
X125.01 Y-80.952
X123.994 Y-81.758
X122.624 Y-82.574
X120.946 Y-83.242
X119.412 Y-83.59
X119.113 Y-84.606
X120.946 Y-85.012
X121.962 Y-85.386
X122.978 Y-85.886
X123.994 Y-86.53
X125.01 Y-87.356
X126.026 Y-88.431

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE MANGUETAS

X126.912 Y-89.686
X127.451 Y-90.702
X127.858 Y-91.718
X128.149 Y-92.734
X128.334 Y-93.75
X128.417 Y-94.766
X128.397 Y-99.846
X128.276 Y-100.862
X128.052 Y-101.878
X127.718 Y-102.894
X127.263 Y-103.91
X126.669 Y-104.926
X125.904 Y-105.942
X124.914 Y-106.958
X123.994 Y-107.697
X122.978 Y-108.341
X120.946 Y-109.216
X119.93 Y-109.481
X117.898 Y-109.704
X96.562 Y-109.681
X95.546 Y-109.56
X93.467 Y-108.99
X84.256 Y-99.846