

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“SELECCIÓN DE MATERIALES Y OPTIMIZACIÓN DE UNA MANGUETA EN
VEHÍCULOS BAJA SAE”**

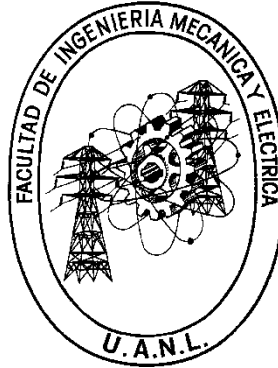
Por:
OSCAR JULIAN FARINANGO ESKOLA

EN OPCIÓN AL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

MAYO 2026

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“SELECCIÓN DE MATERIALES Y OPTIMIZACIÓN DE UNA MANGUETA EN
VEHÍCULOS BAJA SAE”**

Por:
OSCAR JULIAN FARINANGO ESKOLA

EN OPCIÓN AL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

MAYO 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "SELECCIÓN DE MATERIALES Y OPTIMIZACIÓN DE UNA MANGUETA EN VEHÍCULOS BAJA SAE", realizada por el estudiante OSCAR JULIAN FARINANGO ESKOLA, con número de matrícula 2270419, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Oscar Jesús Zapata Hernández
Director

Dra. Adriana Salas Zamarripa
Revisor

Dra. Flor Esthela Palomar Perez
Revisor

M.C. César Antono Pérez Buenrostro
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Azael Martínez de la Cruz
Secretario de Estudios de Posgrado

**SECRETARÍA DE
ESTUDIOS DE
POSGRADO**

Institución 190001

Programa 554502

Acta Núm. 4722

Ciudad Universitaria, a 20/07/2026

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a mi familia
que ha estado, está y siempre estará para mí.
A Dios y todas las personas que intervinieron
en mi pasado para lograr el exitoso presente.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) y la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz (MCIA) por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado dentro de sus programas.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado durante este posgrado.

A los doctores que influyeron en el camino para culminar con mis estudios de maestría, gracias por compartir sus conocimientos y consejos. En especial a mis asesores, Dr. Oscar Jesús Zapata Hernández y Dra. Flor Esthela Palomar Pérez, que me han guiado en el desarrollo de este proyecto.

A mi familia, mis padres Oscar y Sonia, mis hermanos Ronny y Romi, por su apoyo incondicional aun sabiendo que mi camino se encontraba lejos. Gracias por darme ánimos y siempre aconsejarme de la mejor forma, gracias por entender mis decisiones y ayudarme a mirar hacia el horizonte con esperanza.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
LISTADO DE SÍMBOLOS	xiii
RESUMEN	xvi
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problemática	1
1.2 Hipótesis	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Justificación	2
1.5 Metodología	3
CAPÍTULO 2	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1 Vehículos Baja SAE	5
2.2 Componentes principales del sistema	6
2.3 Antecedentes	7
2.4 Fundamentos de selección de materiales en ingeniería automotriz	10
2.5 Principios de optimización de componentes mecánicos	12
2.6 Fundamentos del método de Elemento Finito	13
2.7 Ecuaciones matemáticas para el método de elemento finito	15
2.7.1 Método Directo	15
2.7.2 Método Variacional.....	17
2.7.3 Método residuos ponderados	20
2.7.4 Método de balance de energía	22
2.8 Mallado, Elementos y Condiciones de frontera	24
2.8.1 Mallado (Discretización del dominio)	24

2.8.2	Tipos de elementos finitos	25
2.8.3	Condiciones de Frontera	27
2.9	Variables de respuesta en el análisis por elemento finito	28
2.9.1	Distribución de esfuerzos	29
2.9.2	Desplazamientos	29
2.9.3	Factor de seguridad	30
CAPÍTULO 3		31
SELECCIÓN DE MATERIALES		31
3.1	Introducción	31
3.2	Criterios de selección de materiales	32
3.2.1	Criterio de resistencia estructural.....	33
3.2.2	Criterio de rigidez	33
3.2.3	Criterio de peso (densidad).....	33
3.2.4	Criterio de manufacturabilidad	34
3.2.5	Criterio de costo	34
3.2.6	Criterio de tenacidad y resistencia al impacto	34
3.2.7	Criterios adicionales según el diseño.....	34
3.3	Propiedades mecánicas relevantes	35
3.4	Principios de selección.....	38
3.5	Procedimiento metodológico y comparativa de materiales	39
3.5.1	Paso 1. Selección del universo completo de materiales	40
3.5.2	Paso 2. Índice por objetivo de diseño: densidad	42
3.5.3	Paso 3. Índice de rigidez mínima: módulo de Young	43
3.5.4	Construcción e interpretación de gráficas Ashby.....	44
3.5.5	Paso 4. Índice de resistencia a la tracción mínima (Tensile Strength)	45
3.5.6	Paso 5. Índice de Tenacidad o fractura (Toughness)	47
3.5.7	Selección del material y justificación.....	49
3.5.8	Paso 6. Índice de rendimiento resistencia - costo	50
3.5.9	Paso 7. Índice de eficiencia estructural - Costo por densidad	52
3.6	Antecedentes de materiales seleccionados	55
CAPÍTULO 4		58
EXPERIMENTACIÓN COMPUTACIONAL.....		58
4.1	Introducción	58

4.2	Diseño preliminar del componente	59
4.3	Modelado CAD	60
4.4	Definición de restricción y cargas	62
4.5	Condiciones y cargas estructurales	62
4.6	Análisis estructural por elementos finitos	64
4.6.1	Propiedades del material	65
4.6.2	Condiciones de frontera	66
4.6.3	Definición de cargas	67
4.6.4	Mallado	67
4.7	Estrategia de optimización del diseño	70
4.7.1	Condiciones y criterios de optimización	70
4.7.2	Iteraciones de diseño y ajustes geométricos	71
CAPÍTULO 5		73
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		73
5.1	Introducción	73
5.2	Resultados del análisis estructural - Modelo inicial	73
5.2.1	Distribución de esfuerzos	73
5.2.2	Análisis de desplazamientos	75
5.2.3	Evaluación del factor de seguridad	76
5.3	Resultados de optimización	77
5.4	Resultados del análisis estructural - Modelo optimizado	79
5.4.1	Distribución de esfuerzos	80
5.4.2	Análisis de desplazamientos	81
5.4.3	Evaluación del factor de seguridad	83
5.5	Discusión de resultados	84
5.6	Prototipo	87
CAPÍTULO 6		89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		89
6.1	Conclusiones generales	89
6.2	Contribuciones al proyecto Baja SAE	90
6.3	Recomendaciones para trabajos futuros	91
CAPÍTULO 7		92
REFERENCIAS		92

7.1	Apéndice A - Ficha técnica de Materiales	96
7.2	Apéndice B - Cargas consideradas en el sistema	100
7.3	Apéndice C - Plano Modelo inicial	104
7.4	Plano Modelo Optimizado.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Esquema metodológico de investigación.....	4
Figura 2.- Competencia Baja SAE [13].	5
Figura 3.- Mangueta Yokomitsu [12].	6
Figura 4.- Mangueta de fibra de carbono [6].	8
Figura 5.- Optimización topológica [2].....	9
Figura 6.- Análisis de Elemento Finito - Proceso [2].	14
Figura 7.- Elementos tetraédricos, hexaédricos y prismáticos [18].	26
Figura 8.- Familia de materiales [21].....	31
Figura 9.- Principios de selección basado en Ashby [21].....	39
Figura 10.- Inicio de ANSYS Granta EduPack.	40
Figura 11.- Universo de Materiales.	41
Figura 12.- Proyecto de selección.....	41
Figura 13.- Propiedad Física - Densidad.	42
Figura 14.- Propiedad Mecánica - Modulo de Young 43	43
Figura 15.- Módulo de Young - Densidad.	45
Figura 16.- Propiedad Mecánica - Resistencia a la tracción.	46
Figura 17.- Módulo de Young - Resistencia a la tracción.....	47
Figura 18.- Propiedad mecánica - Tenacidad (Toughness).	48
Figura 19.- Limite Elástico MPa - Costo USD/kg.	50
Figura 20.- Configuración - Índice de rendimiento.	52
Figura 21.- Índice de rendimiento estructural y costo.	53
Figura 22.- Proceso de experimentación computacional.	58
Figura 23.- Ensamble general del sistema.....	59
Figura 24.- Vista frontal e isométrica de la mangueta.....	61
Figura 25.- Condición de frontera en rodamiento.....	66
Figura 26.- Distribución de cargas.	67
Figura 27.- Mallado con refinamiento fino.....	68
Figura 28.- Gráfico de convergencia del método h.	69
Figura 29.- Regiones Conservadas.	71
Figura 30.- Rediseño CAD.....	72
Figura 31.- Esfuerzos Von Mises PA66 40%CF - Modelo inicial.....	74
Figura 32.- Esfuerzos Von Mises PPA 50%CF - Modelo inicial.	74
Figura 33.- Desplazamientos PA66 40%CF - Modelo inicial.....	75
Figura 34.- Desplazamientos PPA 50%CF - Modelo inicial.	76

Figura 35.- Factor de seguridad del modelo inicial a) PA66 40%CF, b) PPA 50%CF.....	77
Figura 36.- Optimización con el 30% remoción de material.....	78
Figura 37.- Optimización con el 50% remoción de material.....	78
Figura 38.- Diseño CAD Optimizado.....	79
Figura 39.- Esfuerzos Von Mises PA66 40%CF - Modelo optimizado.	80
Figura 40.- Esfuerzos Von Mises PPA 50%CF - Modelo optimizado.....	81
Figura 41.- Desplazamientos PA66 40%CF - Modelo optimizado.	82
Figura 42.- Desplazamientos PPA 50%CF - Modelo optimizado.....	82
Figura 43.- Factor de seguridad del modelo optimizado a) PA66 40%CF, b) PPA 50%CF.....	83
Figura 44.- Configuración de impresión 3D.	87
Figura 45.- Prototipo con soportes HIPS.	88
Figura 46.- Prototipo final.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Ventajas y desventajas de elementos 3D [19].	27
Tabla 2.- Propiedades mecánicas para una mangueta [22].	36
Tabla 3.- Propiedades mínimas Aceptables [23].	37
Tabla 4.- Materiales Potenciales [21].	51
Tabla 5.- Parámetros del vehículo	63
Tabla 6.- Cargas Estructurales.	64
Tabla 7.- Poliamida 66 reforzada con 40% de fibra de carbono.	65
Tabla 8.- Poliftalamida reforzada con 50% de fibra de carbono.	65
Tabla 9.- Comparación de resultados - Modelo inicial.	84
Tabla 10.- Comparación de resultados - Modelo optimizado.	85
Tabla 11.- Comparación de masa y reducción respecto al antecedente.	86
Tabla 12.- Parámetros del sistema.	100

LISTADO DE SÍMBOLOS

A

A Area de la sección transversal

B

B Matriz Desplazamiento - Deformación

B^t Traspuesta

b Fuerzas de cuerpo

D

D Matriz constitutiva del material

d Deformaciones

D_r Diámetro de la rueda

E

E Módulo de elasticidad

F

F Fuerza aplicada

F_y Fuerza lateral

F_s Factor de seguridad

F_{max} Fuerza máxima

F_{inf} Fuerza brazo inferior

F_{sup} Fuerza brazo superior

G

g Aceleración gravitacional

H

h_{cg} Altura del centro de gravedad

K

k Matriz global de rigidez

K_e Rigidez del elemento

M

m	Masa total vehículo y conductor
m_{rueda}	Masa por rueda
N	
n	Multiplificador de carga
L	
L	Longitud del elemento
$L(u)$	Operador diferencial
L_e	Distancia entre ejes
R	
r_{rueda}	Radio de la rueda
r_{rotor}	Radio del rotor
r_{brazo}	Radio del brazo de dirección
r_{scrub}	Radio de pivote
T	
T	Torque
t_s	Tracciones aplicadas
T_{br}	Torque de frenado
U	
u	Vector de desplazamientos
U	Energía de deformación
V	
V	Volumen
W	
W	Trabajo externo

Símbolos griegos

ε	Deformación
σ_y	Límite de fluencia
δ	Variación

τ_t	Frontera de cargas
ρ	Densidad
σ	Esfuerzo
σ_{max}	Esfuerzo máximo
π	Energía potencial total
Ω	Dominio del sólido

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló la selección de materiales, análisis estructural, optimización y rediseño de una mangueta para un vehículo tipo Baja SAE, con el objetivo de mejorar su desempeño mecánico y reducir su masa sin comprometer su integridad estructural. La metodología propuesta integra la selección de materiales mediante los métodos de Ashby y el uso de la herramienta CES EduPack, el modelado CAD del componente, el análisis por elemento finito (FEA) y la optimización topológica.

En la etapa de selección de materiales, se partió de una base de datos de más de 4300 materiales, de los cuales, mediante la aplicación de índices de desempeño y criterios de diseño, se redujo el conjunto a un grupo de candidatos potenciales. Posteriormente, se seleccionaron dos materiales finales, correspondientes a polímeros reforzados con fibra de carbono, los cuales fueron evaluados mediante análisis estructural por elemento finito, lo que permitió analizar su comportamiento mecánico bajo condiciones de carga representativas.

El análisis estructural, la optimización y la evaluación de materiales se realizaron de manera conjunta, considerando cargas estáticas, de frenado y dirección propias del entorno Baja SAE. Este enfoque permitió identificar zonas críticas y comparar el desempeño de los materiales en términos de esfuerzos de Von Mises, desplazamientos y factor de seguridad, facilitando la selección del material más adecuado. Como resultado, se obtuvo un diseño optimizado con una reducción de masa cercana al 30% respecto al modelo inicial y hasta un 50.03% en comparación con el aluminio 6061, manteniendo niveles adecuados de resistencia y rigidez. Con base en ello, se determinó como opción óptima una poliftalamida reforzada con 50% de fibra de carbono (PPA 50% CF).

Finalmente, se fabricó un prototipo mediante impresión 3D utilizando una impresora Intamsys Funmat Pro 310 y materiales ABS y HIPS, disponibles en las instalaciones de la universidad. Este prototipo permitió validar la viabilidad geométrica del diseño y evidenciar la aplicabilidad de procesos de manufactura aditiva en etapas de desarrollo de componentes complejos.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Problemática

En los vehículos todoterreno tipo Baja SAE, la mangueta constituye un elemento estructural clave al conectar la suspensión con las ruedas y transmitir las cargas del terreno. Debido a las exigentes condiciones de operación, como impactos y vibraciones, este componente se fabrica normalmente en acero o aluminio, materiales resistentes pero que incrementan el peso total del vehículo, afectando su desempeño dinámico, eficiencia energética y maniobrabilidad [11,13].

Actualmente, la ingeniería automotriz busca materiales alternativos más ligeros, entre ellos polímeros de ingeniería y compuestos poliméricos, los cuales ofrecen ventajas de reducción de peso, menor costo y facilidad de manufactura. Sin embargo, su aplicación en piezas sometidas a altas cargas, como la mangueta, plantea dudas sobre resistencia, rigidez y durabilidad [2,7,16].

Estudios previos en la industria automotriz han explorado el uso de materiales poliméricos en componentes estructurales no críticos, con resultados alentadores en reducción de peso. No obstante, el problema central radica en la ausencia de una metodología clara para determinar cuál es el material más adecuado y reemplazar los metales en la mangueta, considerando criterios mecánicos, económicos y de manufactura [3,6].

Para abordar este vacío, se propone implementar estrategias sistemáticas de selección de materiales, apoyadas en herramientas especializadas como Ansys Granta EduPack para la evaluación de materiales alternativos, y en software de simulación como SolidWorks para validar el desempeño estructural del diseño.

1.2 Hipótesis

Es posible reducir el peso del componente de la mangueta de un vehículo Baja SAE seleccionando un material alternativo mediante el uso de simulación en criterios mecánicos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología de selección de materiales para la fabricación de la mangueta en un vehículo Baja SAE, que permita identificar alternativas a los metales convencionales, considerando criterios de resistencia mecánica, reducción de peso, costo y factibilidad de manufactura.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Establecer los requerimientos mecánicos, funcionales y de manufactura específicos de la mangueta tipo Baja SAE.
2. Comparar diferentes alternativas de materiales (metálicos, poliméricos y compuestos) mediante herramientas de selección y análisis multicriterio.
3. Diseñar y optimizar la geometría de la mangueta mediante modelado CAD, considerando restricciones geométricas, de peso y montaje.
4. Validar el material seleccionado a través de simulaciones estructurales que permitan predecir su comportamiento bajo condiciones de operación representativas.

1.4 Justificación

El desarrollo de vehículos todoterreno tipo Baja SAE representa un espacio académico y tecnológico donde los estudiantes aplican principios de diseño, materiales e ingeniería automotriz. La búsqueda de componentes más ligeros y eficientes contribuye a mejorar el desempeño dinámico, la estabilidad y la eficiencia energética del prototipo, dando paso a explorar materiales innovadores que pueden trasladarse a la producción de vehículos comerciales, fomentando la competitividad, reduciendo costos y promoviendo la sostenibilidad del sector automotriz [15].

En el marco de este estudio, se obtendrá conocimiento sobre las propiedades mecánicas y de manufactura de distintos materiales aplicables a la mangueta, así como su comportamiento estructural frente a cargas. La información generada incluirá criterios de selección de materiales, comparaciones con metales tradicionales y resultados de simulaciones que permitan validar la viabilidad de su uso [1,9].

De esta investigación se espera desarrollar una metodología sistemática para la selección y optimización de materiales en componentes críticos, proporcionando herramientas confiables que permitan mejorar el desempeño del vehículo. Con ello, se busca fundamentar decisiones de ingeniería orientadas a reducir peso, aumentar la eficiencia y garantizar la seguridad y durabilidad de los prototipos [5,8].

El desarrollo de esta tesis garantiza un enfoque riguroso en todas sus etapas. Los resultados permitirán guiar la selección de materiales y el diseño optimizado de la mangueta en vehículos Baja SAE, ofreciendo criterios confiables para su implementación, donde los principales beneficiarios serán los equipos estudiantiles, que podrán mejorar el desempeño de sus prototipos, y la industria automotriz, que podrá aplicar los hallazgos para innovar en materiales, diseño y sostenibilidad de componentes críticos.

1.5 Metodología

La presente investigación emplea una metodología aplicada con enfoque cuantitativo y carácter no experimental, respaldada en el uso de herramientas de ingeniería asistida por computadora, específicamente Diseño Asistido por Computadora (CAD) y Análisis por Elementos Finitos (FEA) [10].

El proceso inicia con una revisión exhaustiva de literatura para establecer el estado del arte y comprender los escenarios de operación del componente, identificando normas, especificaciones, puntos críticos y condiciones de carga propias de una mangueta utilizada en vehículos Baja SAE. Con estos insumos se desarrolla la fase de ingeniería del diseño, que contempla la selección del material con base en sus propiedades mecánicas, el modelado geométrico de la mangueta y su evaluación estructural mediante análisis por elementos finitos, integrando posteriormente un proceso iterativo de optimización orientado a reducir el peso del componente sin comprometer su desempeño mecánico.

Finalmente, los resultados obtenidos se comparan entre los diferentes materiales analizados, lo que permite determinar la alternativa más adecuada y consolidar una documentación técnica clara y estructurada. La metodología general seguida en esta investigación se ilustra en la figura 1.

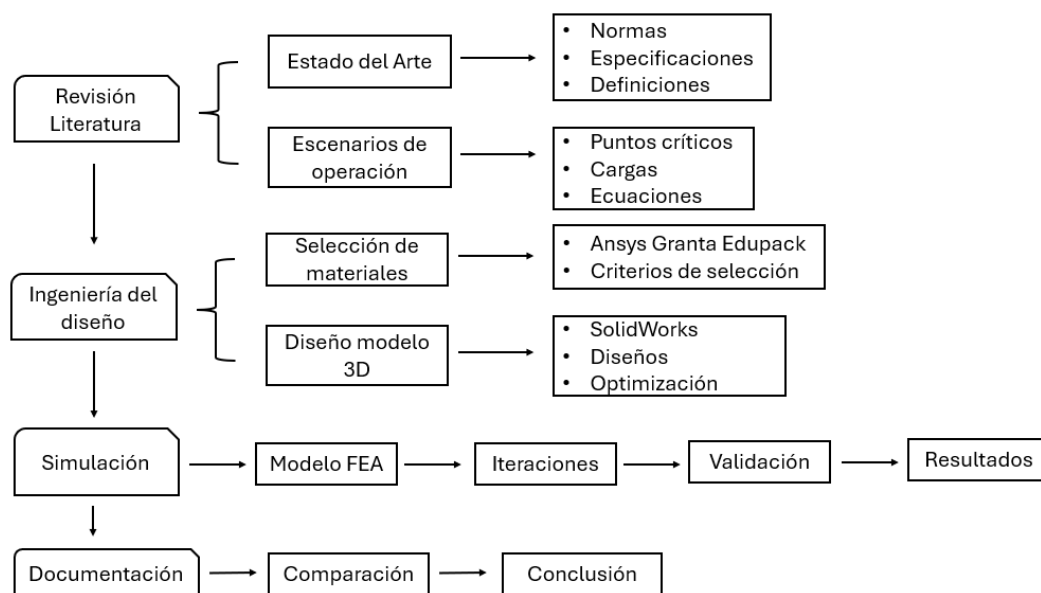


Figura 1.- Esquema metodológico de investigación.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Vehículos Baja SAE

La competencia Baja SAE, fue creada como plataforma educativa en ingeniería automotriz, donde equipos universitarios diseñan, fabrican y prueban vehículos todoterreno de un solo asiento. Las actividades de diseño y fabricación permiten que los participantes apliquen conocimientos teóricos en problemas prácticos, fomentando la innovación en componentes estructurales y la optimización del desempeño de los vehículos [13].

El objetivo es que los prototipos como en la figura 2 puedan superar pruebas de resistencia, aceleración, frenado y maniobrabilidad en condiciones extremas, lo que obliga a los estudiantes a aplicar principios de diseño, análisis estructural y selección de materiales en un entorno real de ingeniería [11,13].



Figura 2.- Competencia Baja SAE [13].

Hasan (2023) menciona que, en este tipo de vehículos, la optimización del peso y la resistencia de los elementos estructurales es fundamental, ya que influye directamente en el rendimiento dinámico, la seguridad del piloto y la eficiencia energética. Los componentes como el chasis, la suspensión y la transmisión deben ser diseñados con criterios de confiabilidad y manufacturabilidad, considerando las limitaciones de costo y recursos de un proyecto estudiantil [46].

En este marco, la mangueta adquiere un papel central al ser el punto de unión entre la suspensión y la rueda, soportando esfuerzos de flexión, torsión e impacto durante la operación en terrenos irregulares.

2.2 Componentes principales del sistema

La mangueta de un vehículo Baja SAE como se observa en la figura 3, es un componente estructural crítico, ya que conecta la suspensión con las ruedas y soporta cargas dinámicas e impactos del terreno. Su diseño y materialidad influyen directamente en el peso no suspendido, afectando el manejo, la estabilidad, la eficiencia energética y la respuesta dinámica del prototipo [12].



Figura 3.- Mangueta Yokomitsu [12].

La patente (WO2014195481A1, 2014) expone que el desarrollo automotriz prioriza la incorporación de materiales más ligeros y sostenibles, como polímeros de ingeniería, plásticos reforzados y compuestos, que ofrecen propiedades de rigidez, resistencia y facilidad de manufactura. Estos materiales podrían sustituir a metales como el acero o aluminio, pero su aplicación en componentes sometidos a cargas estructurales exige un análisis riguroso que combine aspectos teóricos y prácticos [16].

2.3 Antecedentes

El uso de materiales alternativos en la industria automotriz ha sido ampliamente investigado con el fin de disminuir la masa de los vehículos sin comprometer la seguridad ni el rendimiento. Fernández, Reis y Silva (2020) analizaron el uso de compuestos poliméricos reforzados con fibras y demostraron que la poliamida con fibra de vidrio (PA-GF) puede alcanzar resistencias comparables a las de algunas aleaciones de aluminio, con la ventaja de reducir costos y facilitar procesos de manufactura como inyección y moldeo por compresión. Estos resultados muestran el potencial de los polímeros de ingeniería en aplicaciones automotrices exigentes [2].

El equipo Cowboy Racing Baja Senior (2024) realizó un estudio donde evaluaron componentes de manguetas utilizando materiales como aluminio 6061-T6 y acero 4130. Mediante análisis por elementos finitos (FEA), se buscó reducir el peso no suspendido sin comprometer la integridad estructural de los vehículos Baja SAE. Este enfoque permitió identificar configuraciones óptimas que equilibran desempeño y manufacturabilidad [12].

Magneti Marelli (2023) desarrolló manguetas de fibra de carbono como en la figura 4, que resultan un 50 % más ligeras que las de hierro fundido y un 25 % más ligeras que las de aluminio, mediante el proceso moldeo por compresión de láminas avanzado (ASMC). Este avance demuestra la viabilidad de utilizar materiales compuestos en componentes estructurales críticos, manteniendo resistencia y rigidez necesarias [6].



Figura 4.- Mangueta de fibra de carbono [6].

En el artículo “Diseño y análisis de una mangueta” Shan (2021), evaluó manguetas de compuestos híbridos, formados por fibra de vidrio y resina epoxi combinados con aleación de aluminio, encontrando que estos materiales pueden reemplazar metales tradicionales, ofreciendo ventajas en reducción de peso y desempeño estructural. Por otro lado, Abdullah y Ishak (2021) estudiaron aleaciones de aluminio reforzadas con nanopartículas de tungsteno y concluyeron que, aunque mejoran la resistencia estática, pueden reducir la resistencia al corte, comprometiendo su desempeño en aplicaciones críticas [25,26].

En cuanto a materiales y diseño, Hoffmann (2021) en su patente [3], describe una mangueta vehicular optimizada estructuralmente mediante un diseño de estructura principal con paredes estratificadas, buscando mejorar rigidez, manufacturabilidad y resistencia mecánica sin necesariamente depender de compuestos poliméricos. De igual forma, Mpofu (2023) evaluaron compuestos de aluminio reforzado con carburo de silicio (SiC) y encontraron que permiten reducir hasta un 65 % del peso respecto a equivalentes en hierro fundido,

manteniendo niveles aceptables de resistencia estructural. Además, Herrera (2020) en su investigación sobre optimización topológica de manguetas delanteras y traseras como en la figura 5 reportó que el uso de aluminio 7075-T6, junto con diseño asistido por CAD y análisis FEA, permitió disminuir la masa de las manguetas delanteras y traseras mientras se mejoraba su comportamiento estructural [2,7].

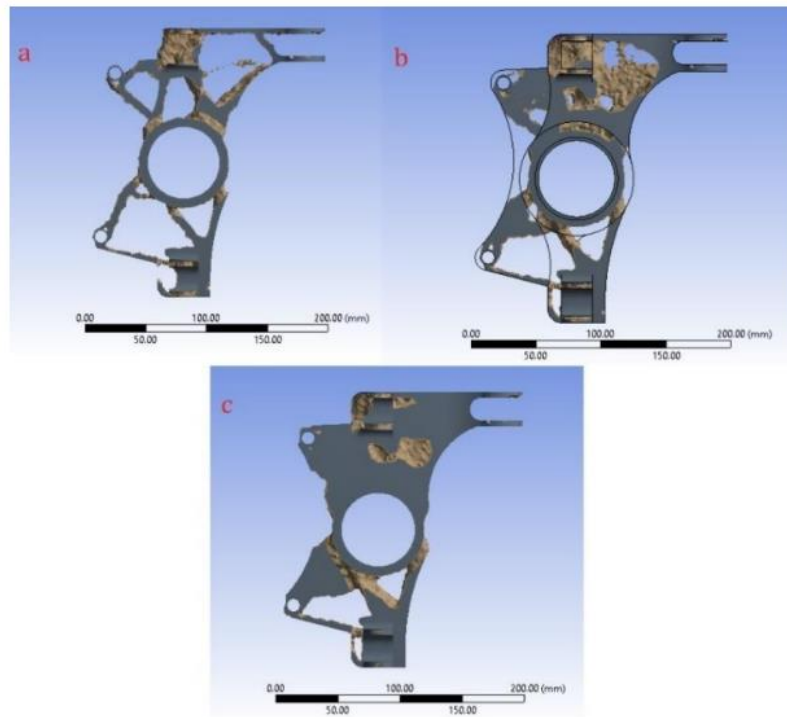


Figura 5.- Optimización topológica [2].

Por otro lado, Callister y Rethwisch (2021) destacaron la importancia de metodologías sistemáticas de selección de materiales, que combinan bases de datos y simulación computacional. Herramientas como Ansys Granta EduPack y SolidWorks permiten comparar propiedades, costos y manufacturabilidad, así como validar el comportamiento estructural bajo condiciones reales de carga. Este enfoque es complementado y reforzado por Sanjay (2018), quien, en su estudio “Diseño mejorado y optimización de una mangueta”, enfatiza la integración de análisis FEA y criterios de selección de materiales para desarrollar

componentes que maximicen la rigidez y minimicen el peso. La evidencia combinada de ambos trabajos subraya la utilidad de estas metodologías en la selección de materiales innovadores para la industria automotriz [27,28].

Investigaciones más recientes han ampliado estos antecedentes. Bajpai (2022) aplicó optimización topológica combinada con fabricación aditiva para una mangueta MacPherson, logrando reducir 40.87% de peso sin comprometer su desempeño, mejorando rigidez-peso y eficiencia energética. Comerlatto (2021) evaluó la fatiga de una mangueta de aluminio 7021 sin tratamiento térmico, mostrando que un diseño optimizado garantiza durabilidad incluso bajo cargas cíclicas extremas. Punde (2023) utilizó datos de fuerzas reales obtenidas en pista para identificar puntos críticos de estrés y optimizar resistencia y durabilidad del componente. Bertin (2024) aplicó principios de diseño y manufactura en manguetas, logrando reducir 33% de piezas y 6.49% en costos de fabricación, optimizando ensamblaje y mantenimiento y demostrando que la eficiencia estructural debe combinarse con buenas prácticas de manufactura [29-32].

Según la revisión de la literatura, aún no existe consenso sobre qué material alternativo es más adecuado para la mangueta, ya que los resultados de estudios recientes muestran variabilidad según la metodología y condiciones evaluadas. Esto resalta la relevancia de desarrollar un procedimiento sistemático que combine selección de materiales y validación estructural, asegurando un balance adecuado entre ligereza, resistencia y manufacturabilidad [12,17].

2.4 Fundamentos de selección de materiales en ingeniería automotriz

La selección de materiales en ingeniería automotriz es un proceso que combina criterios mecánicos, funcionales, económicos y de manufactura con el propósito de asegurar que cada componente cumpla adecuadamente su función dentro del vehículo. Debido a que los sistemas automotrices están sometidos a condiciones de operación variables como cargas dinámicas, vibraciones, impactos, desgaste, corrosión y ciclos térmicos, la elección del material influye de manera directa en la seguridad, durabilidad y eficiencia del sistema [4].

El punto de partida consiste en definir los requisitos mecánicos del componente. En el caso de piezas estructurales, como una mangueta para vehículos Baja SAE, los requerimientos suelen centrarse en la rigidez, la resistencia a la fatiga, el comportamiento frente a cargas de impacto y la capacidad para soportar esfuerzos combinados. Abdullah (2021) muestra que las fallas más recurrentes en manguetas automotrices están vinculadas a zonas con alta concentración de esfuerzos y materiales con poca resistencia a fatiga. Por ello, seleccionar un material adecuado permite reducir significativamente la posibilidad de fracturas prematuras y aumentar la confiabilidad del sistema [1].

Además, la masa del componente es un parámetro crítico ya que la reducción de peso mejora la maniobrabilidad del vehículo, disminuye las cargas transmitidas al sistema de suspensión y favorece el desempeño dinámico general. González Pérez (2024) destacan que materiales ligeros como aleaciones de aluminio de alta resistencia pueden proporcionar altos valores de rigidez específica, permitiendo diseños estructuralmente eficientes sin comprometer la seguridad del vehículo. De forma similar, Kumar et al. (2020) señalan que una adecuada relación resistencia-peso favorece la precisión del control direccional y reduce los esfuerzos en el sistema de dirección [5].

La manufacturabilidad es otro factor determinante. Patel y Shah (2018) indican que los materiales seleccionados deben ser compatibles con los procesos disponibles, tales como torneado, fresado, soldadura o fundición. Un material demasiado duro o frágil puede incrementar los costos y tiempos de fabricación, mientras que uno con buena maquinabilidad permite obtener geometrías más complejas, tolerancias más ajustadas y un acabado superficial adecuado para componentes críticos. A su vez, Fernández y Martínez (2020) muestran que la interacción entre propiedades mecánicas y parámetros de manufactura influye directamente en la capacidad de optimizar la geometría mediante rediseños asistidos por computadora [2].

Los aspectos ambientales y de durabilidad también influyen en la decisión. Vehículos expuestos a humedad, lodo y rocas requieren materiales con buena

resistencia a la corrosión y al desgaste. Ndlovu et al. (2023) demuestran que ciertos compuestos reforzados de aluminio presentan mejoras significativas en resistencia al desgaste y estabilidad estructural frente a golpes repetitivos. En la misma línea, Raja (2021) concluyen que los materiales compuestos de matriz metálica ofrecen ventajas en escenarios de carga variable, donde el desgaste y la fatiga pueden comprometer elementos como la mangueta [7,14].

La industria automotriz también ha mostrado una tendencia hacia el uso de materiales avanzados. El desarrollo de manguetas fabricadas con polímeros reforzados o estructuras híbridas de fibra de carbono ha demostrado reducciones sustanciales en peso sin afectar la integridad estructural [6]. Incluso existen propuestas patentadas sobre componentes reforzados con materiales compuestos que permiten una redistribución más eficiente del material y una mejora en el comportamiento ante impactos [16]. Sin embargo, estas alternativas suelen requerir técnicas de manufactura más complejas, lo que limita su implementación en proyectos estudiantiles.

Finalmente, la selección de materiales debe integrarse con las etapas de análisis y optimización. Diversos trabajos como los de Razak et al. (2014) y González y Pérez (2024) demuestran que la combinación de herramientas de simulación por elementos finitos y criterios de selección basados en índices de materiales permite identificar configuraciones más eficientes, reduciendo áreas con material excesivo y mejorando la distribución de esfuerzos [9,15].

2.5 Principios de optimización de componentes mecánicos

La optimización de componentes mecánicos en ingeniería automotriz consiste en aplicar métodos analíticos y computacionales para mejorar el desempeño estructural, reducir peso, incrementar la seguridad y minimizar costos de manufactura. Este proceso se basa en identificar las variables de diseño que influyen en el comportamiento del componente y ajustar su geometría o material para alcanzar la mejor relación entre resistencia, eficiencia y durabilidad. Kumar et al. (2020) indican que los criterios más relevantes para

optimizar elementos como la mangueta son la rigidez, la resistencia a la fatiga y la minimización de concentraciones de esfuerzo que puedan ocasionar fallas prematuras [5].

El primer principio de optimización es definir adecuadamente las restricciones y condiciones de carga. En el caso de vehículos Baja SAE, los componentes están sometidos a impactos, cargas laterales, vibraciones y esfuerzos combinados derivados del terreno irregular. Razak (2014) señalan que la correcta representación de estas cargas en herramientas de simulación permite obtener modelos más precisos y predecir con mayor fiabilidad el comportamiento estructural [9]. Esto resulta fundamental para evitar fallas como deformaciones excesivas, agrietamientos por fatiga o roturas por impactos repetitivos.

Otro aspecto esencial es la reducción de masa sin comprometer la seguridad. Esta es una de las motivaciones principales detrás de la optimización topológica aplicada a sistemas automotrices. Fernández y Martínez (2020) demostraron que, mediante técnicas de topología y rediseño CAD asistido por análisis FEM, es posible eliminar material innecesario en zonas de bajo esfuerzo y reforzar zonas críticas, logrando componentes más ligeros y eficientes sin sacrificar rigidez [2]. González y Pérez (2024) destacan que esta estrategia es especialmente útil en manguetas de Baja SAE, donde cada gramo de reducción contribuye a mejorar la dinámica del vehículo y la respuesta de la suspensión [15].

2.6 Fundamentos del método de Elemento Finito

El Método de Elemento Finito (FEM) es una técnica numérica aproximada, utilizada para resolver problemas de ingeniería que involucran esfuerzos, deformaciones, transferencia de calor, vibraciones y análisis estructural en general. Este método se basa en reformular un problema continuo usualmente descrito mediante ecuaciones diferenciales parciales en un sistema algebraico de ecuaciones que puede ser resuelto mediante cómputo digital [1].

El FEM consiste en subdividir un cuerpo continuo en múltiples subregiones llamadas elementos finitos, los cuales se conectan entre sí mediante nodos. Dentro de cada elemento, las variables del problema (como desplazamientos o temperatura) se aproximan mediante funciones de forma, que permiten transformar el problema continuo en un sistema discreto [2]. De esta forma, se obtiene una representación aproximada pero altamente precisa del comportamiento mecánico del componente analizado.

En ingeniería automotriz, el FEM se ha consolidado como una herramienta esencial para el diseño, validación y optimización de componentes estructurales, debido a su capacidad para predecir zonas críticas de tensión, modos de falla, distribuciones de deformación y efectos de cargas dinámicas antes del diseño final del prototipo [3]. Esto reduce costos, tiempo de desarrollo e incrementa la confiabilidad en aplicaciones como chasis, brazos de suspensión, manguetas y componentes sometidos a esfuerzos multiaxiales [4].

El proceso general para realizar un análisis mediante FEM se ilustra en la figura 6 que incluye un proceso fundamental.

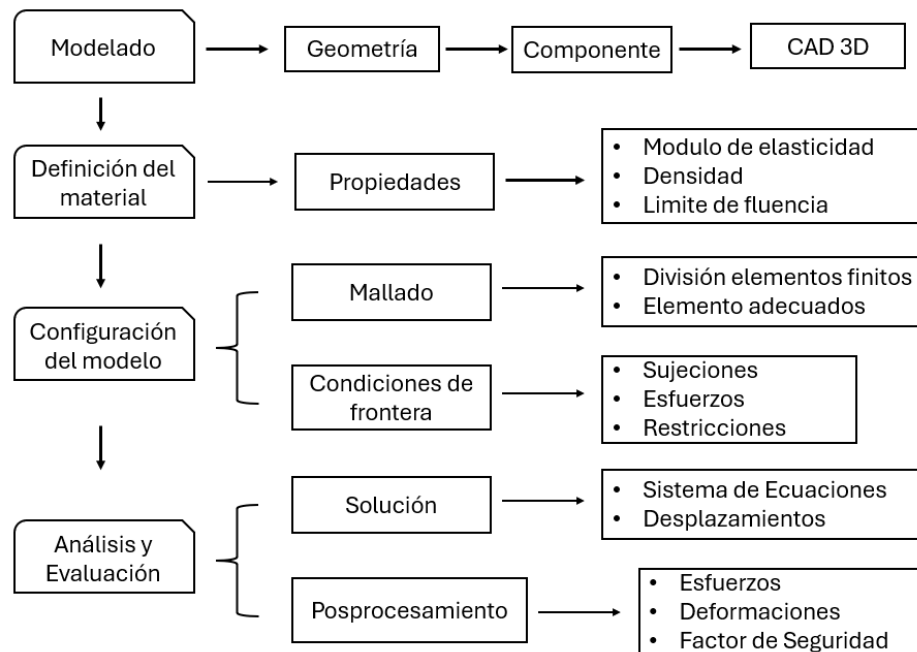


Figura 6.- Análisis de Elemento Finito - Proceso [2].

Comienza con el modelado geométrico del componente y la definición de las propiedades del material que describen su comportamiento mecánico. Luego, la geometría se discretiza en una malla de elementos finitos y se establecen las cargas y condiciones de frontera que representan las condiciones reales de operación. Con el modelo configurado, se resuelve el sistema de ecuaciones para obtener desplazamientos, esfuerzos y deformaciones. Finalmente, los resultados se postprocesan, interpretan y validan para evaluar el desempeño estructural y comprobar que el diseño cumple con los criterios de seguridad y funcionalidad requeridos.

2.7 Ecuaciones matemáticas para el método de elemento finito

La formulación del Método de Elemento Finito (MEF) se fundamenta en aproximar el comportamiento físico de un sólido mediante la discretización del dominio en elementos más pequeños, para los cuales se plantean ecuaciones que describen su respuesta mecánica. Diversos autores, como Huebner (2001), han clasificado las aproximaciones matemáticas del MEF en cuatro métodos principales: el método directo, el método variacional, el método de residuos ponderados y el método basado en el balance de energías [18]. A continuación, se describe cada uno incluyendo sus ecuaciones fundamentales.

2.7.1 Método Directo

El método directo es una de las formas más sencillas y conceptualmente intuitivas de introducir el Método de Elemento Finito. Se utiliza principalmente en estructuras discretas formadas por elementos simples como barras, columnas, tirantes o resortes y constituye la base histórica del MEF moderno. Su filosofía consiste en describir la relación entre cargas, deformaciones y desplazamientos en cada elemento mediante leyes físicas conocidas, para después ensamblar estas relaciones y obtener el comportamiento global de la estructura [18].

En este método se parte de la idea de que cada elemento individual se comporta según una ley constitutiva que relaciona la fuerza interna con el desplazamiento. Para el caso más simple, una barra sometida a carga axial, la relación fuerza desplazamiento se puede expresar como:

$$k_e = \frac{EA}{L} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

donde:

- E = módulo de elasticidad del material
- A = área de la sección transversal
- L = longitud del elemento
- k_e = rigidez del elemento

La matriz de rigidez elemental para una barra 1D con dos nodos es:

$$K_e = k_e \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Esta matriz indica cómo los desplazamientos nodales generan fuerzas internas en el elemento. Una vez definida la rigidez de cada parte, todas las matrices elementales se ensamblan para formar la matriz global de rigidez, que representa la estructura completa:

$$Ku = F \quad (\text{Ec. 2.3})$$

donde:

- K = matriz global de rigidez

- u = vector de desplazamientos nodales desconocidos
- F = vector de fuerzas aplicadas

Posteriormente, se aplican condiciones de frontera (por ejemplo, nodos fijos o apoyos) y se resuelve el sistema de ecuaciones para obtener los desplazamientos. Con estos desplazamientos, es posible calcular esfuerzos, deformaciones y reacciones internas en cada elemento.

En síntesis, el método directo se basa en tres ideas clave:

1. Definir el comportamiento físico de cada elemento mediante relaciones fuerza - desplazamiento.
2. Ensamblar la estructura completa sumando las contribuciones de cada elemento.
3. Resolver el sistema lineal resultante para obtener el comportamiento global.

Aunque este método es limitado para geometrías complejas, su importancia radica en que proporciona la base conceptual del método de elemento finito. Muchos de los principios utilizados en formulaciones avanzadas del MEF provienen de este enfoque elemental y directo [19].

2.7.2 Método Variacional

El método variacional es una de las formulaciones matemáticas más sólidas y elegantes del Método de Elemento Finito, y constituye la base para la mayoría de las aplicaciones estructurales modernas. Este enfoque se fundamenta en principios energéticos, como el Principio de Mínima Energía Potencial y el Principio del Trabajo Virtual, los cuales establecen que un sistema mecánico en equilibrio adopta un estado en el que su energía potencial total es mínima [19].

El fundamento teórico para un sólido elástico en equilibrio, la energía potencial total Π del sistema se expresa como:

$$\Pi = U - W \quad (\text{Ec. 2.4})$$

donde:

- U = energía de deformación almacenada en el material
- W = trabajo realizado por las fuerzas externas

El principio variacional establece que, para que exista equilibrio, la variación de esta energía debe ser igual a cero:

$$\delta\Pi = 0 \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Esto significa que cualquier variación infinitesimal del campo de desplazamientos debe producir una energía igual o mayor que la correspondiente al estado real de equilibrio obteniendo así la ecuación general del método variacional:

$$\int_{\Omega} \sigma^T \delta \varepsilon d\Omega = \int_{\Omega} b^T \delta u d\Omega + \int_{\Gamma_t} t^T \delta u d\Gamma \quad (\text{Ec. 2.6})$$

donde:

- Ω = dominio del sólido
- Γ_t = superficie donde actúan cargas externas
- σ = vector de esfuerzos

- ε = vector de deformaciones
- u = desplazamientos
- b = fuerzas de cuerpo
- t_s = tracciones aplicadas

Esta ecuación representa un equilibrio entre trabajo interno (producto del esfuerzo y la variación de la deformación) y trabajo externo.

Para utilizar esta formulación en el Método de Elemento Finito:

1. Se aproxima el campo de desplazamientos con funciones de forma N_i .
2. Se calcula la variación virtual δu usando las mismas funciones.
3. Se inserta esta aproximación en la ecuación variacional.
4. Se obtiene la matriz de rigidez elemental:

$$K_e = \int_{\Omega_e} B^T D B d\Omega \quad (\text{Ec. 2.7})$$

donde:

- D = matriz constitutiva del material
- B = matriz que relaciona desplazamientos con deformaciones
- B^T = traspuesta de la matriz
- Ω_e = dominio de volumen o área

Este procedimiento conduce directamente a la ecuación global del sistema:

$$Ku = F \quad (\text{Ec. 2.8})$$

El método variacional garantiza que la solución obtenida sea estable, físicamente consistente y energéticamente óptima, lo que lo convierte en el método preferido en la mayoría de los softwares comerciales de análisis estructural [19].

2.7.3 Método residuos ponderados

El método de residuos ponderados es una formulación matemática ampliamente utilizada para resolver ecuaciones diferenciales mediante aproximaciones. En el contexto del Método de Elemento Finito, este enfoque permite transformar una ecuación diferencial que describe un fenómeno físico (como elasticidad, calor o vibración) en un sistema algebraico de ecuaciones que puede resolverse numéricamente [18].

Su idea fundamental es que, al aproximar la solución real con una función aproximada generalmente una combinación de funciones de forma se genera un residuo, es decir, un error entre la solución aproximada y la ecuación exacta. Este residuo no puede eliminarse completamente, pero sí puede reducirse y controlarse imponiendo condiciones matemáticas específicas [18].

Dado un problema gobernado por una ecuación diferencial:

$$L(u) = f \quad (\text{Ec. 2.9})$$

donde:

- $L(\cdot)$ es un operador diferencial
- u es la solución exacta desconocida
- f representa cargas o fuentes externas

Si se propone una solución aproximada u_h . Al sustituirla en la ecuación original se genera el residuo:

$$R(u_h) = L(u_h) - f \quad (\text{Ec. 2.10})$$

El método de residuos ponderados busca que el residuo sea “cero en promedio” dentro del dominio. Para ello se multiplica el residuo por un conjunto de funciones de ponderación w_i , y se exige que la integral del producto sea cero:

$$\int_{\Omega} w_i R(u_h) d\Omega = 0 \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Estas funciones son seleccionadas estratégicamente, y dependiendo de su elección surgen distintas variantes del método.

Como el método de Galerkin donde se elige:

$$w_i = N_i \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Es decir, las mismas funciones de forma empleadas para aproximar la solución. Esta elección es clave porque asegura simetría y estabilidad numérica en los sistemas obtenidos, lo que lo convierte en el método estándar en la mayoría de los softwares basados en MEF.

Aplicando Galerkin a la ecuación se obtiene:

$$\int_{\Omega} N_i (L(u_h) - f) d\Omega = 0 \quad (\text{Ec. 2.13})$$

El desarrollo de esta expresión conduce directamente a la matriz de rigidez elemental:

$$\mathbf{K}_e = \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\Omega \quad (\text{Ec. 2.14})$$

misma que aparece también en el método variacional, mostrando la conexión entre ambos enfoques.

- Método de Galerkin ($w_i = N_i$)
- Método de Petrov-Galerkin ($w_i \neq N_i$)
- Método de subdominio ($w_i = 1$)
- Método de mínimos cuadrados ($w_i = \partial i$)

Los w_i son llamados funciones de ponderación. Según la elección de estas funciones es el nombre que se le da al método

2.7.4 Método de balance de energía

El método del balance de energías es otra aproximación utilizada en la formulación del Método de Elemento Finito. Se fundamenta en la conservación de energía dentro de un sistema mecánico donde la energía suministrada por cargas externas debe ser igual a la energía almacenada o disipada por el material. Esta idea proviene directamente de la Primera Ley de la Termodinámica y de principios energéticos de mecánica clásica.

En este método, el equilibrio de un sistema estructural se obtiene aplicando el requisito de que la suma de las energías internas y externas debe mantenerse en equilibrio para cualquier configuración compatible del sistema [18]. Es un enfoque especialmente útil para problemas dinámicos, vibratorios, termo mecánicos o con interacción energía trabajo.

Para un cuerpo sometido a esfuerzos, se establece que:

$$\text{Energía Interna} = \text{Trabajo de Fuerzas Externas}$$

$$U = W \quad (\text{Ec. 2.15})$$

La energía interna U para un sólido elástico se expresa como:

$$U = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} d\Omega \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Mientras que el trabajo externo realizado por cargas distribuidas y de superficie es:

$$W = \int_{\Omega} \mathbf{b}^T \mathbf{u} d\Omega + \int_{\Gamma_t} \mathbf{t}^T \mathbf{u} d\Gamma \quad (\text{Ec. 2.17})$$

donde:

- d = deformaciones
- T = traspuesta
- $\mathbf{b}$ = fuerzas de cuerpo
- t_s = tracciones aplicadas
- $\mathbf{u}$ = desplazamientos
- Ω = dominio del sólido
- Γ_t = frontera donde actúan cargas

El método establece que el sistema está en equilibrio cuando se cumple:

$$\delta(U - W) = 0 \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Esta condición de equilibrio energético es similar, pero no idéntica, al principio variacional. La diferencia radica en que el método del balance de energías se puede aplicar directamente sobre balances físicos, sin requerir formulaciones variacionales completas.

Al introducir las aproximaciones de desplazamiento mediante funciones de forma, se obtiene la expresión elemental que conduce a la matriz de rigidez:

$$\mathbf{K}_e = \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\Omega \quad (\text{Ec. 2.19})$$

y posteriormente se forma el sistema global:

$$\mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Lo que demuestra que este método, al igual que los anteriores, converge a la expresión general del Método de Elemento Finito.

2.8 Mallado, Elementos y Condiciones de frontera

El proceso de mallado, la selección de elementos finitos y la definición de las condiciones de frontera son componentes fundamentales en la formulación y ejecución del método de elemento finito, pues determinan la precisión, estabilidad y validez de los resultados obtenidos [18].

2.8.1 Mallado (Discretización del dominio)

El mallado consiste en dividir la geometría continua del modelo en un conjunto finito de elementos interconectados mediante nodos. La calidad del

mallado influye directamente en la convergencia y exactitud del análisis. Entre los criterios principales para un mallado adecuado se encuentran [19].

- **Tamaño del elemento:** Un mallado demasiado grueso puede pasar por alto zonas críticas, mientras que uno demasiado denso aumenta innecesariamente el costo computacional.
- **Calidad geométrica:** Se mide mediante métricas como aspect ratio, skewness, warpage y Jacobian. Una calidad baja puede generar resultados inestables o divergencias.
- **Refinamiento local:** Utilizado en regiones con gradientes altos de esfuerzos, como uniones, transiciones geométricas, taladros y zonas de contacto.

Las herramientas de FEM permiten utilizar mallado estructurado (organizado en patrones regulares) o no estructurado (elementos con distribución libre), dependiendo de la complejidad geométrica.

2.8.2 Tipos de elementos finitos

Cook et al. (2001) describen que, los elementos finitos pueden clasificarse por su dimensionalidad, su formulación matemática y su comportamiento estructural y para geometrías complejas o con múltiples transiciones, los elementos tetraédricos cuadráticos ofrecen la mejor relación entre precisión y tiempo de cálculo [18].

A) Por dimensionalidad

- **1D:** barras, vigas y elementos de resorte; útiles en modelos estructurales simplificados.
- **2D:** elementos shell y plate, ideales para superficies delgadas como brazos de control, chasis tubulares y láminas.

- 3D (sólidos): tetraédricos, hexaédricos y prismáticos como en la figura 7. Son los más utilizados en componentes complejos como en este caso de una mangueta debido a su capacidad de capturar gradientes tridimensionales de esfuerzo.

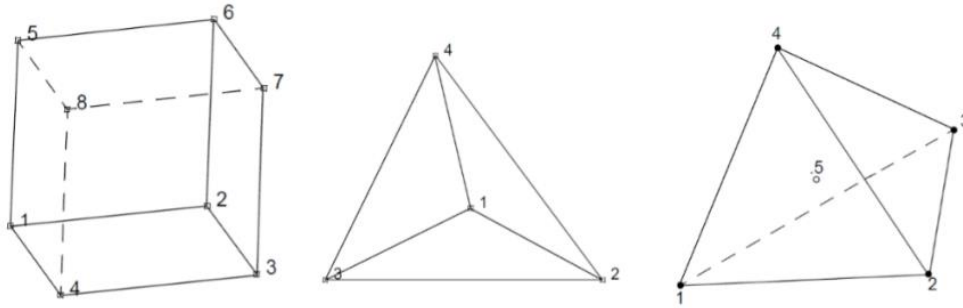


Figura 7.- Elementos tetraédricos, hexaédricos y prismáticos [18].

B) Por formulación

- Lineales: utilizan funciones de forma de primer orden; son rápidos, pero menos precisos en zonas curvas o con altos gradientes.
- Cuadráticos: utilizan funciones de forma de segundo orden; representan con mayor exactitud curvaturas y deformaciones.

En un análisis por elementos finitos, la elección del tipo de elemento es esencial para lograr resultados precisos y eficientes. Cada tipo de elemento tetraédricos, hexaédricos y prismáticos ofrece ventajas y limitaciones según la geometría, la calidad del mallado y el nivel de exactitud buscado. La siguiente tabla 1 resume sus principales características, ventajas y desventajas para facilitar su selección en el modelado FEM [19].

Tabla 1.- Ventajas y desventajas de elementos 3D [19].

Tipo de elemento	Descripción general	Ventajas	Desventajas
Tetraédrico	Elemento de 4 o 10 nodos con forma piramidal triangular.	Mallado automático rápido. Ideal para geometrías complicadas.	Menor precisión que un hexaedro del mismo tamaño. Requiere más elementos para convergencia.
Hexaédrico	Elemento de 6 caras y 8-20 nodos. Se asemeja a un cubo o paralelepípedo.	Excelente comportamiento en deformaciones. Requiere menos elementos para buenos resultados.	Poco práctico en geometrías muy curvas o irregulares. El mallado suele ser manual o semiautomático.
Prismático	Elemento tipo “cuña”, combinación de triángulo y rectángulo.	Ideal para representar capas, espesores o extrusiones. Menor distorsión en regiones alargadas.	Más difícil de generar que un tetra. Depende mucho de la calidad del mallado previo.

2.8.3 Condiciones de Frontera

Las condiciones de frontera representan cómo el componente interactúa con su entorno en condiciones reales de operación. Son indispensables para asegurar que el sistema esté bien definido (estable) y físicamente consistente. Entre sus principales tipos están condiciones esenciales, naturales y contactos [19].

- **Condiciones esenciales:**

Impiden desplazamientos o rotaciones. Ejemplo: fijar los apoyos donde la mangueta se conecta al brazo de control.

- **Condiciones naturales:**

Aplican fuerzas o presiones distribuidas. Ejemplo: carga vertical del terreno sobre el cubo de rueda, o fuerzas laterales durante maniobras.

- **Contactos:**

Interacción entre superficies mediante fricción, adherencia o separación. Es muy crítico en componentes automotrices donde los tornillos, cojinetes y uniones generan estados de contacto altamente no lineales.

Las condiciones de frontera adecuadas son esenciales para obtener resultados realistas en un modelo FEM. Una incorrecta definición de apoyos, contactos o cargas puede generar soluciones físicamente inválidas, resultados no convergentes o esfuerzos artificiales. En componentes automotrices como la mangueta, donde existen múltiples puntos de unión, contactos con rótulas y cargas dinámicas, una correcta selección y aplicación de estas condiciones es fundamental para garantizar la confiabilidad del análisis estructural [18,19].

2.9 Variables de respuesta en el análisis por elemento finito

Como se ha descrito en las secciones anteriores, el método de elemento finito permite modelar el comportamiento estructural de componentes mecánicos mediante la discretización del dominio, la aplicación de condiciones de frontera y la resolución de ecuaciones gobernantes. A partir de este proceso, es posible obtener variables de respuesta que permiten evaluar la integridad estructural del diseño [18,42].

Entre los principales resultados derivados del análisis por elemento finito se encuentran la distribución de esfuerzos, los desplazamientos y el factor de seguridad, los cuales constituyen parámetros fundamentales para la validación y optimización de componentes en ingeniería.

2.9.1 Distribución de esfuerzos

La distribución de esfuerzos representa la forma en que las cargas aplicadas se transmiten a lo largo del componente, permitiendo identificar regiones de alta sollicitación que pueden ser críticas para la integridad estructural.

El análisis de esfuerzos se realiza comúnmente utilizando el criterio de Von Mises, el cual permite evaluar el estado de esfuerzo equivalente en materiales dúctiles y determinar zonas susceptibles a falla [42]. Este criterio combina los esfuerzos normales y cortantes en un único valor escalar, facilitando la comparación con el límite elástico del material [43].

El estudio de la distribución de esfuerzos permite detectar concentraciones localizadas, generalmente asociadas a cambios geométricos, puntos de aplicación de carga o condiciones de frontera. Estas zonas requieren especial atención en el diseño, ya que pueden representar puntos potenciales de falla estructural [43].

2.9.2 Desplazamientos

El análisis de desplazamientos describe la deformación del componente bajo la acción de las cargas aplicadas, siendo un indicador directo de su rigidez estructural.

Los desplazamientos permiten evaluar si el componente mantiene su funcionalidad durante la operación, ya que deformaciones excesivas pueden afectar el desempeño del sistema al que pertenece. En componentes del sistema de suspensión, como la mangueta, el control de desplazamientos es fundamental para garantizar la estabilidad y el correcto comportamiento dinámico del vehículo [42-44].

En el análisis por elemento finito, los desplazamientos suelen ser mínimos en las zonas donde se aplican las condiciones de frontera y máximos en las regiones alejadas de dichas restricciones. Su magnitud depende de la geometría

del componente y de las propiedades mecánicas del material, particularmente del módulo de elasticidad [44].

2.9.3 Factor de seguridad

El factor de seguridad es un parámetro que relaciona la capacidad resistente del material con los esfuerzos inducidos en el componente, permitiendo evaluar si el diseño es adecuado para operar bajo condiciones seguras [18].

Se define generalmente como la relación entre el esfuerzo permisible del material y el esfuerzo máximo obtenido en el análisis. Valores mayores a la unidad indican que el componente puede soportar las cargas aplicadas sin fallar; sin embargo, en el diseño de ingeniería se emplean márgenes adicionales para considerar incertidumbres en las condiciones de operación y variaciones en las propiedades del material [43].

En el contexto de vehículos Baja SAE, aunque el reglamento oficial no establece valores numéricos mínimos específicos para el factor de seguridad en componentes como la mangueta, sí exige que todos los elementos estructurales del sistema de suspensión y dirección sean capaces de soportar las cargas operativas sin fallar [18]. Asimismo, se establece que ningún componente debe comprometer la integridad estructural del vehículo ni la seguridad del conductor, siendo este un criterio fundamental durante la inspección técnica del vehículo.

Por lo tanto, el factor de seguridad se considera un indicador clave en el diseño del componente, ya que permite verificar el cumplimiento de los requerimientos de resistencia, rigidez y confiabilidad establecidos para su correcta operación. Asimismo, en diversas investigaciones aplicadas al diseño de componentes automotrices, se adoptan factores de seguridad mayores a 1.5 como criterio de diseño, con el fin de garantizar un margen adecuado frente a incertidumbres en las condiciones de carga, variaciones en las propiedades del material y posibles simplificaciones del modelo numérico [47].

CAPÍTULO 3

SELECCIÓN DE MATERIALES

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta el proceso de selección de materiales empleando ANSYS Granta EduPack, una herramienta especializada que permite analizar propiedades mecánicas, térmicas, ambientales y de manufactura mediante bases de datos verificadas. Esta plataforma facilita la comparación entre diferentes familias de materiales y la aplicación de índices de desempeño (Ashby) como en la figura 8 para identificar las alternativas que mejor cumplen los requisitos del diseño [21].

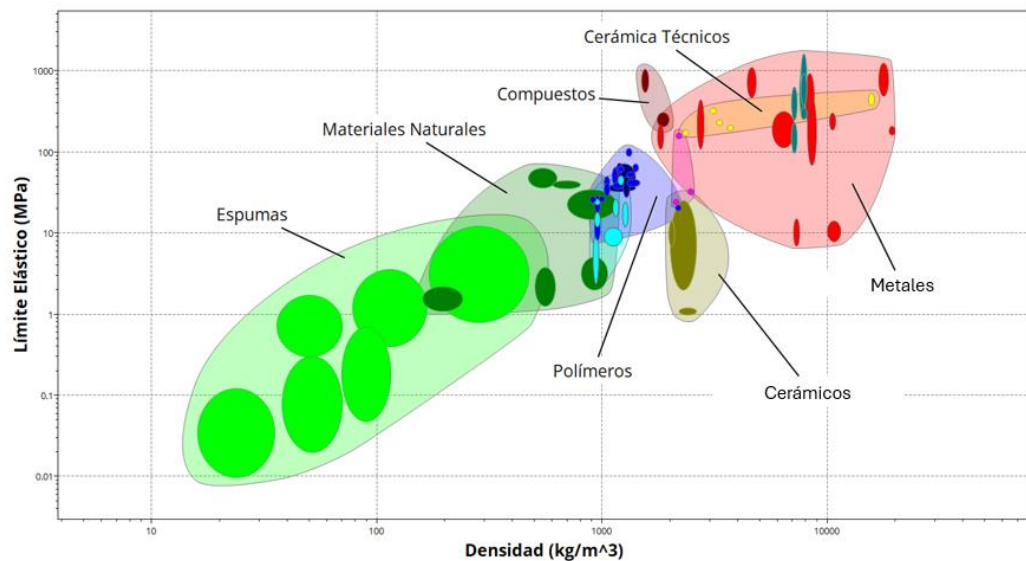


Figura 8.- Familia de materiales [21].

La selección de materiales es un proceso fundamental en el diseño de componentes automotrices, especialmente en sistemas sometidos a altas cargas dinámicas como la mangueta de un vehículo Baja SAE. La elección adecuada del material determina la resistencia estructural, la rigidez, la durabilidad y el peso del componente, factores críticos para garantizar el desempeño y la seguridad del vehículo en condiciones todo terreno [20].

El objetivo central de esta etapa es determinar el material óptimo para la mangueta considerando criterios como resistencia específica, rigidez, peso, costo, procesabilidad y disponibilidad. Para ello, el capítulo se estructura analizando primeramente los criterios de selección, seguido por la identificación de propiedades relevantes, la comparación de candidatos y finalmente la justificación técnica del material elegido.

3.2 Criterios de selección de materiales

La selección del material para una mangueta de vehículo Baja SAE requiere un enfoque estructurado que permita identificar la opción óptima considerando desempeño mecánico, peso, manufacturabilidad y costo. Para ello, se emplean criterios cuantitativos basados en índices de selección propuestos por Ashby, los cuales permiten comparar materiales de manera objetiva mediante relaciones entre propiedades clave [21].

Estos criterios permiten transformar un conjunto complejo de requerimientos en expresiones matemáticas que facilitan la comparación entre materiales dentro de la base de datos del software ANSYS Granta EduPack. Dichos criterios son fundamentales porque garantizan que el proceso de selección no sea arbitrario, sino reproducible, sistemático y justificable desde un punto de vista ingenieril.

Específicamente para este componente, los criterios principales considerados son los siguientes:

3.2.1 Criterio de resistencia estructural

La mangueta debe soportar cargas verticales, laterales y torsionales propias del terreno irregular. Por ello, el material debe cumplir un límite de fluencia σ_y suficiente para garantizar que las regiones críticas no experimenten deformación plástica.

Este criterio se relaciona con el índice:

$$\text{Índice de resistencia: } \frac{\sigma_y}{\rho} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Seleccionado para maximizar resistencia y minimizar peso [21].

3.2.2 Criterio de rigidez

La rigidez del material está ligada al módulo de elasticidad E , fundamental para evitar deformaciones que afecten la alineación y la geometría de suspensión. El índice asociado es:

$$\text{Índice de rigidez: } \frac{E}{\rho} \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Un mayor valor implica componentes más rígidos sin incrementar de manera significativa el peso [21].

3.2.3 Criterio de peso (densidad)

La reducción de masa es esencial en vehículos Baja SAE para mejorar aceleración, consumo energético y comportamiento dinámico. El software EduPack permite filtrar materiales con densidades reducidas sin comprometer resistencia [21].

3.2.4 Criterio de manufacturabilidad

La mangueta debe fabricarse con procesos disponibles y económicos, que sus investigadores logren reproducirlo sin contar con gran presupuesto económico, entre las más adecuadas para esta mangueta esta [20].

- Maquinado CNC
- Fundición en arena
- Forja
- Manufactura aditiva (en casos experimentales)

3.2.5 Criterio de costo

Aunque la mangueta debe ser segura, los equipos Baja SAE operan con presupuestos limitados. EduPack permite estimar rangos de costo por kg, lo cual ayuda a descartar metales avanzados o superaleaciones cuando no aportan suficiente beneficio frente al incremento de precio [20].

3.2.6 Criterio de tenacidad y resistencia al impacto

La operación todo terreno implica baches, impactos laterales, saltos y vibraciones severas. Es indispensable que el material tenga una buena resistencia a fractura K_{IC} , evitando fallas catastróficas durante competencia [20].

3.2.7 Criterios adicionales según el diseño

En caso de requerirse, EduPack permite aplicar criterios adicionales:

- Resistencia a fatiga
- Resistencia a corrosión
- Compatibilidad con tratamientos térmicos
- Estabilidad térmica

La importancia de establecer criterios de selección radica en que permiten comparar materiales de forma objetiva y cuantificada, reduciendo miles de opciones iniciales a un conjunto reducido de candidatos con verdadero potencial. El uso de índices facilita justificar técnicamente por qué un material resulta superior a otro, integrando múltiples índices como peso, costo y resistencia, estos criterios sirven como fundamento para los apartados posteriores, donde se describen las propiedades mecánicas relevantes (3.2), se realiza la comparación de materiales candidatos mediante ANSYS Granta EduPack (3.3) y finalmente se selecciona y justifica el material más adecuado para la mangueta (3.5).

3.3 Propiedades mecánicas relevantes

La selección adecuada de una mangueta para vehículos Baja SAE requiere identificar, desde el inicio, las propiedades mecánicas que condicionan el desempeño, la resistencia estructural y la vida en servicio del componente. Debido a que la mangueta está sometida a cargas de impacto, flexión, vibración y esfuerzos multiaxiales durante la operación en terrenos irregulares, es indispensable definir cuáles propiedades serán utilizadas posteriormente en el proceso de filtrado y comparación dentro del software de selección de materiales (ANSYS Granta EduPack).

En este trabajo se seleccionaron únicamente las propiedades que influyen de manera directa en el desempeño estructural y la optimización de peso del componente. Estas propiedades permitirán establecer criterios cuantificables para descartar materiales que no cumplan con las exigencias mecánicas mínimas que se identifican en el análisis de cargas del capítulo previo.

A continuación, se presenta la tabla 2 de propiedades mecánicas relevantes que funcionará como referencia para el proceso de filtrado inicial y el análisis comparativo dentro del software.

Tabla 2.- Propiedades mecánicas para una mangueta [22].

Propiedad mecánica	Descripción	Relevancia para la mangueta
Densidad	Masa por unidad de volumen	Determina el peso final del componente, clave para reducir masa no suspendida.
Límite elástico (Yield Strength)	Esfuerzo a partir del cual el material sufre deformación permanente	Garantiza que la mangueta no se deforme bajo cargas estáticas o impactos moderados.
Resistencia última a la tracción	Máximo esfuerzo que soporta el material antes de fracturarse	Asegura integridad ante eventos de carga extrema o saltos.
Resistencia a la fatiga	Capacidad para soportar cargas cíclicas	Fundamental por las vibraciones y esfuerzos repetitivos del terreno.
Módulo de elasticidad (E)	Relación entre esfuerzo y deformación en la zona elástica	Controla la rigidez del componente y su deflexión ante cargas laterales.
Tenacidad (Toughness)	Energía que el material puede absorber antes de fracturarse	Importante para resistir impactos súbitos en terreno irregular.
Dureza	Resistencia superficial a penetración o desgaste	Aumenta la vida útil ante abrasión y contacto con elementos externos.

Esta tabla servirá como punto de partida para aplicar filtros de selección en el software, permitiendo comparar materiales como aleaciones de aluminio, aceros y polímeros reforzados bajo un mismo conjunto de criterios. En los siguientes apartados se utilizarán estas propiedades para establecer el rango mínimo aceptable y justificar la elección del material óptimo para la mangueta.

Con el fin de establecer una base objetiva para la selección del material, en la tabla 3 se definió los rangos mínimos aceptables de las propiedades mecánicas que debe cumplir una mangueta. Estos valores funcionan como criterios iniciales de filtrado dentro de ANSYS Granta EduPack y permiten descartar materiales claramente insuficientes en términos de resistencia, rigidez, durabilidad y peso.

Tabla 3.- Propiedades mínimas Aceptables [23].

Propiedad	Rango mínimo recomendado	Justificación técnica para la mangueta
Resistencia a la tracción	$\geq 200 \text{ MPa}$	La mangueta soporta cargas verticales, frenado y cargas laterales. Debe evitar fallas por sobrecarga estática.
Límite elástico	$\geq 200 \text{ MPa}$	Previene deformación permanente en impactos y baches severos. Es la propiedad más crítica.
Módulo de elasticidad (E)	$\geq 35 \text{ GPa}$	Asegura rigidez suficiente para mantener la geometría de suspensión y el control preciso de la rueda.
Tenacidad (Toughness)	$\geq 3.5 \text{ kJ/m}^2$	La mangueta recibe cargas dinámicas; necesita absorber energía sin fracturarse.
Densidad	$\leq 3 \text{ g/cm}^3$	La masa no suspendida debe mantenerse baja; mejora tracción y respuesta de suspensión.
Costo Aproximado	Bajo – Medio	Los equipos tienen presupuesto limitado, sin comprometer seguridad.

Los rangos mínimos establecidos para las propiedades mecánicas de la mangueta se determinaron a partir de un análisis comparativo de materiales que históricamente han sido utilizados en esta componente, incluyendo aceros de medio carbono, aluminios de las series 6000 - 7000 y polímeros reforzados con fibra empleados en prototipos de competencia.

A partir de estos materiales se obtuvo un promedio representativo de sus propiedades críticas y se establecieron valores mínimos de desempeño que aseguran la integridad estructural bajo condiciones típicas de carga en vehículos Baja SAE. Diversas investigaciones de diseño de manguetas en FSAE y Baja SAE reportan propiedades mínimas similares en los materiales seleccionados para esta componente, lo cual respalda los rangos establecidos en esta sección [22,23].

Estos rangos propuestos no representan aún la elección final del material, sino un punto de partida razonable fundamentado en los requerimientos estructurales del componente y en el comportamiento observado en aplicaciones automotrices. A partir de estas propiedades mínimas, en los apartados posteriores se aplicará el filtrado sistemático en EduPack para identificar los materiales candidatos más viables.

3.4 Principios de selección

A fin de garantizar que el proceso de selección de materiales sea reproducible, transparente y útil como referencia para futuros trabajos, esta sección se presenta como una guía estructurada paso a paso para la identificación y comparación de materiales candidatos utilizando el software ANSYS Granta EduPack. El uso de esta herramienta permite aplicar metodologías sistemáticas de selección basadas en bases de datos verificadas y criterios cuantitativos, lo cual es ampliamente recomendado en procesos de diseño de ingeniería para la toma objetiva de decisiones en selección de materiales [20].

La comparativa de materiales se realizó a partir de los criterios y rangos mínimos definidos en las secciones anteriores, integrando propiedades mecánicas, densidad, costo y aspectos de manufacturabilidad. El enfoque seguido no se basa en la selección directa de un material, sino en un proceso gradual de filtrado y evaluación como se observa en la figura 9, que reduce de manera sistemática el conjunto inicial de opciones hasta obtener un grupo reducido de materiales viables para la mangueta del vehículo Baja SAE, siguiendo los principios propuestos por Ashby para evitar sesgos tempranos en la selección [21].

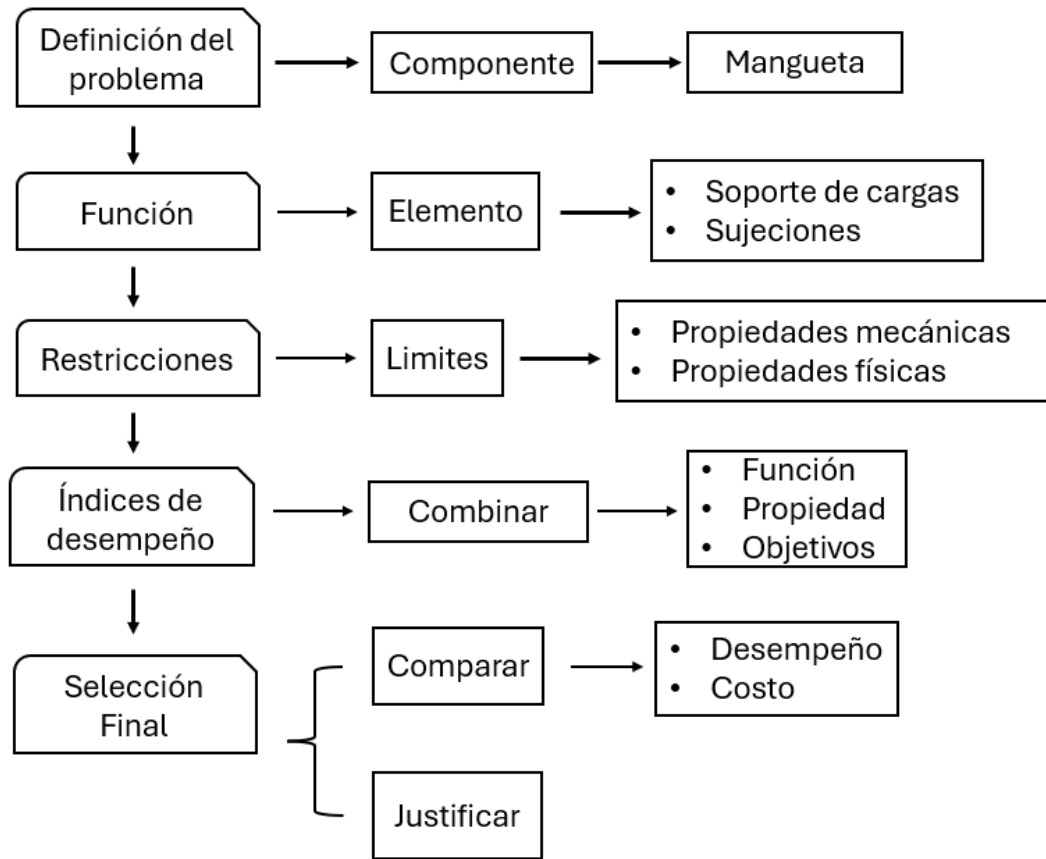


Figura 9.- Principios de selección basado en Ashby [21].

3.5 Procedimiento metodológico y comparativa de materiales

Con base en el enfoque planteado, la comparativa de materiales candidatos se desarrolló siguiendo una secuencia de pasos claramente definidos dentro de EduPack. Esta secuencia se describe de manera detallada a continuación, con el objetivo de que el procedimiento pueda ser reproducido por cualquier lector interesado en la selección de materiales para componentes estructurales automotrices.

Cada paso corresponde a una acción específica dentro del software, acompañada de un filtro cuantitativo o cualitativo, una justificación técnica y un resultado. El proceso inicia desde un universo amplio de materiales y progresa mediante restricciones graduales hasta identificar un conjunto reducido de candidatos óptimos.

3.5.1 Paso 1. Selección del universo completo de materiales

El primer paso del proceso consiste en seleccionar el universo completo de materiales disponibles en ANSYS Granta EduPack ver figura 10, utilizando la base de datos Nivel 3 - Materiales de ingeniería avanzados, sin aplicar ningún filtro inicial.

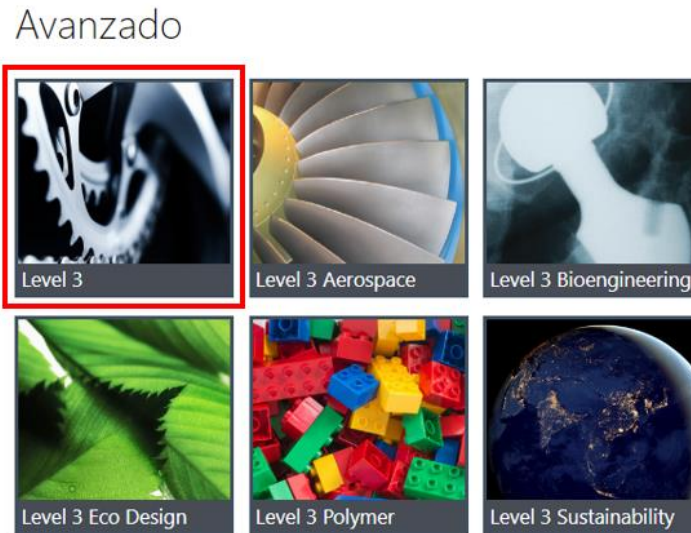


Figura 10.- Inicio de ANSYS Granta EduPack.

Esta decisión metodológica tiene como objetivo evitar sesgos tempranos en la selección y garantizar que todo el espacio de diseño sea considerado desde el inicio. Al Iniciar el proceso desde un universo amplio de materiales es una práctica recomendada en metodologías de selección de materiales, ya que permite identificar alternativas no convencionales con alto potencial de desempeño específico antes de imponer restricciones particulares de diseño [21].

Al no restringir inicialmente el tipo de material como se observa en la figura 11, se incluyen metales, polímeros, polímeros reforzados, cerámicos, espumas y materiales compuestos avanzados, todos ellos disponibles en la base de datos avanzada del software [20].

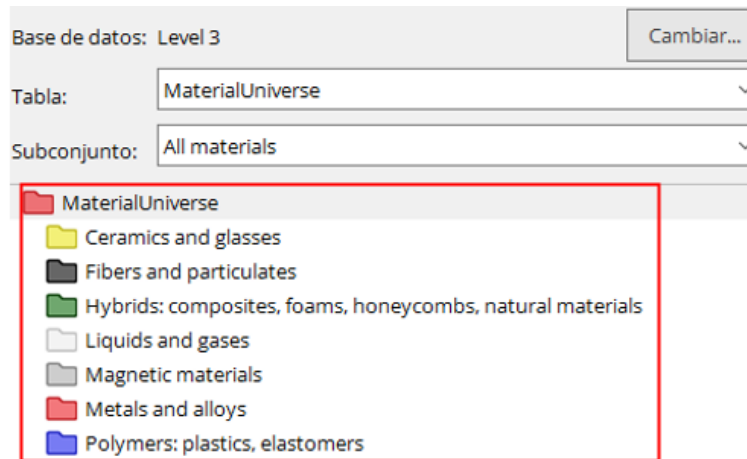


Figura 11.- Universo de Materiales.

Desde el punto de vista de ingeniería, este enfoque permite identificar materiales alternativos que podrían ofrecer ventajas significativas en términos de reducción de peso, resistencia o rigidez específicas frente a los materiales tradicionalmente utilizados en manguetas, como el acero o el aluminio, especialmente en aplicaciones de vehículos de competencia todo terreno como Baja SAE [22].

El resultado de este paso es la visualización de todas las familias de materiales disponibles en la base de datos con 4327 materiales, estableciendo una referencia global del espacio de diseño como se observa en la figura 12. A partir de este universo completo, en los pasos siguientes se aplican filtros progresivos alineados con los requerimientos estructurales, dinámicos y de masa del vehículo Baja SAE.



Figura 12.- Proyecto de selección.

3.5.2 Paso 2. Índice por objetivo de diseño: densidad

Una vez definido el universo completo de materiales, el segundo paso del procedimiento es la aplicación directa de un límite por densidad en el apartado etapas de selección figura 13, que corresponde a las propiedades físicas estableciendo como criterio una densidad máxima de $\rho \leq 3 \text{ g/cm}^3$.

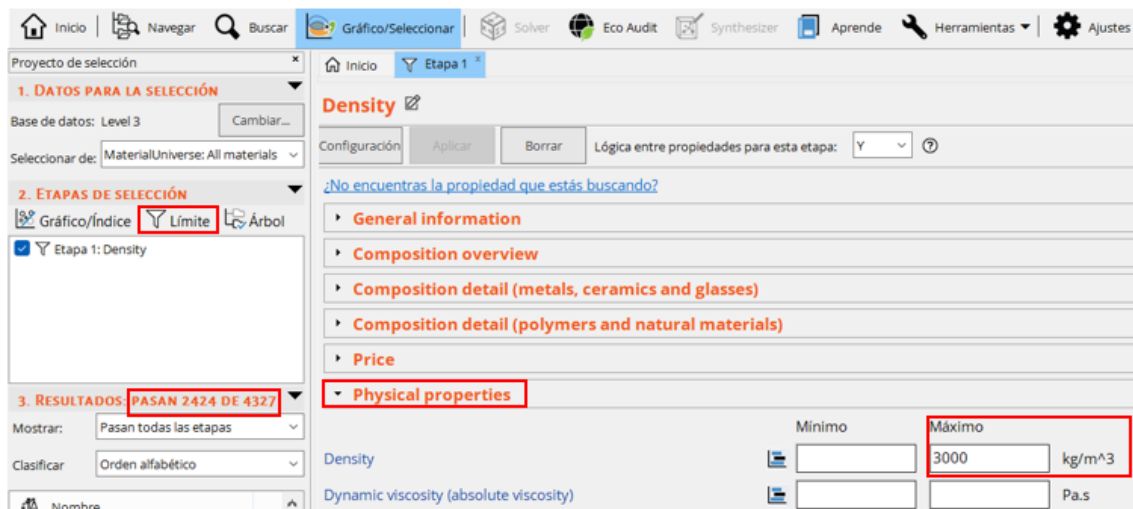


Figura 13.- Propiedad Física - Densidad.

Este filtro se define a partir del objetivo de diseño de minimizar la masa no suspendida del vehículo Baja SAE. La mangueta forma parte del conjunto rueda y suspensión, por lo que una reducción en su masa contribuye a mejorar la respuesta dinámica del sistema de suspensión, el contacto neumático terreno y el comportamiento general del vehículo en superficies irregulares.

Desde un punto de vista metodológico, la densidad se utiliza como uno de los primeros filtros para eliminar de manera temprana materiales que, aun presentando alta resistencia mecánica, penalizan de forma significativa el peso del componente. En particular, este criterio descarta la mayoría de los aceros estructurales, aceros aleados y fundiciones ferrosas, cuya densidad típica se encuentra alrededor de 7.8 g/cm^3 [21].

Tras aplicar este filtro en EduPack, el conjunto de materiales restantes queda limitado principalmente a:

- Aleaciones ligeras (aluminio y magnesio)
- Polímeros de ingeniería
- Polímeros reforzados con fibra
- Algunos materiales compuestos avanzados

Como resultado de este paso, el espacio de diseño se reduce de manera significativa pasando de 4327 materiales iniciales a 2424 materiales como se observó en la figura 13, eliminando materiales metálicos densos y enfocando el análisis en alternativas con mayor potencial de optimización de peso. Este filtro inicial establece la base para los pasos posteriores, donde se evaluará si estos materiales ligeros cumplen también con los requerimientos mínimos de rigidez y resistencia mecánica necesarios para la aplicación estructural de la mangueta.

3.5.3 Paso 3. Índice de rigidez mínima: módulo de Young

Con el conjunto de materiales previamente reducido mediante el filtro de densidad, el siguiente paso del procedimiento es la aplicación de un índice de rigidez mínima o módulo de Young como propiedad de control. En el apartado etapas de selección y limite figura 14, correspondiente a las propiedades mecánicas del proyecto se establece un valor mínimo de $E \geq 35$ GPa, de acuerdo con los requerimientos estructurales de la mangueta previamente mencionados en la tabla 3.

The screenshot displays the software's selection and limit stages. On the left, under '2. ETAPAS DE SELECCIÓN', 'Etapas de selección' and 'Limite' are selected. The main area shows 'Young's modulus' configuration. A red box highlights the 'Mínimo' value of 35 GPa. Below, under 'Mechanical properties', another red box highlights the 'Mínimo' value of 35 GPa. The interface also shows a list of materials at the bottom, including 'Al(2009)-15WSiC(w) MMC powder'.

Figura 14.- Propiedad Mecánica - Modulo de Young.

Este paso se define a partir de la necesidad de limitar deformaciones elásticas en la mangueta durante condiciones de carga típicas de operación, tales como frenado, apoyo lateral en curvas y circulación sobre terreno irregular. Una rigidez insuficiente provocaría desplazamientos excesivos que afectan la geometría de la suspensión, el alineamiento de la rueda y el desempeño dinámico del vehículo.

Desde el punto de vista metodológico, el módulo de Young se utiliza como un criterio discriminante para separar materiales ligeros de carácter estructural de aquellos que, aun cumpliendo con el requisito de baja densidad, no presentan la rigidez necesaria para aplicaciones sometidas a cargas multiaxiales. Este filtro permite eliminar de manera directa polímeros no estructurales y elastómeros, cuyos valores típicos de módulo de elasticidad se encuentran muy por debajo del rango requerido [27].

Como resultado de este paso, el espacio de diseño se reduce nuevamente de 2424 materiales a 596, conservando únicamente materiales que cumplen con los objetivos de baja densidad y rigidez suficiente para la función estructural de la mangueta.

3.5.4 Construcción e interpretación de gráficas Ashby

Con los índices establecidos en el paso 2 y 3 nos permite evaluar la rigidez específica de los materiales candidatos y comparar de forma visual las distintas familias disponibles. Dando paso a el apartado grafico/índice la cual se configura el eje vertical con la propiedad mecánica módulo de Young y el eje horizontal con la propiedad física de densidad.

Como se observa en la figura 15 se cargan los materiales previamente filtrados para que el programa los represente en el espacio $E - \rho$, permitiendo visualizar la distribución por familias. Activando las opciones de identificación y etiquetas para reconocer las familias de materiales y analizar las regiones con mayor rigidez específica, lo que permite continuar con la evaluación comparativa y los siguientes criterios de selección [23].

Al aplicar la gráfica en EduPack, el conjunto de materiales restantes queda limitado principalmente a:

- Aleaciones ligeras con comportamiento estructural
- Polímeros de ingeniería de alta rigidez
- Polímeros reforzados con fibra y materiales compuestos

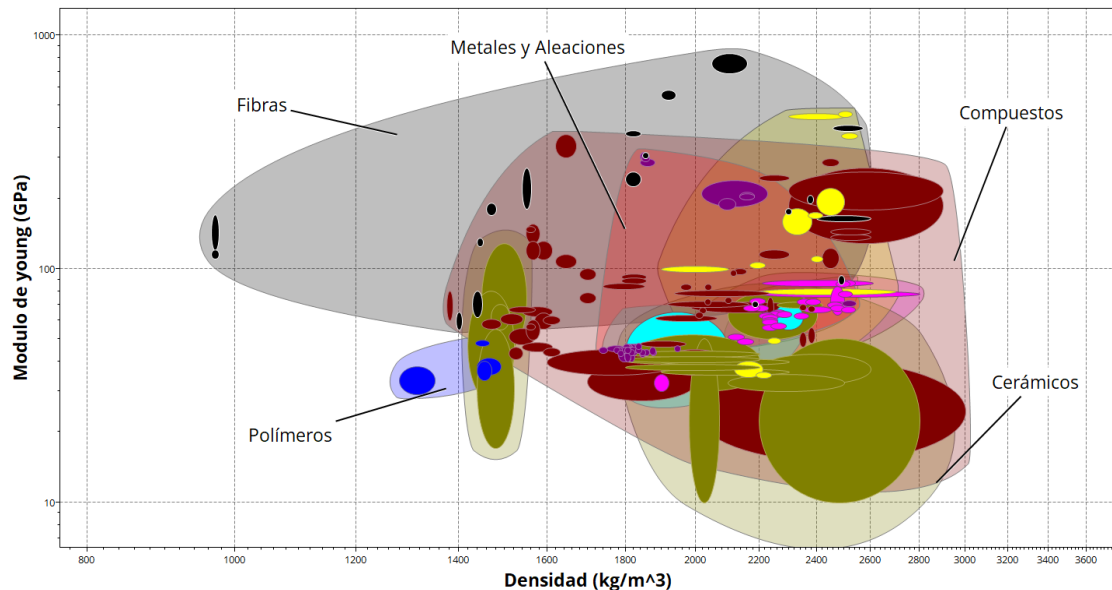


Figura 15.- Módulo de Young - Densidad.

La gráfica muestra qué materiales combinan un módulo elástico con una densidad moderada, característica fundamental para componentes no suspendidos que deben mantener la geometría de la suspensión sin incrementar excesivamente la masa del vehículo. A partir de esta herramienta se identifican las regiones con mayor potencial, permitiendo descartar cerámicos y enfocar la selección en polímeros y fibras con mejor desempeño estructural.

3.5.5 Paso 4. Índice de resistencia a la tracción mínima (Tensile Strength)

Una vez aplicado el criterio de rigidez, el siguiente paso consiste en asegurar que los materiales candidatos sean capaces de soportar los niveles de carga mecánica a los que estará sometida la mangueta durante condiciones reales de operación. En este punto, el objetivo no es aún seleccionar un material

definitivo, sino descartar aquellos cuya resistencia sea claramente insuficiente, aun cuando cumplan con los requisitos de rigidez.

El uso de la resistencia a la tracción como criterio permite asegurar que el material conserve su integridad estructural ante cargas extremas, proporcionando un margen de seguridad adecuado antes de la fractura. De la misma forma que los pasos previos se proceden a limitar el valor mínimo de 200 MPa en propiedades mecánicas como se observa en la figura 16, este índice se adopta con base en los rangos de desempeño establecidos previamente y en valores típicos reportados para manguetas y componentes estructurales ligeros en aplicaciones automotrices.

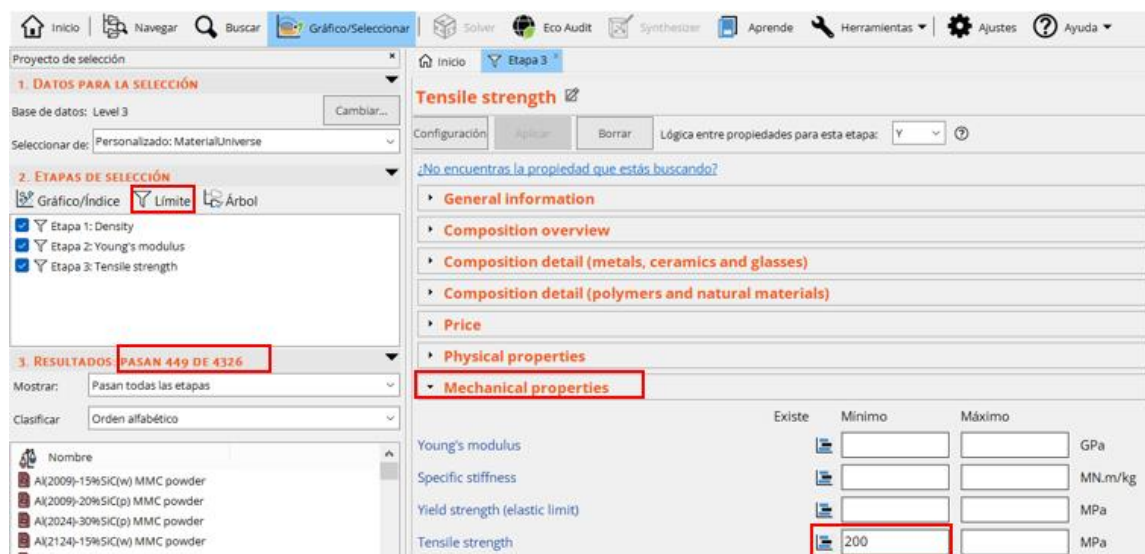


Figura 16.- Propiedad Mecánica - Resistencia a la tracción.

Como resultado de este paso, el espacio de diseño se reduce nuevamente de 596 materiales a 449, conservando únicamente materiales que cumplen con los objetivos de baja densidad, rigidez suficiente y resistencia a la tracción para la función estructural de la mangueta.

Con los índices establecidos en el paso 3 y 4 nos permite evaluar la rigidez específica de los materiales candidatos y comparar de forma visual las distintas familias disponibles. Dando paso a el apartado grafico/índice la cual se configura

el eje vertical con la propiedad mecánica módulo de Young y el eje horizontal con la resistencia de tracción respectiva de cada material.

Tras la aplicación de este criterio como se observa en la figura 17, se eliminan las cerámicas no reforzadas y los materiales de bajo desempeño estructural que no alcanzan el umbral mínimo de resistencia mecánica establecido. Como resultado, permanecen únicamente materiales con comportamiento estructural avanzado, principalmente aleaciones ligeras y polímeros reforzados con fibra de vidrio o fibra de carbono.

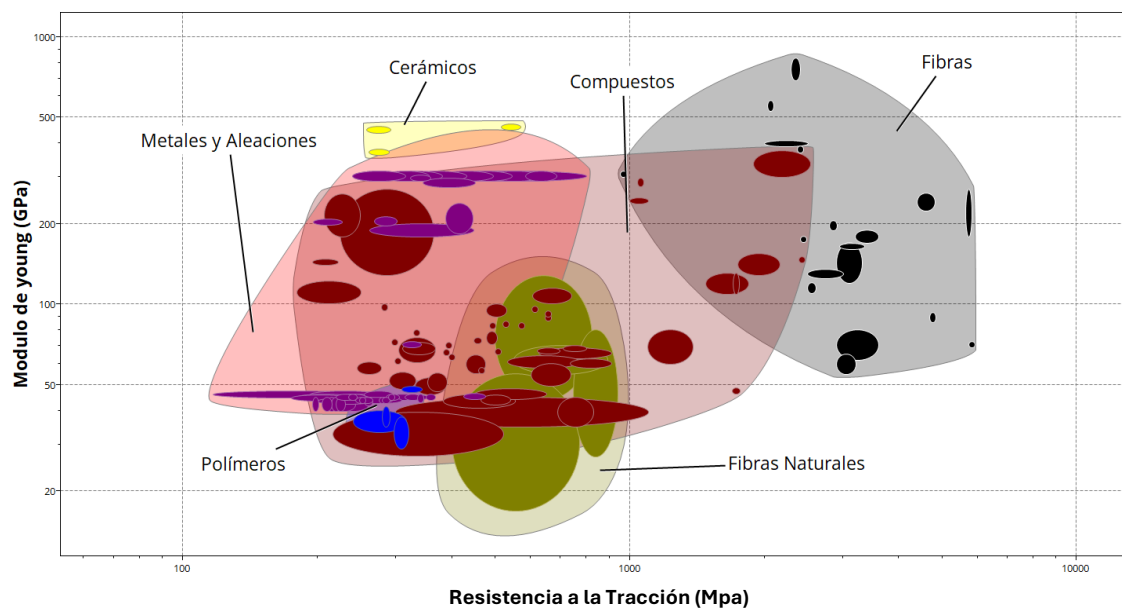


Figura 17.- Módulo de Young - Resistencia a la tracción.

Este filtro representa un punto de transición clave en el proceso de selección, ya que garantiza que todos los materiales que continúan en el análisis cumplen con un nivel mínimo de resistencia mecánica antes de ser evaluados mediante criterios adicionales como propiedades de impacto y la aplicación de índices de desempeño.

3.5.6 Paso 5. Índice de Tenacidad o fractura (Toughness)

Una vez garantizados los requisitos mínimos de densidad, rigidez y resistencia a la tracción, el siguiente paso del proceso consiste en evaluar la capacidad de los materiales para absorber energía sin presentar fallas frágiles.

La mangueta en este enfoque se encuentra expuesta a impactos repetitivos, cargas dinámicas y concentraciones de esfuerzo en zonas de contacto con rodamientos y elementos de sujeción, por lo que no es suficiente que el material sea resistente; también debe poseer una adecuada tenacidad.

La tenacidad a la fractura representa la capacidad del material para resistir la propagación de grietas ante la presencia de defectos o concentradores de esfuerzo. En aplicaciones todo terreno, donde los eventos de impacto son frecuentes, un material con baja tenacidad puede presentar fallas súbitas aun cuando cumpla con los requisitos de resistencia estática.

Por esta razón, se incorpora como nuevo criterio de filtrado la propiedad de tenacidad a la fractura, de acuerdo con los rangos mínimos establecidos previamente, se define un valor de Toughness $\geq 3.5 \text{ kJ/m}^2$, el cual se introduce en el software como límite inferior de selección, tal como se muestra en la figura 18. Este valor permite descartar materiales con comportamiento frágil, particularmente ciertos metales y fibras no reforzados, compuestos con baja capacidad de absorción de energía.

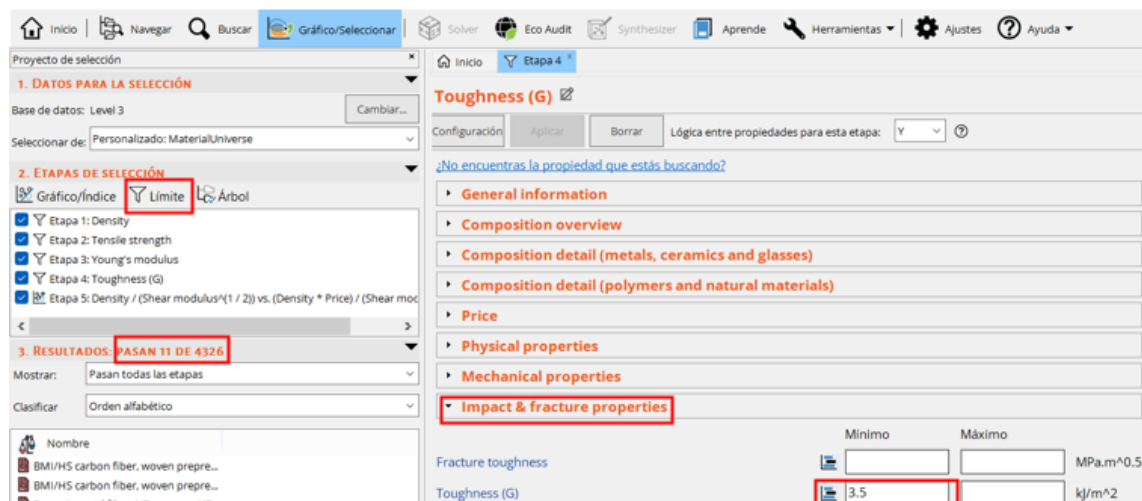


Figura 18.- Propiedad mecánica - Tenacidad (Toughness).

La aplicación de este índice reduce nuevamente de 449 materiales a 11 el espacio de materiales, conservando únicamente aquellos materiales que, además de ser ligeros, rígidos y resistentes, presentan un comportamiento dúctil

adecuado frente a impactos. Este paso resulta fundamental para diferenciar entre materiales que, aun mostrando valores similares de resistencia a la tracción, pueden tener desempeños muy distintos ante condiciones reales de operación.

Como resultado de este filtro, permanecen principalmente polímeros reforzados con fibra de vidrio y fibra de carbono, así como algunas aleaciones ligeras con buena respuesta a impacto. Materiales con baja tenacidad, susceptibles a fractura frágil, son descartados del análisis, garantizando que las alternativas finales posean un equilibrio adecuado entre resistencia y capacidad de absorción de energía.

Este quinto paso complementa los criterios previos y prepara el proceso para la etapa de optimización mediante índices de desempeño, donde se comparará la relación entre rigidez, resistencia y peso de los materiales candidatos con el fin de identificar la opción más adecuada para la mangueta. la selección final no puede basarse únicamente en criterios estructurales, sino que debe integrar el impacto económico del material.

3.5.7 Selección del material y justificación

El espacio de diseño se redujo a un conjunto de once materiales candidatos que cumplen con los requisitos mecánicos mínimos establecidos para la mangueta. A partir de este grupo preseleccionado resulta pertinente aplicar índices de rendimiento adicionales que permitan orientar la elección final hacia el material con mejor balance entre desempeño estructural y costo.

Una vez aplicados los filtros de densidad, rigidez, resistencia a la tracción y tenacidad, el conjunto de materiales candidatos se reduce a un grupo con desempeño mecánico compatible con los requerimientos estructurales de la mangueta. No obstante, para la selección final resulta necesario incorporar el factor económico, ya que el proyecto Baja SAE se desarrolla bajo restricciones presupuestales que obligan a buscar un equilibrio entre desempeño y costo.

3.5.8 Paso 6. Índice de rendimiento resistencia - costo

Con este propósito se empleó un índice de rendimiento técnico-económico basado en el límite elástico, representado mediante la relación entre el límite elástico (σ_y) y el precio por kilogramo del material. La figura 19 muestra la gráfica utilizada, donde el eje horizontal corresponde al costo del material (USD/kg) y el eje vertical al límite elástico (MPa).

Es importante señalar que, de acuerdo con los criterios establecidos previamente en la tabla 3, para componentes tipo mangueta se definió un valor mínimo recomendado de 200 MPa de límite elástico. Por lo tanto, en esta etapa no se busca seleccionar el material con el mayor valor absoluto de resistencia, sino aquellos que superen con un margen razonable el umbral de 200 Mpa y ofrezcan un costo moderado.

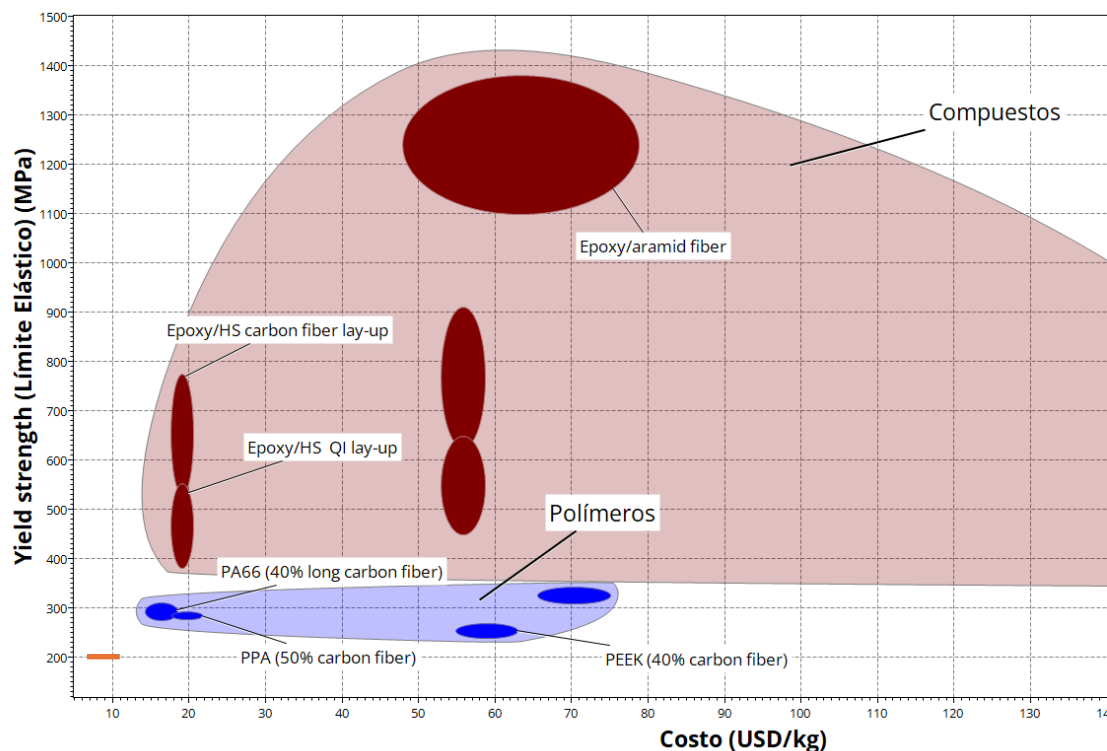


Figura 19.- Limite Elástico MPa - Costo USD/kg.

En la gráfica se observa que diversos materiales compuestos avanzados presentan límites elásticos muy elevados (600-1200 MPa) sin embargo, dichos valores exceden ampliamente las necesidades reales de la aplicación y se asocian a costos superiores a 60-150 USD/kg, lo que los vuelve poco viables para un vehículo Baja SAE.

Por el contrario, los polímeros reforzados ubicados en la región inferior del gráfico muestran, límites elásticos del orden de 250-350 MPa, es decir, por encima del mínimo requerido de 200 Mpa. Esto confirma que no es necesario recurrir a materiales con resistencias extremas, ya que el criterio de diseño se satisface con valores moderados de σ_y , priorizando una mejor relación desempeño-precio.

El índice de rendimiento resistencia - costo permite identificar los materiales que cumplen simultáneamente con los requisitos mecánicos y las restricciones financieras del proyecto. A partir de este análisis, los candidatos con mayor potencial son los materiales presentados en la tabla 4.

Tabla 4.- Materiales Potenciales [21].

Material base	Nombre / Grado comercial	Refuerzo	Costo relativo USD/Kg
PA66	Poliamida 66	40% fibra de carbono	14.3 – 18.4
PPA	Poliftalamida	50% fibra de carbono	17.7 – 21.6
PEEK	Polieter-eter-cetona	40% fibra de carbono	54.9 – 62.9

3.5.9 Paso 7. Índice de eficiencia estructural - Costo por densidad

Una vez identificados los materiales con desempeño mecánico adecuado y una relación técnico - económica favorable, se procede a una evaluación más refinada mediante un índice de eficiencia estructural orientado a minimizar la masa bajo un criterio de resistencia en flexión, incorporando simultáneamente el efecto del costo normalizado por densidad del material.

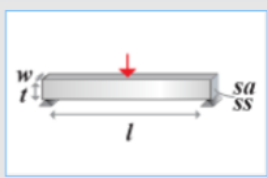
Para este análisis se utilizó el buscador de índices de rendimiento como en la figura 20, modelando el componente como una viga sometida a flexión, condición representativa del comportamiento estructural de la mangueta bajo cargas de servicio. En esta configuración se consideraron como variables libres el área de la sección transversal, mientras que la longitud y la forma de la sección se mantuvieron constantes. La restricción limitante fue la resistencia, y el objetivo de optimización fue la minimización de la masa.

Configuración de la etapa Eje X Eje Y

☐ Propiedad individual o avanzada ☒ Buscador de índice de rendimiento [¿Qué es un índice de rendimiento?](#)

Definición de componentes

Función y carga:



Beam in bending

Notas del componente:
Beams, floor joists, wing spars, levers, cantilevers...

l - length
w - width
t - thickness
sa - section area
ss - section shape

Variables libres: section area

Variables fijas: length, section shape

Restricción limitante: strength

Optimizar: mass

Índice de rendimiento
Minimizar: $\frac{\rho}{\sigma_f^{2/3}}$

☐ Carga cíclica [símbolos](#)

Ajustes del eje

Título del eje: Mass per unit of strength

☐ Logarítmica ☒ Lineal

☐ Escala automática ☒ Conjunto 10 32.37

Figura 20.- Configuración - Índice de rendimiento.

Bajo estas condiciones, el índice de rendimiento empleado corresponde a:

$$M = \frac{\rho}{\sigma_f^{2/3}}$$

donde ρ es la densidad del material y σ_f la resistencia mecánica relevante. Este índice permite identificar aquellos materiales que ofrecen la menor masa estructural por unidad de resistencia como se observa en la figura 21, siendo especialmente útil en componentes donde el peso tiene un impacto directo en el desempeño dinámico del vehículo Baja SAE.

- Eje Y: Masa por unidad de resistencia (kg/MPa), calculada a partir del índice de rendimiento definido para flexión. Valores más bajos en este eje indican una mayor eficiencia estructural, es decir, menor masa requerida para soportar una determinada carga.
- Eje X: Costo por unidad de densidad (USD·m³/kg), configurado mediante una propiedad avanzada que será precio por densidad. Esta normalización permite comparar materiales no solo por su precio absoluto, sino por su costo relativo considerando su densidad.

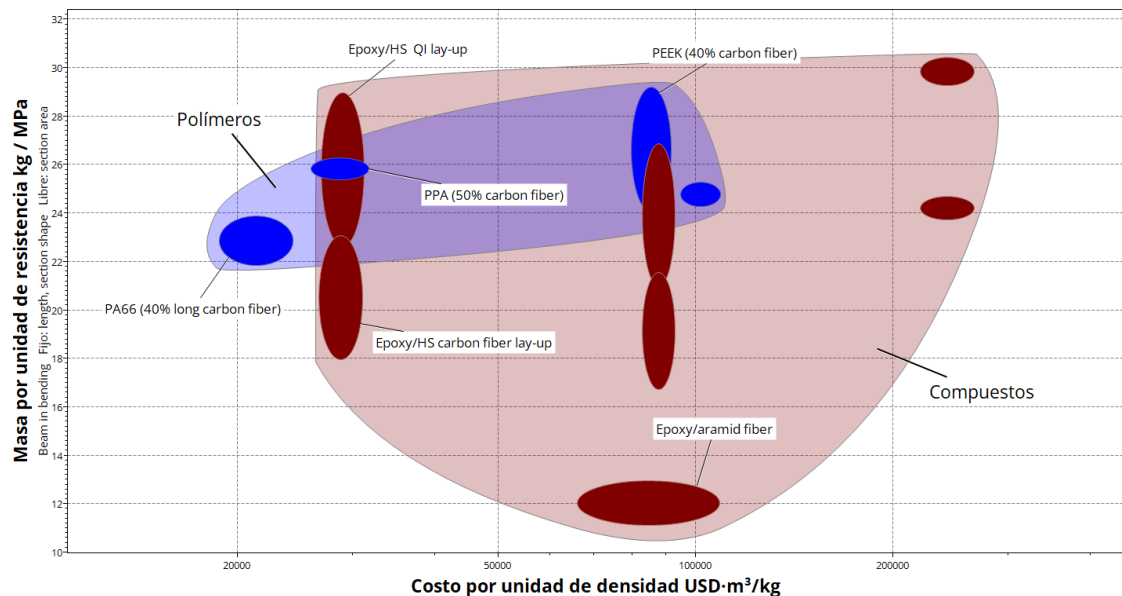


Figura 21.- Índice de rendimiento estructural y costo.

En la figura 21 se distinguen claramente dos grandes familias de materiales: polímeros reforzados y compuestos avanzados. Los materiales compuestos de matriz termoestable con refuerzos continuos (epoxy/aramid fiber) presentan valores muy bajos de masa por unidad de resistencia, lo que evidencia un desempeño estructural sobresaliente. Sin embargo, estos materiales se concentran en la región de alto costo normalizado, lo que limita su viabilidad para un proyecto con restricciones presupuestales como Baja SAE.

Por otro lado, los polímeros reforzados con fibra, como PA66 con 40% de fibra de carbono y PPA con 50% de fibra de carbono, se ubican en una región intermedia de la gráfica, donde se logra un compromiso favorable entre eficiencia estructural y costo. En particular, estos materiales muestran:

- Valores de masa por unidad de resistencia significativamente menores que los de polímeros no reforzados.
- Costos normalizados sensiblemente inferiores a los de los compuestos avanzados.
- Un comportamiento mecánico compatible con los requerimientos estructurales de la mangueta.

El material PEEK con 40% de fibra de carbono destaca por su excelente eficiencia estructural, acercándose al desempeño de los compuestos avanzados; no obstante, confirma nuevamente que su costo constituye una desventaja significativa para la aplicación considerada.

Por lo tanto, el índice de eficiencia estructural con costo permite refinar la selección de materiales al integrar simultáneamente criterios de masa, resistencia y costo, todos ellos críticos en el diseño de componentes para vehículos Baja SAE. A partir de este análisis se confirma que los polímeros reforzados con fibra de carbono, particularmente:

- PA66 40% fibra de carbono

- PPA 50% fibra de carbono

Ofrecen el mejor equilibrio entre desempeño estructural, reducción de masa y viabilidad económica. En lugar de limitar la investigación a un único material, se determina la selección de ambos compuestos como candidatos finales para la etapa de validación numérica. Esta decisión metodológica permite realizar un análisis comparativo bajo condiciones de carga equivalentes, evaluando su comportamiento en términos de esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad.

La selección de ambos materiales responde a la necesidad de realizar una evaluación comparativa bajo condiciones de carga equivalentes, permitiendo cuantificar diferencias en términos de esfuerzos máximos, deformaciones y factores de seguridad.

3.6 Antecedentes de materiales seleccionados

Poliamida 66 reforzada con 40% de fibra de carbono (PA66 40% CF) pertenece a la familia de los polímeros termoplásticos de ingeniería reforzados con fibra, específicamente a las poliamidas alifáticas. La poliamida 66 es ampliamente reconocida por su buen equilibrio entre resistencia mecánica, estabilidad térmica y resistencia al desgaste; mientras que la incorporación de un alto contenido de fibra de carbono incrementa significativamente su rigidez, resistencia y capacidad de carga, al mismo tiempo que reduce la deformación bajo esfuerzos mecánicos [28].

Este material se emplea comúnmente en aplicaciones donde se requiere una alta relación resistencia - peso, buena estabilidad dimensional y comportamiento confiable bajo cargas dinámicas. En el sector automotriz, el PA66 40% CF se utiliza en componentes estructurales y semiestructurales tales como soportes, carcasas, brazos de montaje, elementos de suspensión ligera y piezas sometidas a vibraciones y sollicitaciones cíclicas. Su naturaleza termoplástica permite además procesos de manufactura eficientes, como el

moldeo por inyección, lo que lo convierte en una alternativa atractiva frente a metales en aplicaciones donde la reducción de masa es un factor crítico [28,29].

Adicionalmente, el PA66 reforzado con fibra de carbono presenta una buena compatibilidad con entornos automotrices exigentes, ofreciendo resistencia a la fatiga, al impacto moderado y a temperaturas elevadas, así como estabilidad frente a aceites, combustibles y otros agentes químicos comúnmente presentes en vehículos. Estas características han favorecido su adopción tanto en la industria automotriz convencional como en aplicaciones de ingeniería avanzada, incluyendo prototipos y vehículos de competencia, donde se busca maximizar el desempeño estructural sin incurrir en penalizaciones significativas de peso o costo [29].

La poliftalamida reforzada con 50 % de fibra de carbono (PPA 50% CF) de igual forma pertenece a la familia de los polímeros termoplásticos de ingeniería de alto desempeño, específicamente al grupo de las poliamidas parcialmente cristalinas, esta se caracteriza por presentar mayor estabilidad térmica y menor absorción de humedad en comparación con las poliamidas alifáticas convencionales, como la PA66. La incorporación de un 50 % de fibra de carbono incrementa significativamente su módulo de elasticidad, resistencia mecánica y capacidad de carga, mejorando su comportamiento bajo solicitaciones estructurales exigentes y reduciendo la deformación ante esfuerzos elevados [35].

En el sector automotriz, el PPA reforzado con fibra de carbono se utiliza en componentes estructurales sometidos a cargas elevadas y temperaturas superiores a las toleradas por poliamidas tradicionales, tales como soportes estructurales, carcasas de sistemas de potencia, componentes cercanos al motor y elementos sometidos a esfuerzos. Su naturaleza termoplástica permite su procesamiento mediante moldeo por inyección, facilitando la producción de geometrías complejas con repetibilidad dimensional y eficiencia industrial [36].

Adicionalmente, el PPA 50% CF presenta excelente resistencia a la fatiga, alta rigidez específica y buen comportamiento frente a agentes químicos agresivos, incluyendo aceites, combustibles y fluidos automotrices. Estas características lo posicionan como un material de ingeniería avanzado para aplicaciones automotrices de alto desempeño, incluyendo vehículos de competencia y desarrollos experimentales donde la reducción de masa y el incremento de rigidez estructural son factores determinantes [35,36].

En consecuencia, el estudio no se limita a una validación individual, sino que incorpora un análisis comparativo que permitirá determinar cuál de los dos compuestos presenta un desempeño estructural más favorable para la aplicación específica de la mangueta.

La decisión final se establecerá con base en los resultados obtenidos del análisis estático y dinámico por elemento finito, asegurando que la selección del material esté sustentada en evidencia numérica y criterios técnicos objetivos.

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTACIÓN COMPUTACIONAL

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta la metodología de experimentación computacional utilizada para el diseño, análisis y optimización de la mangueta del vehículo Baja SAE. El proceso integra el modelado CAD, la definición de cargas y restricciones, el análisis por elemento finito y la optimización topológica como se observa en la figura 22.

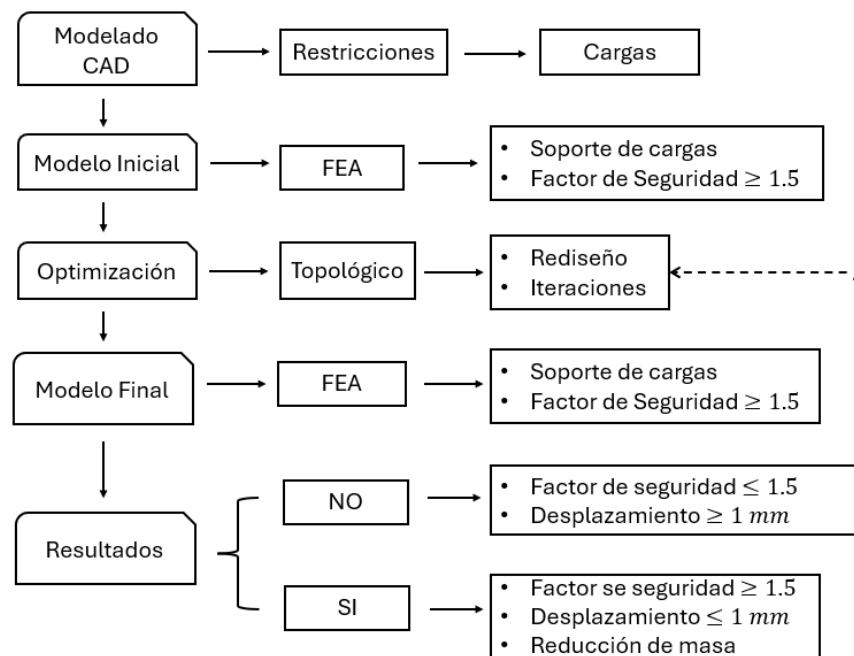


Figura 22.- Proceso de experimentación computacional.

El proceso de experimentación computacional parte de un modelo inicial que es evaluado estructural y posteriormente optimizado mediante un proceso iterativo, hasta cumplir con los criterios de diseño establecidos, tales como el

factor de seguridad y los límites de desplazamiento. Concluyendo con la validación del modelo final, considerando criterios de diseño, factor de seguridad mínimo y límites permisibles de desplazamiento.

4.2 Diseño preliminar del componente

El diseño preliminar de la mangueta se desarrolló a partir de una configuración previamente implementada en un vehículo participante en la competencia Baja SAE. Dicho diseño fue concebido y desarrollado por el autor de esta investigación como integrante del equipo Borregos Toluca 2023, siendo implementado y validado en condiciones reales de competencia dentro del marco de Baja SAE.

La geometría corresponde a un sistema de suspensión independiente tipo doble horquilla, en el cual la mangueta cumple la función estructural de enlace entre los brazos de suspensión, el sistema de dirección, el conjunto de freno y el sistema de rodamiento de la rueda como se observa en la figura 23. La validación empírica obtenida durante la participación en competencia permitió establecer una base geométrica funcional, reduciendo la incertidumbre asociada a un diseño conceptual sin antecedentes operativos.

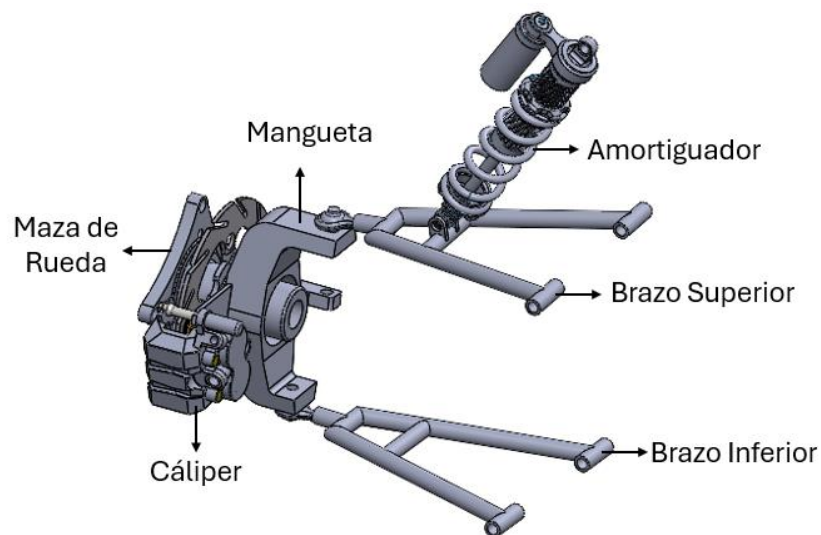


Figura 23.- Ensamble general del sistema.

Asimismo, en la figura 23 se muestra el ensamble general del sistema de suspensión donde se observa la interacción de la mangueta con los brazos superior e inferior de la suspensión, el amortiguador y el sistema de freno.

El diseño preliminar fue definido considerando los siguientes requerimientos funcionales:

- Alojamiento del rodamiento y la maza mediante un diámetro interno adecuado.
- Integración de puntos de fijación para los brazos de suspensión.
- Interfaz estructural con el sistema de dirección.
- Superficie de montaje para el cáliper de freno.
- Capacidad estructural para soportar cargas combinadas (radiales, axiales y momentos flectores).

En esta etapa, la geometría base no fue modificada con fines de reducción de masa, ya que su propósito principal fue servir como referencia inicial para la validación estructural y posterior optimización mediante análisis numérico.

4.3 Modelado CAD

El componente fue modelado tridimensionalmente mediante el software SolidWorks, con el objetivo de obtener una representación geométrica precisa que permitiera su posterior evaluación estructural. El modelo conserva las características dimensionales y configuraciones de interfaz definidas en el diseño preliminar, garantizando compatibilidad con los elementos del sistema de suspensión, dirección y freno.

Durante el proceso de modelado se prestó especial atención a las zonas funcionales críticas del componente, tales como el alojamiento del rodamiento, fijaciones de los brazos de suspensión superior e inferior, la conexión con el

sistema de dirección y la superficie de montaje del cáliper de freno. Estas regiones fueron definidas con transiciones geométricas controladas, con el propósito de minimizar concentraciones de esfuerzo asociadas a cambios abruptos de sección. El plano 2D de la mangueta se presenta en el Apéndice C.

En la figura 24 se presenta el modelo CAD final de la mangueta, el cual constituye la geometría base utilizada para el análisis estructural desarrollado en los apartados siguientes.

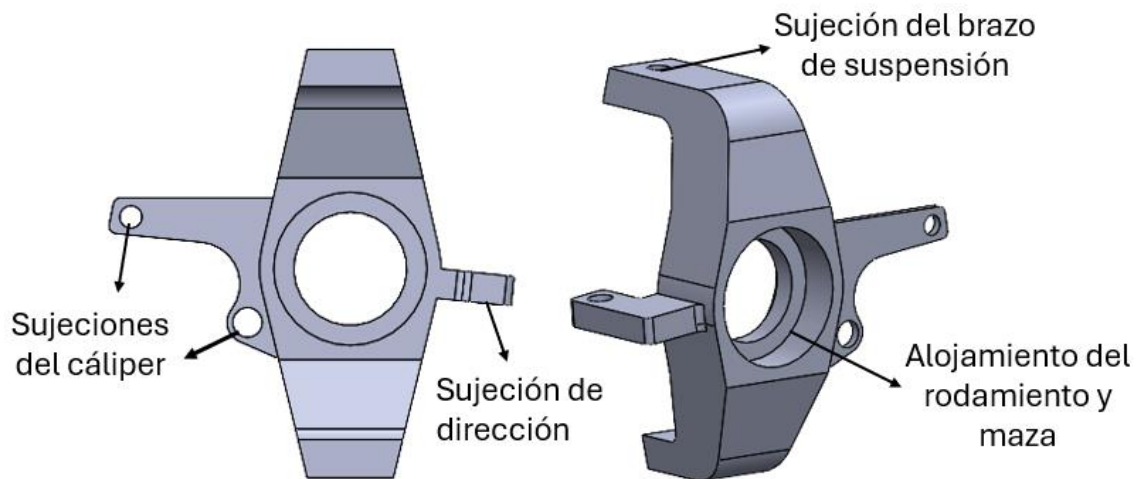


Figura 24.- Vista frontal e isométrica de la mangueta.

Desde el punto de vista mecánico, la mangueta en un vehículo participante en la competencia Baja SAE está sometida a un estado de cargas combinadas derivadas de las condiciones severas de operación todo terreno. Estas solicitaciones incluyen:

- Cargas radiales asociadas al peso del vehículo y a impactos verticales generados por irregularidades del terreno.
- Cargas laterales producidas durante maniobras de giro y eventos dinámicos de cambio de dirección.
- Cargas longitudinales inducidas por frenado y aceleración.
- Momentos flectores resultantes de la geometría del sistema de suspensión y la transferencia dinámica de carga.

4.4 Definición de restricción y cargas

Para la correcta evaluación estructural de la mangueta mediante el método de elemento finito, es necesario establecer adecuadamente las condiciones de frontera y las cargas externas que actúan sobre el componente durante su operación.

En esta investigación la restricción se define en la zona correspondiente al alojamiento del rodamiento, ya que este punto representa la interfaz estructural entre la mangueta y la maza de rueda. Esta región actúa como punto de transferencia de cargas hacia el sistema de suspensión y el chasis, por lo que se considera como condición de apoyo fijo para el análisis estático estructural.

Como referencia principal se adopta el estudio de Garg *et al.* (2022) [37], en el cual las cargas y condiciones de frontera fueron establecidas a partir del análisis dinámico del vehículo y la interacción de la mangueta con los sistemas de suspensión, dirección y freno. En dicho trabajo, la mangueta fue evaluada bajo seis condiciones principales de carga, que representan los distintos escenarios críticos de operación en vehículos de competencia SAE. Las cargas consideradas incluyen carga estática, fuerza de dirección, fuerza lateral o de giro, fuerza de frenado entre otras [37].

Cabe mencionar que las cargas reportadas en el estudio de referencia se adoptan como base metodológica y se adecuan a las condiciones particulares del modelo de mangueta desarrollado en el presente trabajo, lo que puede implicar variaciones en sus magnitudes respecto al estudio original.

4.5 Condiciones y cargas estructurales

Para la determinación de las cargas aplicadas a la mangueta delantera, se definieron los parámetros geométricos del vehículo Baja SAE disponible en la institución. Estos parámetros permiten establecer las condiciones de carga bajo las cuales operará el componente estructural. En la tabla 5 se presentan los valores considerados para el desarrollo de los cálculos de carga.

Tabla 5.- Parámetros del vehículo

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Masa total del vehículo con conductor	m	250	kg
Diámetro de la rueda	D_r	18	in
Radio de la rueda	r	0.2286	m
Altura del centro de gravedad	h_{cg}	285	mm
Distancia entre ejes	L_e	1550	mm
Distribución de peso		60 / 40	%

En el presente estudio, la mangueta se somete a 4 tipos principales de carga, los cuales son modelados a partir de las expresiones analíticas mostradas en la tabla 6. Las cargas consideradas incluyen:

- Carga vertical estática
- Fuerza de dirección
- Fuerza vertical por impacto
- Fuerza de frenado

La carga estática representa el peso aplicado sobre la mangueta debido a la masa soportada por la rueda correspondiente. La fuerza de dirección actúa en el eje longitudinal del vehículo, asociada al esfuerzo transmitido por el sistema de dirección. La fuerza vertical por impacto se genera como resultado de la trayectoria en terrenos irregulares aumentando su fuerza de gravedad. Finalmente, la fuerza de frenado se aplica en los puntos de montaje del sistema de frenos, representando el par de frenado transmitido a la mangueta [37].

Tabla 6.- Cargas Estructurales.

Condición de carga	Formula	Fuerza aplicada (N)	Descripción
1) Fuerza vertical	$F_v = m_{rueda} * g$	588	Fuerza que la rueda transmite a la mangueta debido a su peso
2) Fuerza de frenado	$F = \frac{T_{br}}{R_{rotor}}$	4033	Fuerza transmitida a cada mangueta durante una condición de frenado
3) Fuerza de dirección	$F = \frac{F_y \cdot r_{scrub}}{r_{brazo}}$	1495	Fuerza requerida en la dirección para girar el vehículo
4) Carga vertical por impacto BI	$F_v = n \cdot m_{rueda} \cdot g$	1058	Carga en el brazo Inferior de suspensión por irregularidades del terreno, Brazo Inferior.
5) Carga Vertical por impacto BS	$F_v = n * m_{rueda} * g$	706	Fracción de carga por irregularidades del terreno Brazo superior

Para mayor detalle, el desarrollo matemático de las expresiones utilizadas y el cálculo de las fuerzas se incluyen en el Apéndice B.

4.6 Análisis estructural por elementos finitos

El análisis estructural de la mangueta se realizó mediante el método de elemento finito utilizando el software SolidWorks Simulation, con el objetivo de evaluar su comportamiento bajo las condiciones de carga previamente definidas. El estudio se desarrolló bajo un enfoque de análisis estático, considerando diferentes materiales para determinar su desempeño mecánico en términos de esfuerzos y deformaciones. A partir de los resultados obtenidos, se plantea posteriormente una etapa de optimización topológica orientada a la reducción de masa y mejora del desempeño estructural del componente.

4.6.1 Propiedades del material

Para el desarrollo del análisis estructural, se consideraron materiales compuestos que no se encuentran disponibles en la biblioteca estándar de SolidWorks, por lo que fue necesario definir manualmente sus propiedades mecánicas dentro del software.

Los materiales analizados corresponden a las tablas 7 y 8, donde se muestran las propiedades definidas para cada material dentro del software, las cuales fueron utilizadas para la evaluación estructural de la mangueta bajo las condiciones de carga establecidas.

Tabla 7.- Poliamida 66 reforzada con 40% de fibra de carbono.

Propiedad (PA66 40% CF)	Valor	Unidades
Módulo elástico	29000	N/mm^2
Límite elástico	266	N/mm^2
Densidad de masa	1350	Kg/m^3
Coefficiente de Poisson	0.31	N/D

Tabla 8.- Poliftalamida reforzada con 50% de fibra de carbono.

Propiedad (PPA 50% CF)	Valor	Unidades
Módulo elástico	35000	N/mm^2
Límite elástico	270	N/mm^2
Densidad de masa	1490	Kg/m^3
Coefficiente de Poisson	0.33	N/D

Las propiedades mecánicas de ambos materiales, tales como módulo de elasticidad, límite de fluencia, densidad y coeficiente de Poisson, fueron ingresadas manualmente en el entorno de simulación con base en hojas técnicas obtenidas del capítulo 3 de selección de materiales con Ansys EduPack que se observan en el Apéndice A, complementadas con literatura dejando así valores conservadores de los materiales seleccionados.

4.6.2 Condiciones de frontera

La condición de frontera del modelo se definió en la zona correspondiente al alojamiento del rodamiento, con el fin de representar la restricción del movimiento en la interfaz entre la mangueta y la maza de rueda.

Esta región se modeló como un apoyo fijo, permitiendo simular la transferencia de cargas hacia el sistema de suspensión y el chasis. En la figura 25, se muestra la ubicación de la condición de frontera aplicada en el modelo.

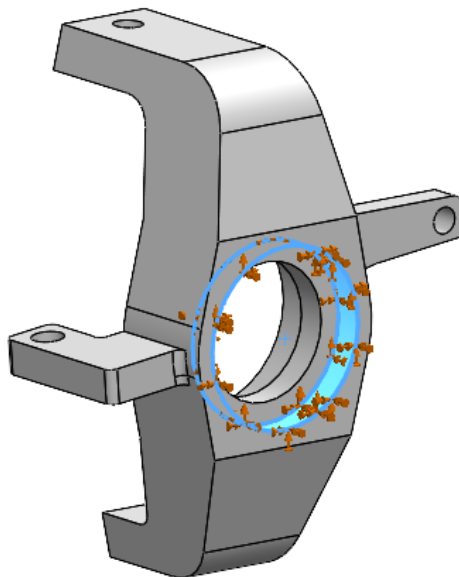


Figura 25.- Condición de frontera en rodamiento.

4.6.3 Definición de cargas

La aplicación de cargas en el modelo de elemento finito se realizó con base en la tabla 6 de cargas estructurales, la cual define las condiciones de operación para la mangueta del vehículo Baja SAE. En la figura 26, se muestra la distribución de dichas cargas sobre el modelo.

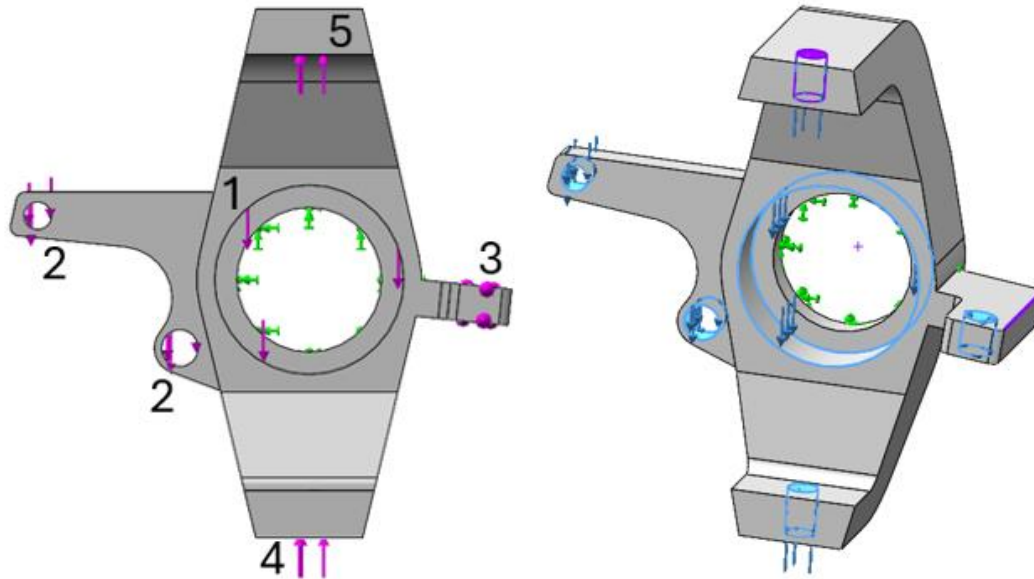


Figura 26.- Distribución de cargas.

Posterior a la aplicación de las cargas, se verificó que cada una de ellas estuviera correctamente orientada y aplicada en las regiones correspondientes del modelo, asegurando la coherencia con las condiciones físicas de operación del sistema de suspensión y dirección. Esta configuración permitió simular de manera adecuada la transferencia de esfuerzos en la mangueta bajo distintos escenarios de carga, garantizando la validez del análisis estructural realizado.

4.6.4 Mallado y estudio de convergencia

El mallado del modelo se generó utilizando el módulo de simulación de SolidWorks, empleando una malla sólida basada en curvatura con refinamiento fino, con el objetivo de capturar adecuadamente las concentraciones de esfuerzo en zonas críticas de la geometría. En la figura 27 se presenta la discretización del modelo mediante elementos finitos.

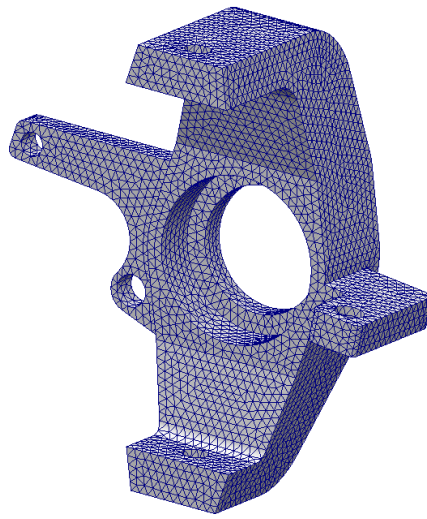


Figura 27.- Mallado con refinamiento fino.

El mallado está compuesto por un total de 156,432 nodos y 115,479 elementos, utilizando elementos cuadráticos de alto orden para mejorar la precisión de los resultados. Se empleó un mallado basado en curvatura combinado, con 16 puntos jacobianos para garantizar la calidad de los elementos. El tamaño máximo de elemento es de 3.38 mm, mientras que el tamaño mínimo de 1.12 mm, permitiendo un adecuado balance entre precisión y costo computacional.

Con el objetivo de verificar la estabilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos, se realizó un estudio de convergencia mediante el método h, basado en el refinamiento progresivo de la malla. Para ello, se utilizó un refinamiento fino con control de curvatura, permitiendo representar de manera más precisa las zonas con cambios geométricos y concentraciones de esfuerzo presentes en la mangueta. La figura 28 muestra la convergencia de la tensión máxima de Von Mises conforme aumenta el número de nodos y el refinamiento de la discretización.

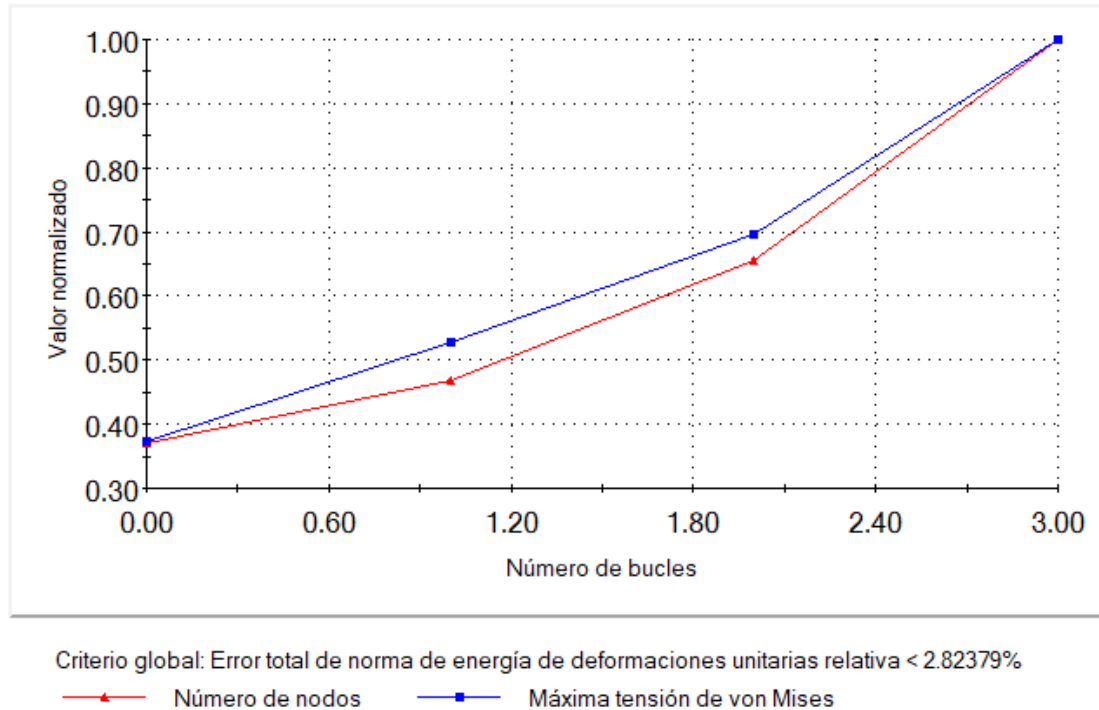


Figura 28.- Gráfico de convergencia del método h.

Durante las primeras iteraciones de mallado se identificaron concentraciones elevadas de esfuerzo asociadas a la discretización inicial de la geometría. Sin embargo, al implementar el refinamiento fino basado en curvatura, se logró una representación más adecuada de las regiones críticas y una distribución de esfuerzos más estable. El estudio de convergencia confirmó que la solución numérica alcanzó un comportamiento estable, validando el uso de la malla final para el desarrollo de los análisis estructurales posteriores.

El estudio de convergencia mostró que el refinamiento fino con control de curvatura permitió estabilizar los resultados de esfuerzo de Von Mises, obteniéndose un error relativo inferior al 2.82379%, considerado aceptable para validar la precisión del modelo.

4.7 Estrategia de optimización del diseño

Con el objetivo de mejorar el desempeño estructural de la mangueta y reducir su peso, se llevó a cabo un proceso de optimización del diseño mediante el módulo de optimización topológica del software SolidWorks.

Este enfoque permite identificar la distribución óptima de material dentro del volumen de diseño, eliminando material en zonas de baja solicitación y conservándolo en regiones críticas.

El estudio de optimización se desarrolló a partir de los resultados obtenidos en el análisis estructural previo, utilizando las mismas condiciones de carga y restricciones, con el fin de garantizar coherencia entre ambas etapas del análisis. A partir de esta metodología, se buscó obtener una geometría más eficiente en términos de relación resistencia-peso, manteniendo la integridad estructural del componente bajo las condiciones de operación definidas.

4.7.1 Condiciones y criterios de optimización

El proceso de optimización topológica se definió utilizando las mismas condiciones de carga y puntos de fijación establecidos en la figura 26 previo al análisis estático, asegurando así la consistencia en la evaluación del comportamiento estructural de la mangueta.

Adicionalmente, se establecieron condiciones de manufactura dentro del entorno de optimización mediante la definición de regiones conservadas como se observa en la figura 29, las cuales corresponden a zonas funcionales críticas del componente, tales como el alojamiento del rodamiento, los puntos de unión con los brazos de suspensión y las interfaces con el sistema de dirección y freno. Estas regiones fueron excluidas del proceso de eliminación de material para garantizar la viabilidad funcional del diseño.

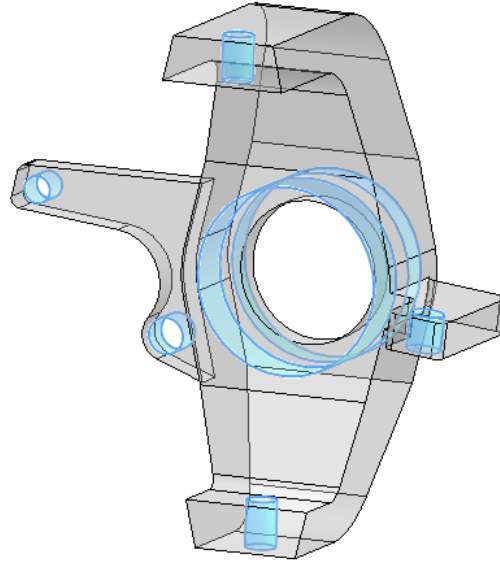


Figura 29.- Regiones Conservadas.

En cuanto a los objetivos de optimización, se definió como criterio principal la maximización de la rigidez estructural en relación con el peso del componente. Asimismo, se estableció como objetivo una reducción de masa del 30% y 50% respecto al diseño original, buscando un equilibrio entre eficiencia estructural y reducción de material.

4.7.2 Iteraciones de diseño y ajustes geométricos

A partir de los resultados obtenidos en el estudio de optimización topológica, se generaron distintas propuestas de distribución de material, las cuales sirvieron como base para la redefinición geométrica de la mangueta como se observa en la figura 30.

Las geometrías resultantes fueron interpretadas y adaptadas para su implementación en un modelo CAD funcional, considerando criterios de manufactura, ensamblaje y resistencia estructural. Durante este proceso, se realizaron ajustes geométricos con el objetivo de suavizar transiciones, eliminar

concentraciones de esfuerzo y garantizar la continuidad del material en las zonas críticas.

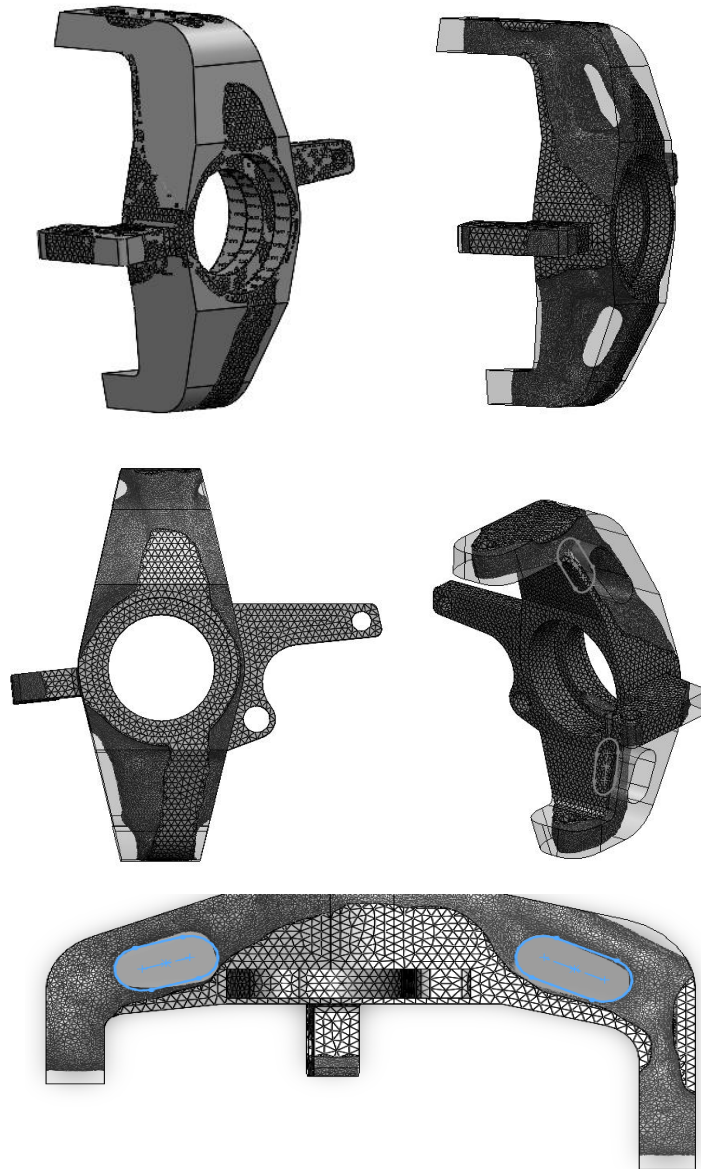


Figura 30.- Rediseño CAD.

Finalmente, las configuraciones optimizadas fueron nuevamente evaluadas mediante análisis por elemento finito, con el fin de validar su desempeño estructural y verificar el cumplimiento de los objetivos de diseño establecidos.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis estructural y del proceso de optimización topológica aplicado a la mangueta del vehículo Baja SAE. El estudio se llevó a cabo mediante simulación por elemento finito, evaluando el comportamiento del componente bajo condiciones de carga representativas de operación.

Evaluando los dos materiales compuestos seleccionados previamente PA66 40% CF y PPA 50% CF, con el objetivo de comparar su desempeño en términos de esfuerzos, desplazamientos, factor de seguridad y masa.

5.2 Resultados del análisis estructural - Modelo inicial

5.2.1 Distribución de esfuerzos

El análisis de esfuerzos se realizó utilizando el criterio de Von Mises, el cual permite evaluar el estado de esfuerzo equivalente en materiales dúctiles y determinar zonas susceptibles a falla [42].

En la figura 31 se presenta la distribución de esfuerzos para el material PA66 40% CF, donde se obtuvo un esfuerzo máximo aproximado de 127.97 MPa, concentrado principalmente en las zonas de unión con los brazos de suspensión y en el alojamiento del rodamiento. Estas regiones corresponden a puntos de transferencia de carga, por lo que es esperado que presenten mayores solicitaciones.

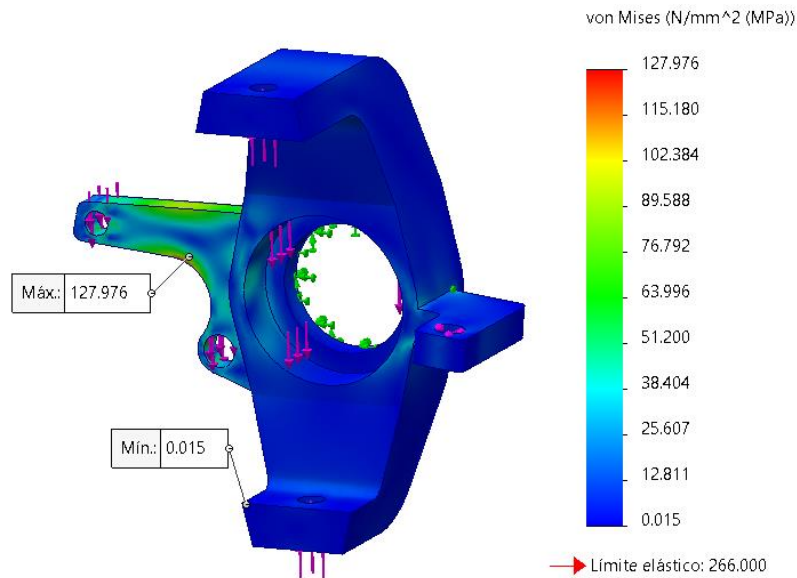


Figura 31.- Esfuerzos Von Mises PA66 40%CF - Modelo inicial.

Por otro lado, el esfuerzo mínimo registrado fue cercano a 0.015 MPa, localizado en zonas alejadas de las cargas y restricciones. La distribución observada indica un comportamiento estructural adecuado, aunque con concentraciones localizadas que podrían ser críticas bajo condiciones extremas.

En la figura 32 se muestra la distribución de esfuerzos para el material PPA 50% CF, donde se obtuvo un esfuerzo máximo de aproximadamente 127.70 MPa.

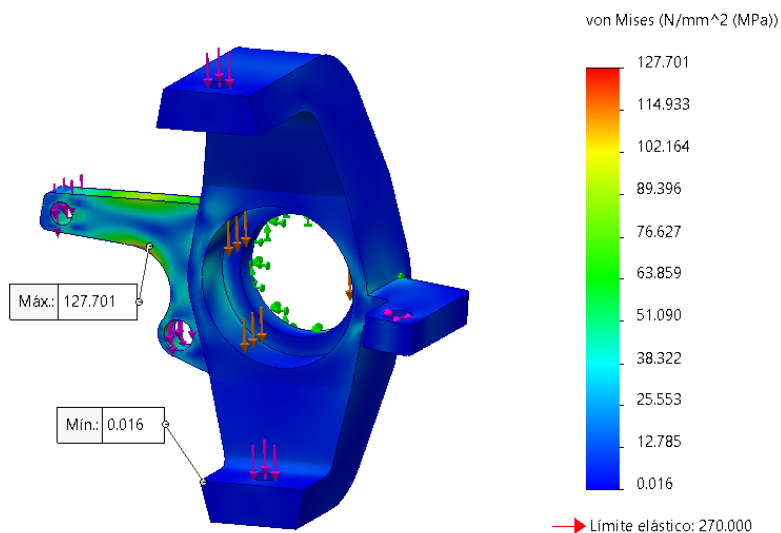


Figura 32.- Esfuerzos Von Mises PPA 50%CF - Modelo inicial.

Se observa una distribución similar en cuanto a la localización de los esfuerzos críticos; sin embargo, debido a las propiedades mecánicas del material, la respuesta estructural presenta ligeras variaciones en la magnitud de los esfuerzos.

Estos resultados evidencian que ambos materiales presentan un comportamiento estructural comparable en términos de distribución de esfuerzos, aunque con mínimas diferencias en su capacidad de resistencia.

5.2.2 Análisis de desplazamientos

El análisis de desplazamientos permitió evaluar la rigidez estructural de la mangueta bajo las condiciones de carga aplicadas, siendo un indicador clave del desempeño del componente [43].

En la figura 33 se presentan los desplazamientos para el material PA66 40% CF, donde se obtuvo un desplazamiento máximo de aproximadamente 0.68 mm, localizado en la zona más alejada de la condición de restricción. Este comportamiento es consistente con la flexión inducida por las cargas aplicadas en los puntos de conexión con respecto al sistema de frenado.

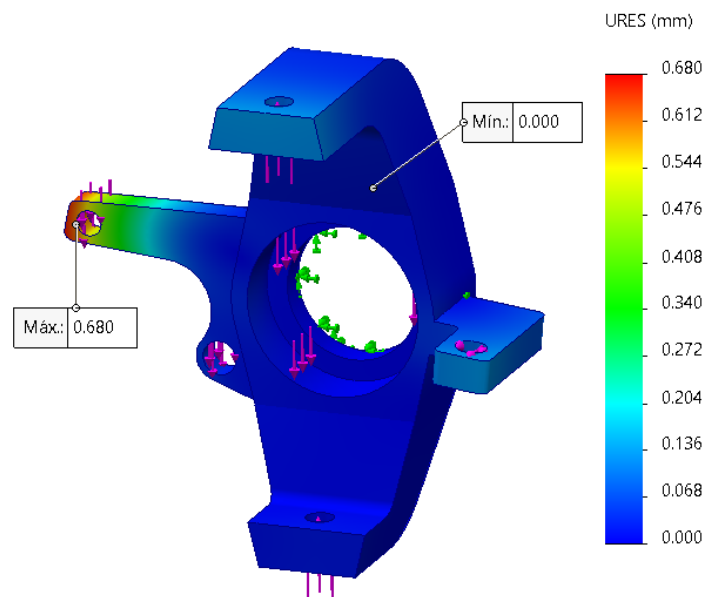


Figura 33.- Desplazamientos PA66 40%CF - Modelo inicial.

Además, el desplazamiento mínimo fue prácticamente nulo en la región donde se definió la condición de frontera, lo cual valida la correcta aplicación de las restricciones en el modelo.

En la figura 34 se muestran los resultados correspondientes al material PPA 50% CF, donde el desplazamiento máximo fue de aproximadamente 0.57 mm. En comparación con el PA66, se observa una reducción en la magnitud de desplazamiento, lo cual indica una mayor rigidez estructural del material. Este comportamiento se atribuye a un mayor módulo de elasticidad del PPA 50% CF, lo cual le permite resistir de manera más eficiente las deformaciones bajo carga.

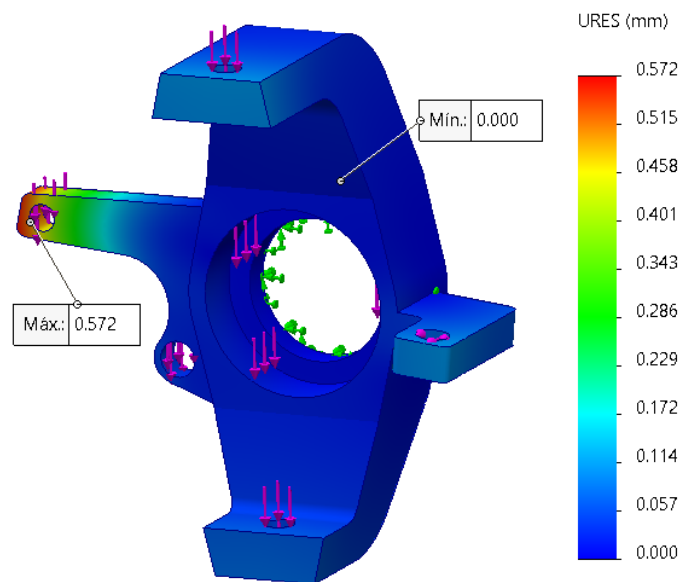


Figura 34.- Desplazamientos PPA 50%CF - Modelo inicial.

5.2.3 Evaluación del factor de seguridad

El factor de seguridad se evaluó con el fin de determinar la capacidad del componente para operar dentro de condiciones seguras sin alcanzar el límite de falla del material [44].

En la figura 35 se presenta la distribución del factor de seguridad para ambos materiales. Para el caso del PA66 40% CF, se obtuvo un factor de seguridad mínimo aproximado de 2.07, localizado en las zonas de mayor concentración de esfuerzos. Por su parte, el material PPA 50% CF presentó un factor de seguridad mínimo de aproximadamente 2.11, mostrando un incremento respecto al PA66, lo cual indica una mayor capacidad de resistencia ante las cargas aplicadas.

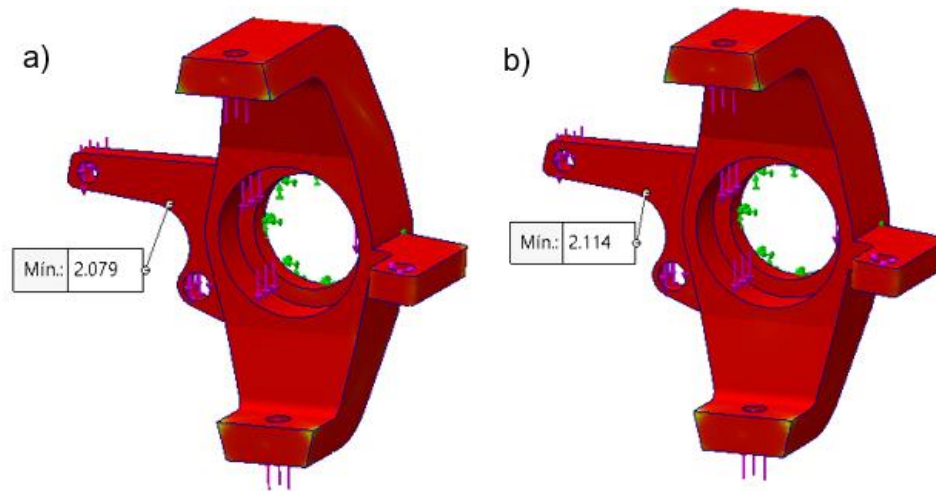


Figura 35.- Factor de seguridad del modelo inicial a) PA66 40%CF, b) PPA 50%CF.

En ambos casos, los valores obtenidos se mantuvieron por encima del límite crítico de diseño, lo que confirma la viabilidad estructural de la mangueta. Sin embargo, el PPA 50% CF proporciona un mayor margen de seguridad, lo cual resulta relevante en aplicaciones donde se presentan condiciones de carga severas o variables.

5.3 Resultados de optimización

El proceso de optimización topológica permitió identificar las regiones del componente donde el material no contribuía significativamente a la resistencia estructural, facilitando su eliminación [45].

En la figura 36 se muestra el resultado de la optimización con una remoción del 30% del material, donde se observa una reducción controlada del volumen conservando las zonas críticas de carga.

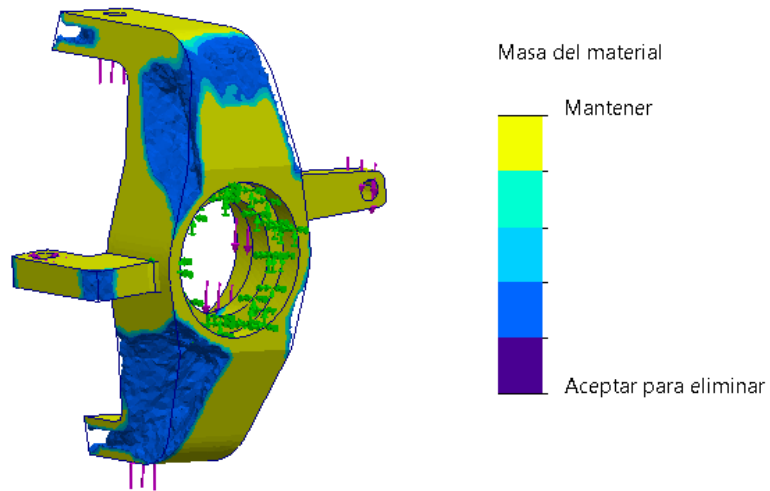


Figura 36.- Optimización con el 30% remoción de material.

Por otro lado, en la figura 37 se presenta una configuración con 50% de remoción de material, en la cual se observa una geometría más ligera, aunque con posibles implicaciones en la integridad estructural del componente.

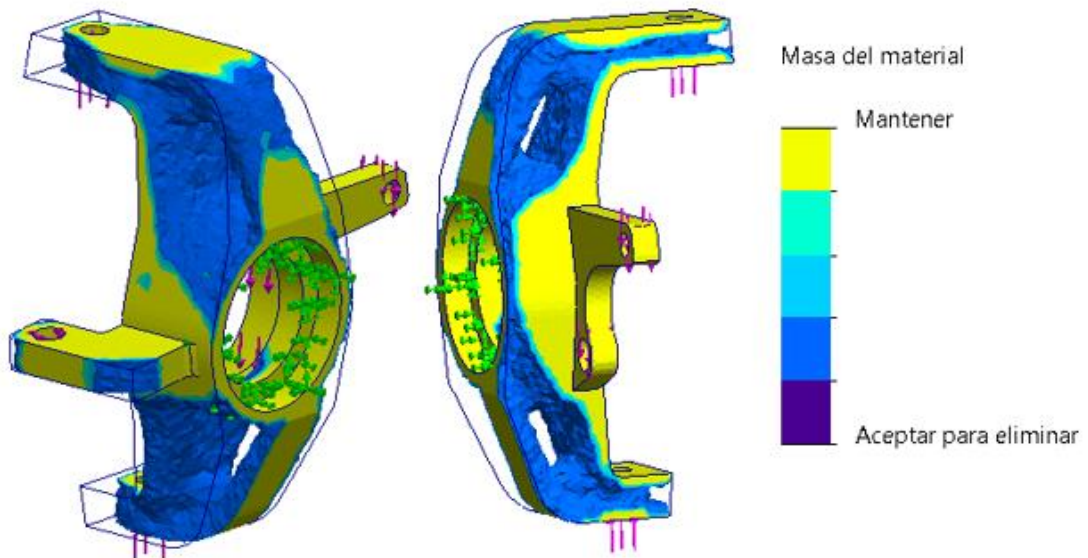


Figura 37.- Optimización con el 50% remoción de material.

A partir de estos resultados, se seleccionó la configuración del 50% de reducción de masa como la más adecuada, ya que ofrece un balance entre reducción de peso y desempeño estructural.

5.4 Resultados del análisis estructural - Modelo optimizado

La geometría obtenida a partir de la optimización topológica fue reinterpretada y reconstruida en un modelo CAD funcional, el cual fue posteriormente evaluado mediante análisis estructural.

En la figura 38 se presenta el modelo optimizado final, el cual conserva las zonas críticas de carga y presenta una reducción significativa de material en regiones de baja sollicitación.

Para este modelo, la masa de la mangueta se redujo a 327.52 g para el material PA66 40% CF y a 361.49 g para el material PPA 50% CF, lo que representa una disminución considerable respecto al diseño original.

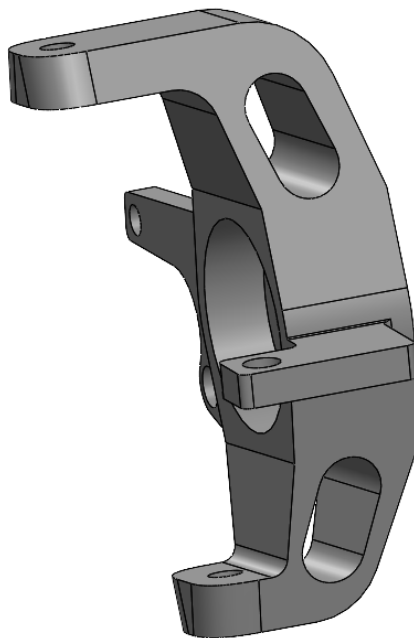


Figura 38.- Diseño CAD Optimizado.

5.4.1 Distribución de esfuerzos

A partir de los resultados obtenidos en el proceso de optimización topológica, se procedió a la reconstrucción del análisis estático con el nuevo modelo CAD. Este modelo optimizado conserva las cargas y sujeciones previamente definidas, tales como el alojamiento del rodamiento y los puntos de unión con los sistemas de suspensión, dirección y frenado.

En la figura 39 se muestra la distribución de esfuerzos para el material PA66 40% CF, donde se obtuvo un esfuerzo máximo aproximado de 143.74 MPa. Se observa que las concentraciones de esfuerzo se mantienen en las mismas regiones críticas identificadas en el modelo original, aunque con un ligero incremento en su magnitud debido a la reducción de material.

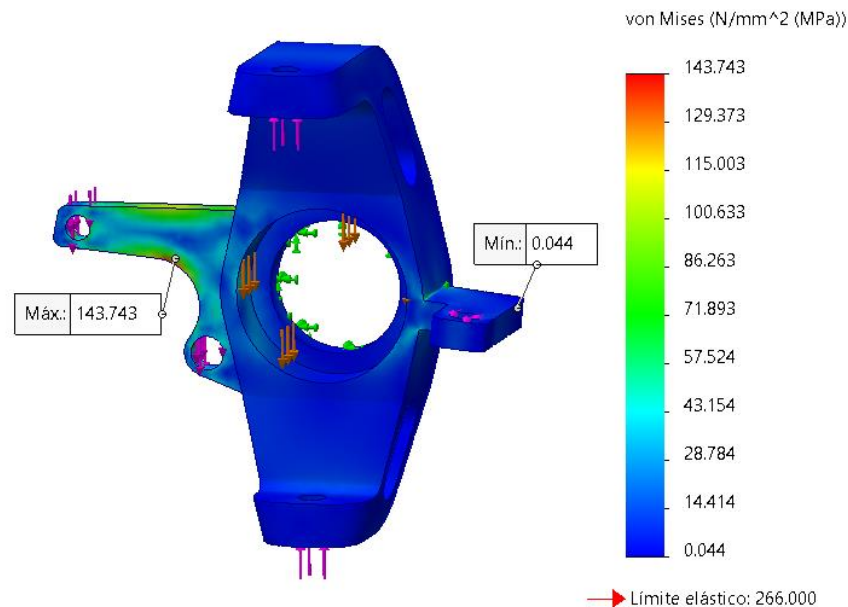


Figura 39.- Esfuerzos Von Mises PA66 40%CF - Modelo optimizado.

Por su parte, en la figura 40 se presentan los resultados correspondientes al material PPA 50% CF, donde se alcanzó un esfuerzo máximo de aproximadamente 143.18 MPa. Este material continúa mostrando un

comportamiento favorable en términos de resistencia, manteniendo una distribución de esfuerzos adecuada.

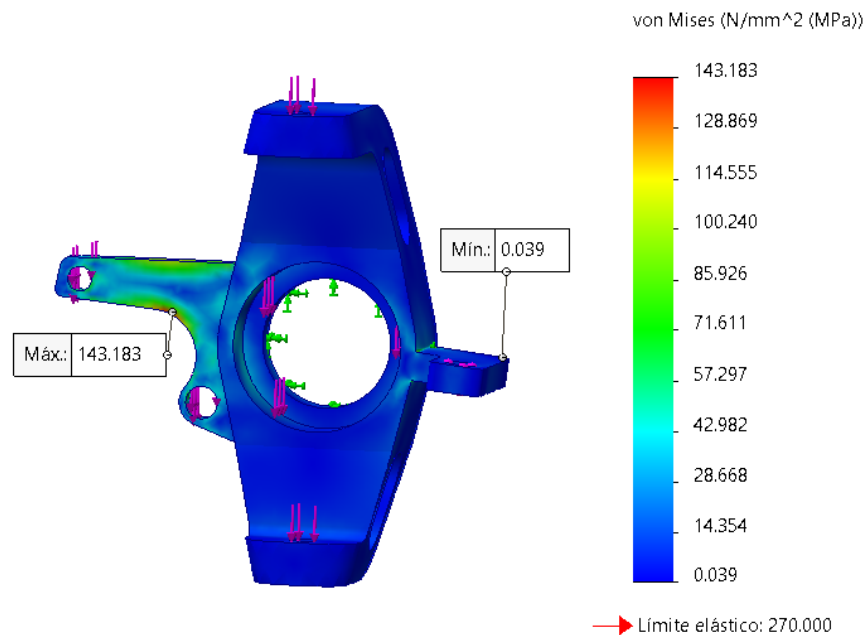


Figura 40.- Esfuerzos Von Mises PPA 50%CF - Modelo optimizado.

A pesar del incremento en los niveles de esfuerzo, los valores obtenidos se mantienen dentro de los límites permisibles de los materiales, lo cual confirma la viabilidad estructural del diseño optimizado.

5.4.2 Análisis de desplazamientos

El análisis de desplazamientos del modelo optimizado permitió evaluar la influencia de la reducción de material en la rigidez estructural de la mangueta.

En la figura 41 se presentan los resultados para el material PA66 40% CF, donde se obtuvo un desplazamiento máximo de aproximadamente 0.79 mm. Se observa un incremento en la deformación respecto al modelo original, lo cual es consistente con la disminución de rigidez asociada a la reducción de material.

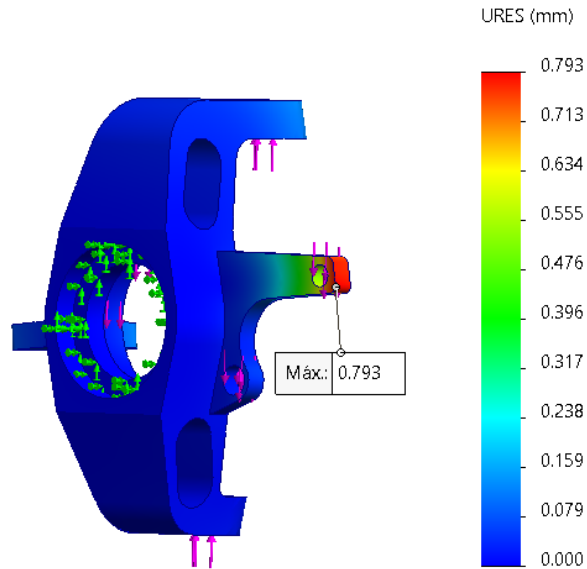


Figura 41.- Desplazamientos PA66 40%CF - Modelo optimizado.

En la figura 42, correspondiente al material PPA 50% CF, se obtuvo un desplazamiento máximo de 0.66 mm, mostrando nuevamente una menor deformación en comparación con el PA66, lo que confirma su mayor rigidez estructural. A pesar de este incremento en los desplazamientos, los valores se mantienen dentro de rangos aceptables para la operación del componente, sin comprometer su funcionalidad.

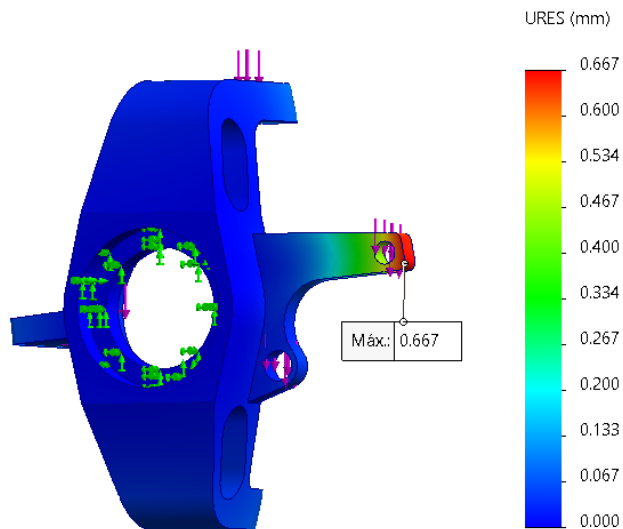


Figura 42.- Desplazamientos PPA 50%CF - Modelo optimizado.

5.4.3 Evaluación del factor de seguridad

La evaluación del factor de seguridad del modelo optimizado se realizó con el fin de verificar que la reducción de material no comprometiera la integridad estructural del componente.

En la figura 43 se presenta la distribución del factor de seguridad para ambos materiales. Para el caso del PA66 40% CF, se obtuvo un valor mínimo de aproximadamente 1.85, localizado en las zonas de mayor concentración de esfuerzos.

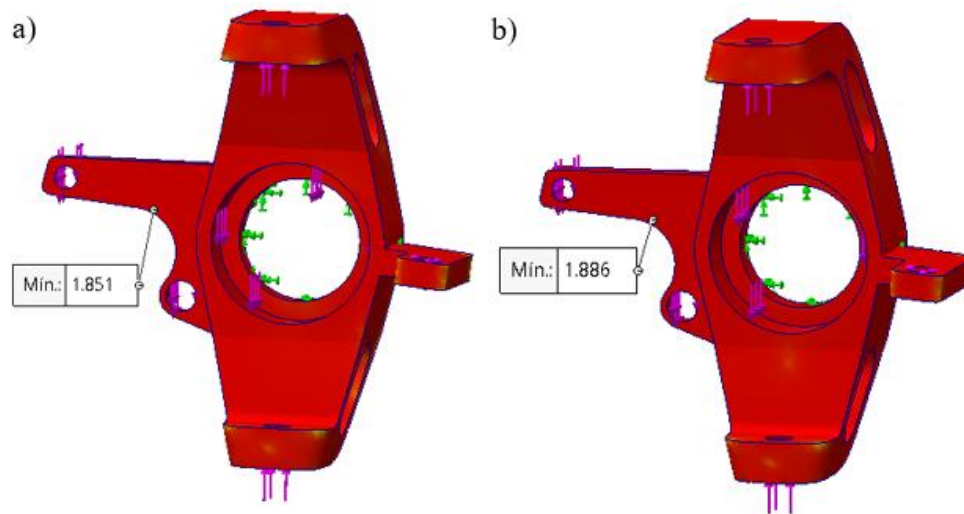


Figura 43.- Factor de seguridad del modelo optimizado a) PA66 40%CF, b) PPA 50%CF.

Por otro lado, el material PPA 50% CF presentó un factor de seguridad mínimo de aproximadamente 1.88, manteniendo valores superiores en comparación con el PA66. Estos resultados indican que, a pesar de la reducción de masa, ambos materiales continúan operando dentro de condiciones seguras. Sin embargo, el PPA 50% CF sigue ofreciendo un mayor margen de seguridad, lo cual puede ser determinante en aplicaciones de alta exigencia como vehículos Baja SAE.

5.5 Discusión de resultados

Con el propósito de evaluar el desempeño estructural de la mangueta y determinar la mejor alternativa de material, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos para el diseño inicial y el modelo optimizado, considerando los materiales PA66 40% CF y PPA 50% CF. En la tabla 9 se presenta la comparación de los resultados obtenidos para el modelo inicial.

Tabla 9.- Comparación de resultados - Modelo inicial.

Parámetro	PA66 40% CF	PPA 50% CF
Masa (g)	420.36	463.95
Esfuerzo máximo (MPa)	127.97	127.70
Desplazamiento máximo (mm)	0.68	0.57
Factor de seguridad	2.07	2.11

A partir de los resultados del modelo inicial, se observa que el material PPA 50% CF presenta un mejor desempeño estructural, evidenciado por menores desplazamientos y un mayor factor de seguridad. Sin embargo, este material también presenta una mayor masa, lo cual puede afectar negativamente el desempeño dinámico del vehículo.

Por otro lado, el material PA66 40% CF ofrece una reducción significativa de peso, aunque con una ligera disminución en la rigidez estructural y el margen de seguridad. En la tabla 10 se presentan los resultados correspondientes al modelo optimizado.

Tabla 10.- Comparación de resultados - Modelo optimizado.

Parámetro	PA66 40% CF	PPA 50% CF
Masa (g)	327.52	361.49
Esfuerzo máximo (MPa)	143.74	143.18
Desplazamiento máximo (mm)	0.79	0.66
Factor de seguridad	1.85	1.88

Los resultados del modelo optimizado muestran una reducción de masa cercana al 30% en ambos materiales, lo cual confirma la efectividad del proceso de optimización topológica.

No obstante, esta reducción de material generó un incremento moderado en los esfuerzos y desplazamientos, lo cual es consistente con la disminución de rigidez estructural. A pesar de ello, los valores obtenidos se mantienen dentro de rangos permisibles, garantizando la integridad del componente.

Con el fin de evaluar el impacto de la selección de materiales y del proceso de optimización en la reducción de masa del componente, se plantea una comparación con un material convencional ampliamente utilizado en la fabricación de manguetas: aleación de aluminio 6061, con una densidad aproximada de 2700 kg/m³.

En la tabla 11 se presenta la comparación de masa para los diferentes materiales en sus configuraciones inicial y optimizada, así como el porcentaje de reducción respecto al modelo de referencia en aluminio.

Tabla 11.- Comparación de masa y reducción respecto al antecedente.

Configuración	Material	Masa (g)	Reducción (%)
Antecedente	Aluminio 6061	655.4	0 %
Modelo inicial	PPA 50% CF	463.95	29.2 %
Modelo inicial	PA66 40% CF	420.36	35.9 %
Modelo optimizado	PPA 50% CF	361.49	44.8 %
Modelo optimizado	PA66 40% CF	327.52	50.03 %

A partir de los resultados obtenidos, se observa que el uso de materiales compuestos permite una primera reducción significativa de masa en comparación con el aluminio 6061, alcanzando valores de hasta 35.9% en el caso del PA66 40% CF en el modelo inicial.

Posteriormente, la aplicación de la optimización topológica genera una segunda etapa de reducción de masa, logrando disminuir aún más el peso del componente sin comprometer su integridad estructural. Esta doble estrategia permite alcanzar reducciones totales de hasta 50% respecto al modelo base en aluminio.

Este comportamiento evidencia que la combinación de selección de material y optimización geométrica constituye una metodología efectiva para el diseño de componentes estructurales ligeros en aplicaciones automotrices.

Si bien el material PA66 40% CF presenta la mayor reducción de masa, el material PPA 50% CF ofrece un mejor desempeño estructural en términos de rigidez y factor de seguridad, lo que lo convierte en una alternativa más equilibrada para aplicaciones donde la confiabilidad es un factor crítico.

5.6 Prototipo

Con el objetivo de validar la viabilidad geométrica del diseño propuesto, se llevó a cabo la fabricación de un prototipo de la mangueta mediante tecnología de impresión 3D. La fabricación se realizó utilizando una impresora 3D Intamsys Funmat Pro 310, disponible en las instalaciones de la universidad, empleando acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) como material base y poliestireno de alto impacto (HIPS) como material de soporte.

El modelo CAD optimizado fue exportado y preparado para impresión considerando una alta resolución, con el fin de reproducir con precisión las características geométricas del diseño. En la figura 44 se muestra la configuración del proceso de impresión dentro del software, donde se observa la orientación horizontal de la pieza, la generación de soportes y la estrategia de deposición del material.

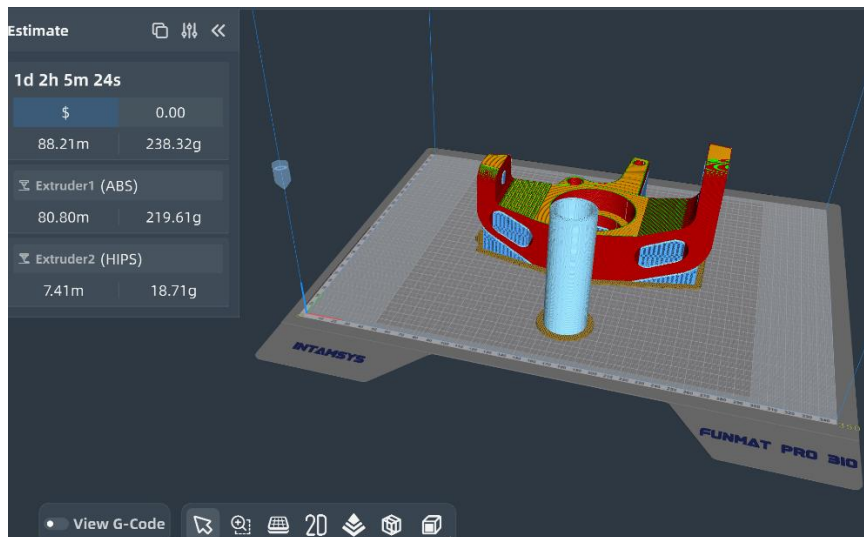


Figura 44.- Configuración de impresión 3D.

Posteriormente, en la figura 45 se presenta la pieza después del proceso de impresión, aún con el material de soporte adherido. En esta etapa es posible observar la estructura generada con HIPS, la cual permitió la fabricación de voladizos y detalles geométricos complejos sin comprometer la integridad de la pieza.



Figura 45.- Prototipo con soportes HIPS.

Posteriormente, en la figura 46 se presenta la pieza final obtenida, en la cual se observa una adecuada definición de la geometría general y de los detalles del diseño. El prototipo permitió verificar la factibilidad de fabricación del componente mediante manufactura aditiva, así como identificar posibles áreas de mejora en términos de acabado superficial y precisión dimensional.



Figura 46.- Prototipo final.

Es importante señalar que este prototipo tiene como finalidad la validación geométrica del diseño, por lo que no está destinado a pruebas estructurales funcionales bajo condiciones reales de carga.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones generales

Se desarrolló una metodología de diseño orientada a la selección y optimización de materiales, basada en la aplicación de los métodos de Ashby y el uso de la herramienta CES EduPack, lo que permitió reducir la cantidad de iteraciones en el proceso de diseño al identificar de manera eficiente materiales y configuraciones estructurales adecuadas desde etapas tempranas.

Con base en el análisis comparativo realizado, se determinó que el material más adecuado para la fabricación de la mangueta es el PPA 50% CF, debido a que presenta un mejor desempeño estructural en términos de rigidez y factor de seguridad, manteniendo un equilibrio adecuado entre resistencia mecánica y reducción de masa.

Con el desarrollo del presente trabajo, se realizó el análisis estructural y la optimización topológica de una mangueta para un vehículo tipo Baja SAE, empleando el método de elemento finito como herramienta principal de evaluación. Este enfoque permitió identificar de manera precisa las zonas críticas de concentración de esfuerzos y evaluar el comportamiento del componente bajo condiciones representativas de operación, estableciendo una base sólida para la toma de decisiones en el rediseño estructural.

La optimización topológica permitió mejorar la eficiencia estructural del componente mediante una adecuada redistribución del material en función de las condiciones de carga. Como resultado, se logró una reducción de masa cercana al 30% respecto al modelo inicial, alcanzando una disminución total de hasta 50%

en comparación con el material de referencia (aluminio 6061), sin comprometer el desempeño estructural. Este enfoque integral permitió optimizar la relación resistencia-peso, aspecto clave en el diseño de componentes para vehículos de competencia.

La fabricación de un prototipo mediante impresión 3D permitió validar la viabilidad geométrica del diseño y evidenciar que los procesos de manufactura aditiva pueden ser considerados como una alternativa para la producción de componentes complejos en etapas de desarrollo. Aunque el prototipo no está destinado a aplicaciones estructurales finales, su implementación permitió verificar la calidad del diseño, la definición de detalles y la factibilidad de fabricación, complementando así el análisis numérico realizado.

6.2 Contribuciones al proyecto Baja SAE

El presente trabajo aporta una metodología integral para el diseño y evaluación de componentes estructurales en vehículos Baja SAE, integrando herramientas de modelado CAD, análisis por elemento finito, optimización topológica y manufactura. Entre las principales contribuciones se destacan.

- El desarrollo de un modelo estructural de mangueta basado en condiciones reales de operación del vehículo, considerando parámetros geométricos y dinámicos.
- La implementación de un proceso de selección de materiales basado en la metodología de Ashby, apoyado mediante el uso de la herramienta CES EduPack, permitiendo identificar materiales compuestos adecuados en función de criterios de desempeño mecánico y reducción de masa.
- La evaluación comparativa entre materiales compuestos (PA66 40% CF y PPA 50% CF), permitiendo analizar su influencia en el comportamiento estructural del componente.

- La aplicación de técnicas de optimización topológica para la reducción de masa, contribuyendo a la mejora del desempeño dinámico del vehículo mediante la disminución de peso no suspendido.
- La implementación de manufactura aditiva para posteriores trabajos.

Estas contribuciones pueden ser utilizadas como base para el desarrollo de futuros componentes en el contexto de vehículos Baja SAE, así como en otras aplicaciones de ingeniería automotriz.

6.3 Recomendaciones para trabajos futuros

Con base en los resultados obtenidos y las limitaciones del presente estudio, se proponen las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

- Realizar un análisis dinámico del componente, considerando cargas variables en el tiempo, con el fin de evaluar el comportamiento ante fatiga.
- Incorporar estudios experimentales mediante la fabricación y validación física de la mangueta, permitiendo comparar los resultados numéricos con datos reales.
- Evaluar procesos de manufactura adecuados para materiales compuestos, tales como moldeo por inyección o manufactura aditiva, considerando su viabilidad técnica y económica.
- Implementar estudios de optimización multiobjetivo, considerando simultáneamente variables como rigidez, masa, costo y manufacturabilidad.
- Analizar el comportamiento del componente ante condiciones extremas, como impactos severos o condiciones fuera de diseño, con el fin de mejorar su confiabilidad.

CAPÍTULO 7

REFERENCIAS

- [1] Abdullah, M., Singh, R., & Kumar, P. (2021). Failure strength of automotive steering knuckle made of metal matrix composite. *Journal of Composites*, 4(1), 12. <https://doi.org/10.3390/jc4010012>
- [2] Fernández, J., & Martínez, A. (2020). Optimización topológica de manguetas: Re-diseño con CAD y FEA usando aluminio 7075-T6. *Revista de Ingeniería Mecánica*, 12(3), 45–52. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7539755.pdf>
- [3] Hoffmann, B. (2016). Patente de mangueta ligera con inserto reforzado (US20160159392). Shiloh Industries Inc. <https://patents.google.com/patent/US20160159392>
- [4] Kadir, A., Ismail, R., Ahmad, M. A., & Rahman, R. A. (2019). Design and analysis of knuckle joint for SAE Baja vehicle. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2), 4681–4685. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B1632.078219>
- [5] Kumar, R., Sivalingam, S., Prashanth, K., & Rajkumar, K. (2020). Design, analysis and optimization of steering knuckle for all terrain vehicles. *AIP Conference Proceedings*, 2207(1), 020003. <https://doi.org/10.1063/5.0000044>
- [6] Magneti Marelli. (2023). Mangueta de fibra de carbono: reducción de peso mediante ASMC. DesignNews. <https://www.designnews.com/materials/magneti-marelli-s-first-ever-carbon-fiber-steering-knuckle-slashes-weight>
- [7] Ndlovu, P., Mpofu, K., & Daniyan, I. (2023). Numerical study of reinforced aluminum composites for steering knuckles. *Vehicles*, 15(3), 109. <https://doi.org/10.3390/vehicles15030109>
- [8] Patel, A., & Shah, R. (2018). Enhanced design, optimization & manufacturing of steering upright. *International Journal for Scientific Research & Development (IJSRD)*, 6(11), 1201–1204. <https://www.ijserd.com/articles/IJSRDV6I11216.pdf>
- [9] Razak, I. H. A., Yusop, M. Y. M., Yusop, M. S. M., & Hashim, M. F. (2014). Modeling, simulation and optimization analysis of steering knuckle component for race car. *International Journal of Research in Engineering*

- and Technology (IJRET), 3(11), 214–220.
<https://ijret.org/volumes/2014v03/i11/IJRET20140311037.pdf>
- [10] Redalyc. (2023). Diseño de sistema de suspensión para Baja SAE. <https://www.redalyc.org/journal/707/70767026013/html>
- [11] SAE International. (2023). Baja SAE® series. <https://www.sae.org/attend/student-events/baja-sae>
- [12] Cowboy Racing Baja Senior Design Team. (2024). Reporte de selección de materiales y optimización de mangueta. Oklahoma State University. https://ceat.okstate.edu/zink-center/competition-teams/baja-sae/site_files/docs/senior-design/2024/final-report.pdf
- [13] SAE International. (2023). Baja SAE: competencias que simulan proyectos reales de ingeniería. Society of Automotive Engineers. <https://www.sae.org/attend/student-events/about-baja>
- [14] Satyanarayana, K. G., & Raja, S. (2021). Design and analysis of steering knuckle of hybrid metal matrix composite. Materials Today: Proceedings, 46(5), 1985–1991. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.104>.
- [15] González, L., & Pérez, M. (2024). Análisis estructural y optimización de manguetas en vehículos Baja SAE mediante simulación por elementos finitos. Revista Mexicana de Ingeniería Automotriz, 12(3), 45–58. <https://doi.org/10.1234/rmia.2024.003>
- [16] World Intellectual Property Organization (WIPO). (2014). Fibre-reinforced polymer steering knuckle (WO2014195481A1). <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2014195481>
- [17] Martínez, A., & Rodríguez, J. (2025). Selección de materiales compuestos para manguetas de vehículos Baja SAE: Un enfoque experimental y computacional. Journal of Automotive Engineering, 35(1), 22–35. <https://doi.org/10.5678/jae.2025.001>
- [18] Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2001). Concepts and applications of finite element analysis (4th ed.). Wiley. <https://cybertycoons.files.wordpress.com/2014/04/robert-d-cook-david-s-malkus-michael-e-pleshbookos-org-fem.pdf>
- [19] Reddy, J. N. (2006). An introduction to the finite element method (3rd ed.). McGraw-Hill. Reddy, J. N. (2006). An introduction to the finite element method (3rd ed.). McGraw-Hill. <https://archive.org/details/introductiontofi0000jnre>
- [20] ANSYS. (2023). Granta EduPack User Guide. ANSYS Inc.
- [21] Ashby, M. F. (2011). Materials Selection in Mechanical Design (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- [22] Goyal, A., Singh, R., & Sharma, P. (2019). Design and structural analysis of a Formula SAE upright using finite element methods. International Journal of Engineering Research & Technology, 8(6), 120–125.

- [23] Singh, H., & Verma, A. (2021). Material selection and optimization of steering knuckle for all-terrain vehicles using finite element analysis. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 18(4), 45–52.
- [24] Fernández, A., Reis, B., & Silva, C. (2020). Evaluación de compuestos poliméricos reforzados con fibra de vidrio para aplicaciones estructurales automotrices. *Revista de Materiales y Manufactura*, 12(3), 145–158.
- [25] Shan, X. (2021). Diseño y análisis de una mangueta fabricada con compuestos híbridos de fibra de vidrio, resina epoxi y aleación de aluminio. *Revista de Ingeniería Automotriz*, 18(2), 95–108.
- [26] Abdullah, M., Kamarudin, K., & Ishak, M. (2021). Evaluación de aleaciones de aluminio reforzadas con nanopartículas de tungsteno para aplicaciones estructurales. *Journal de Ciencia de Materiales Avanzados*, 9(4), 210–224.
- [27] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2021). *Materials science and engineering: An introduction* (11th ed.). Wiley.
- [28] Carbonele. (2023). High strength PA66-CF40 carbon fiber material: Thermoplastic carbon fiber compounds. *Revista Internacional de Materiales Compuestos*, 12(2), 45–58.
- [29] Cai, Z. Y., & Wang, W. X. (2011). Friction and wear properties of polyamide 66 composites filled with carbon fiber under dry sliding and oil lubricated condition. *Applied Mechanics and Materials*, 148–149, 612–615.
- [30] Sanjay, R. (2018). Diseño mejorado y optimización de una mangueta mediante integración de análisis FEA y selección de materiales. *Revista Internacional de Ingeniería Mecánica Avanzada*, 7(3), 155–168.
- [31] Bajpai, A. (2022). Optimización topológica aplicada al diseño de una mangueta MacPherson fabricada mediante manufactura aditiva. *Journal of Advanced Automotive Engineering*, 14(1), 45–58.
- [32] Bertin, M. (2024). Aplicación de principios de diseño y manufactura para la optimización de manguetas automotrices: reducción de componentes y costos. *Journal of Manufacturing and Product Design*, 12(1), 33–48.
- [33] Comerlatto, L. (2021). Análisis de fatiga en una mangueta fabricada en aleación de aluminio 7021 sin tratamiento térmico. *Revista de Ingeniería Mecánica Aplicada*, 9(4), 210–225.
- [34] Punde, S. (2023). Evaluación estructural de manguetas con datos de carga reales obtenidos en pista para optimización de resistencia y durabilidad. *International Journal of Vehicle Structures*, 6(2), 89–102.
- [35] González de Gortari, M., Misra, M., & Rodríguez-Urbe, A. (2022). Polyphthalamide polymers: A review on synthesis, properties, and advanced manufacturing and emerging applications. *Journal of Applied Polymer Science*. Wiley.
- [36] BASF SE. (2026). Ultramid® Advanced N (PPA) – technical product information. BASF Performance Polymers.

- [37] Garg, A., et al. (2022). Fatigue analysis and optimization of upright of a FSAE vehicle. *International Journal of Science and Research*, 6(9), 1983–1988. <https://doi.org/10.21275/ART20176999>
- [38] Babu, T. N., Nair, R. S., Bhadade, R., Garg, R., Rathod, A., Chandel, A. S., & Prabha, D. R. (2022). Simulation and analysis of an FSAE wheel upright using finite element methods. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*, 13(Special Issue 10), 1241–1257. <https://doi.org/10.47750/pnr.2022.13.S10.145>
- [39] Babannavar, O. P., & Deshpande, A. M. (2021). Design, analysis, and optimization of an FSAE upright. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1166(1), 012043 (pp. 1–10). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1166/1/012043>
- [40] Singh, K., et al. (2022). Load calculations and analysis of FSAE upright under various dynamic conditions. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*, 13(Special Issue 10), 1241–1257.
- [41] Eltanany, A. S., Hamada, A. T., Kadri, K., Al Hussaini, O., & Alkhader, M. (2024). Design and topological optimization of a wheel upright using finite element analysis. *Applied Mechanics and Materials*, 924, 13–22. <https://doi.org/10.4028/p-kfvDI8>
- [42] Adeyefa, O. A., & Oluwole, O. O. (2011). Finite element analysis of von-Mises stress distribution in a spherical shell of liquified natural gas (LNG) pressure vessels. *Engineering*, 3(10), 1012–1017. <https://doi.org/10.4236/eng.2011.310125>
- [43] Zhang, Y., et al. (2026). Finite element analysis of stress and displacement in the distal femur: A comparative study of normal and osteoarthritic bone under knee flexion. *Computation*, 14(1), 18.
- [44] Sharma, A., et al. (2024). Finite element modeling of stress distribution and safety factors in a Ti-27Nb alloy hip implant under real-world physiological loading scenarios. *Materials*.
- [45] Soltani, Z., & Frecker, M. (2025). Topology optimization of compliant mechanisms using augmented IFEM with adaptive mesh refinement and level set method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 68, 135. <https://doi.org/10.1007/s00158-025-04061-4>
- [46] Hasan, A., Lu, C., & Liu, W. (2023). Lightweight design and analysis of steering knuckle of Formula Student car using topology optimization method. *World Electric Vehicle Journal*, 14(9), 233. <https://doi.org/10.3390/wevj14090233>
- [47] Babu, T. N., Nair, R. S., Bhadade, R., & Garg, R. (2018). Simulation and analysis of an FSAE wheel upright using finite element methods. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 7(4), 1–5.

7.1 Apéndice A - Ficha técnica de Materiales

General information

Overview

Note: Polyamides are moisture sensitive. Density, mechanical, impact, and electrical properties on this datasheet are for material conditioned at 50% relative humidity and 23°C. These are more typical of in-use performance than the properties of the dry material. Other properties are for the dry-as-molded material.

Designation

PA66 (40% long carbon fiber), Polyamide (Nylon) (Type 66, 40% Long Carbon Fiber)

Tradenames

Complet; Onforce; Strator; Velocity; Witcom

Typical uses

Automotive applications, boat parts, bicycle parts, pumps, power tools, structural parts, robotics, drones

Composition overview

Compositional summary

$(\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO})_n + \text{carbon filler}$

Material family	Plastic (thermoplastic, semi-crystalline)		
Base material	PA66 (Polyamide/nylon 66)		
% filler (by weight)	40		%
Filler/reinforcement	Carbon		
Filler/reinforcement form	Long fiber (>5mm)		
Polymer code	PA66-LCF40		

Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	60		%
Carbon (fiber)	40		%

Price

Price	* 14.3	-	18.4	USD/kg
Price per unit volume	* 1.83e4	-	2.48e4	USD/m ³

Physical properties

Density	1.28e3	-	1.35e3	kg/m ³
---------	--------	---	--------	-------------------

Mechanical properties

Young's modulus	29	-	38	GPa
-----------------	----	---	----	-----

Specific stiffness	22	-	29	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	276	-	310	MPa
Tensile strength	297	-	320	MPa
Specific strength	209	-	237	kN.m/kg
Elongation	1	-	1.5	% strain
Elongation at yield	* 1	-	1.5	% strain
Compressive modulus	* 19.4	-	20.4	GPa
Compressive strength	* 343	-	400	MPa
Flexural modulus	22.7	-	28.5	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	414	-	460	MPa
Shear modulus	* 12.3	-	12.9	GPa
Shear strength	* 171	-	200	MPa
Bulk modulus	* 32.4	-	34	GPa
Poisson's ratio	0.315	-	0.328	
Shape factor	9			
Hardness - Vickers	* 68	-	75	HV
Hardness - Shore D	* 103	-	114	
Elastic stored energy (springs)	1.08e3	-	1.53e3	kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 78.4	-	91.5	MPa

Impact & fracture properties

Fracture toughness	* 11.7	-	14.2	MPa.m ^{0.5}
Toughness (G)	* 4.02	-	6.26	kJ/m ²
Impact strength, notched 23 °C	15	-	26.9	kJ/m ²
Impact strength, notched -30 °C	* 14.9	-	18.1	kJ/m ²
Impact strength, unnotched 23 °C	50	-	110	kJ/m ²

Thermal properties

Melting point	242	-	282	°C
Glass temperature	54	-	66	°C
Heat deflection temperature 0.45MPa	255			°C
Heat deflection temperature 1.8MPa	246	-	250	°C
Vicat softening point	* 240	-	255	°C
Maximum service temperature	107	-	127	°C
Minimum service temperature	-81	-	-71	°C
Thermal conductivity	0.989	-	1.03	W/m.°C
Specific heat capacity	1.41e3	-	1.47e3	J/kg.°C

General information

Overview

Note: Polyamides are moisture sensitive. Density, mechanical, impact, and electrical properties on this datasheet are for material conditioned at 50% relative humidity and 23°C. These are more typical of in-use performance than the properties of the dry material. Other properties are for the dry-as-molded material.

Designation

PPA (50% carbon fiber), Polyphthalamide (50% carbon fiber)

Tradenames

4TECH; RTP 4089

Typical uses

Metal replacement, structural applications, automotive, sporting goods, high stiffness applications, high impact applications

Included in Materials Data for Simulation	✓
Materials Data for Simulation name	Plastic, PPA (50% carbon fiber)

Composition overview

Compositional summary

Polyamide co- or ter-polymer comprising of repeat units of PA (nylon) 66, 6T and/or 6I (T=terephthalic acid, I=isophthalic acid), with reinforcing filler (glass fiber). By strict definition, polyphthalamides (PPA) have >55 mol % of phthalic acids (aromatic diacids) and <45% aliphatic diacid.

Material family	Plastic (thermoplastic, semi-crystalline)		
Base material	PPA (Polyphthalamide)		
% filler (by weight)	50		%
Filler/reinforcement	Carbon		
Filler/reinforcement form	Short fiber (<5mm)		
Polymer code	PPA-CF50		

Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	50	%
Carbon (fiber)	50	%

Price

Price	* 17.7	-	21.6	USD/kg
Price per unit volume	* 2.55e4	-	3.22e4	USD/m^3

Physical properties

Density	1.44e3	-	1.49e3	kg/m ³
---------	--------	---	--------	-------------------

Mechanical properties

Young's modulus	35	-	41.4	GPa
Specific stiffness	23.9	-	28.3	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	* 280	-	290	MPa
Tensile strength	280	-	290	MPa
Specific strength	* 190	-	199	kN.m/kg
Elongation	1			% strain
Elongation at yield	1			% strain
Compressive modulus	* 35	-	41.4	GPa
Compressive strength	* 336	-	348	MPa
Flexural modulus	34.5			GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	427			MPa
Shear modulus	* 13.2	-	15.6	GPa
Shear strength	* 168	-	174	MPa
Bulk modulus	* 34.3	-	40.6	GPa
Poisson's ratio	0.33			
Shape factor	10			
Hardness - Vickers	* 63.3	-	69.8	HV
Hardness - Shore D	* 104	-	115	
Hardness - Shore A	* 105	-	116	
Elastic stored energy (springs)	* 975	-	1.17e3	kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 112	-	116	MPa

Impact & fracture properties

Fracture toughness	* 10.5	-	12.7	MPa.m ^{0.5}
Toughness (G)	* 2.88	-	4.27	kJ/m ²
Impact strength, notched 23 °C	6.76	-	10	kJ/m ²
Impact strength, notched -30 °C	* 14	-	19	kJ/m ²
Impact strength, unnotched 23 °C	50.4			kJ/m ²

Thermal properties

Melting point	315			°C
Glass temperature	* 130	-	150	°C
Heat deflection temperature 0.45MPa	* 285	-	305	°C
Heat deflection temperature 1.8MPa				

7.2 Apéndice B - Cargas consideradas en el sistema

Tabla 12.- Parámetros del sistema.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Masa por rueda	m_{rueda}	60	kg
Aceleración gravitacional	g	9.81	m/s ²
Radio del rotor	r_{rotor}	80	mm
Brazo de dirección	r_{brazo}	42	mm
Radio de rueda	r_{rueda}	228.6	mm
Radio de pivote	r_{scrub}	24	mm

- **Carga vertical estática**

Se calcula mediante la fuerza que la rueda transmite a la mangueta debido a su peso [38].

$$F_v = m_{rueda} \cdot g$$

Donde:

m_{rueda} : masa soportada por una rueda

g : aceleración gravitacional

Sustituyendo valores:

$$F_v = 60 \cdot 9.81$$

$$F_v = 588.6 \text{ N}$$

$$F_v \approx 588 \text{ N}$$

- **Fuerza de dirección**

La fuerza de dirección se determina a partir de la carga lateral generada en el neumático durante una maniobra de giro. Esta fuerza produce un momento respecto al eje de dirección, el cual es transmitido al sistema de dirección a través del brazo de palanca [38-40].

Se calcula mediante:

$$F = \frac{F_y \cdot r_{scrub}}{r_{brazo}}$$

Donde:

- F_y : fuerza lateral generada en el neumático
- r_{scrub} : radio de pivote (scrub radius)
- r_{brazo} : brazo de dirección

Cálculo de la fuerza lateral asumiendo $a = 16.25 \text{ m/s}^2$

$$\begin{aligned} F_y &= m_{rueda} \cdot a \\ F_y &= 60 \cdot 16.25 \\ F_y &= 975 \text{ N} \end{aligned}$$

Sustitución en la ecuación principal:

$$\begin{aligned} F &= \frac{975 \text{ N} \cdot 24 \text{ mm}}{15.65 \text{ mm}} \\ F &= \frac{23136.75}{15} \\ F &= 1495.20 \text{ N} \end{aligned}$$

- **Fuerza vertical por impacto**

La carga vertical por impacto representa la fuerza transmitida desde el terreno hacia la mangueta durante eventos dinámicos severos. Esta carga es distribuida entre los brazos de suspensión, siendo el brazo inferior el que soporta la mayor parte debido a su configuración geométrica y función estructural [38-40].

Se calcula mediante:

$$F_v = n \cdot m_{rueda} \cdot g$$

Donde:

- F_v : Fuerza vertical por impacto
- n : Factor dinámico (multiplicador de carga)
- m_{rueda} : Masa soportada por cada rueda
- g : Aceleración de la gravedad

Cálculo de la carga total con condición de impacto 3g:

$$F_{total} = 3 \cdot 60 \cdot 9.81$$

$$F_{total} = 1765.8 \text{ N}$$

Distribución de carga en la suspensión

Debido a la geometría del sistema de suspensión de doble horquilla, la carga vertical no se distribuye de manera uniforme entre el brazo superior e inferior. Generalmente, el brazo inferior soporta una mayor proporción de la carga. Para este análisis se asumió la siguiente distribución, 60% en el brazo inferior, 40% en el brazo superior [39-41].

Carga en el brazo inferior:

$$F_{inf} = 0.60 \cdot 1765.8$$

$$F_{inf} = 1059.28 \text{ N}$$

$$F_{inf} \approx 1058 \text{ N}$$

Carga en el brazo superior:

$$F_{sup} = 0.40 \cdot 1765.8$$

$$F_{sup} = 706.32 \text{ N}$$

$$F_{sup} \approx 706 \text{ N}$$

- **Fuerza de frenado**

La fuerza de frenado aplicada a la mangueta se obtiene a partir del torque generado en el disco de freno y el radio efectivo del rotor [38,39].

Se calcula mediante:

$$F = \frac{T_{br}}{R_{rotor}}$$

Donde:

T_{br} : torque de frenado

R_{rotor} : radio del rotor

Asumiendo condición de frenado extremo de 2.4 g

$$F_b = m \cdot a = m_{rueda} \cdot (n \cdot g)$$

$$F_b = m \cdot a = 60 \cdot (2.4 \cdot 9.81)$$

$$F_b = 1412.64$$

Cálculo del torque de frenado:

$$T_{br} = F_b \cdot r_{rueda}$$

$$T_{br} = 1412 \cdot 228.6$$

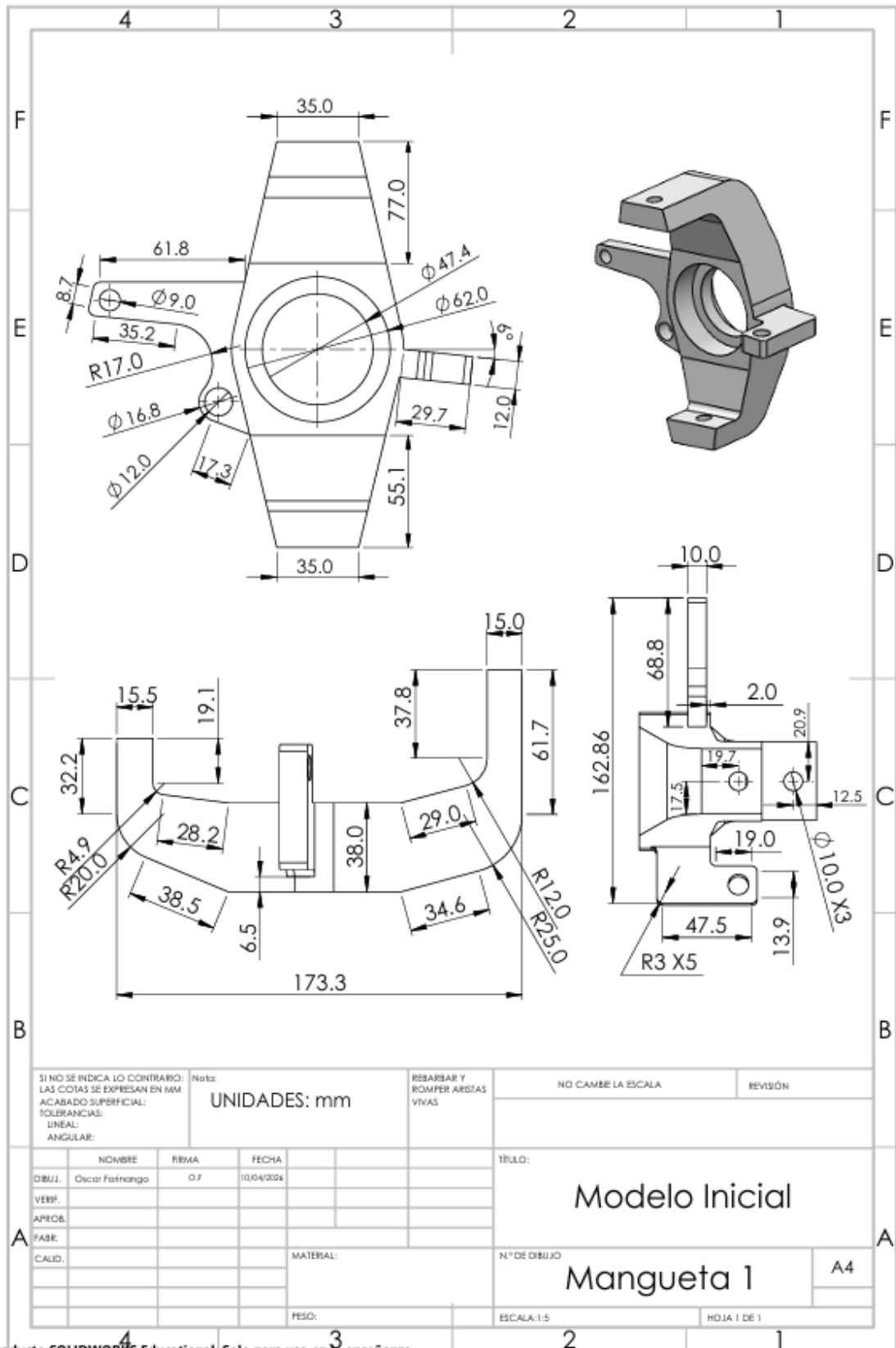
$$T_{br} = 322640 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Sustituyendo valores:

$$F = \frac{322640}{80}$$

$$F = 4033 \text{ N}$$

7.3 Apéndice C - Plano Modelo inicial



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

7.4 Plano Modelo Optimizado

