



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AUTOMOTRIZ

**TEMA: “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE BUJES DE SUSPENSIÓN
CON MATERIAL POLIURETANO PARA VEHÍCULO TIPO M”**



AUTOR: Christian Anthony Muñoz Zabala

DIRECTOR: Ing. Carlos Nolasco Mafla Yépez PhD

Ibarra-Ecuador

2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	DE	040211111-6	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Y	Muñoz Zabala Christian Anthony	
DIRECCIÓN:	Ibarra – Imbabura		
EMAIL:	camunozz@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	(06) 2985614	TELF. MÓVIL	0958646904

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DISEÑO Y SIMULACIÓN DE BUJES DE SUSPENSIÓN CON MATERIAL POLIURETANO PARA VEHÍCULO TIPO M
AUTOR (ES):	Muñoz Zabala Christian Anthony
FECHA: AAAAMMDD	2026-03-06
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
CARRERA/PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Automotriz
DIRECTOR:	Ing. Carlos Nolasco Mafla Yépez PhD



AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Muñoz Zabala Christian Anthony, con cédula de identidad Nro. 040211111-6 , en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 06 días del mes de marzo de 2026

EL AUTOR:



Muñoz Zabala Christian Anthony

**CONSTANCIAS**

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 06 días del mes de marzo de 2026

EL AUTOR:

Muñoz Zabala Christian Anthony



CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 06 de Marzo de 2026

Ing. Carlos Nolasco Mafla Yépez PhD

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.



Ing. Carlos Nolasco Mafla Yépez PhD

C.C.: 0401447826



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Diseño y simulación de bujes de suspensión con material poliuretano para vehículos tipo M” elaborado por Muñoz Zabala Christian Anthony, previo a la obtención del título de Ingeniería Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:



Ing. Carlos Nolasco Mafla Yépez PhD

C.C.: 0401447826



Ing. Jorge Luis Melo Obando

C.C.: 1718346529



DEDICATORIA

Dedicado con todo mi corazón a mi padre, que está en el cielo y sé que se sentiría muy orgulloso de este logro alcanzado.

A mi madre, Amparo, cuyo amor y apoyo incondicional me han dado la fuerza y el ánimo para seguir adelante y enfrentar cada desafío que se ha presentado en mi camino. Para mí es un gran orgullo poder brindarle una alegría a través de este logro.

A mi hermano Miguel, quien con su apoyo y su papel de segundo padre me ha enseñado a valorar cada paso que doy y a mantener siempre claras mis metas, sin dejarme caer incluso en los momentos más difíciles.

Christian Anthony Muñoz Zabala



AGRADECIMIENTO

Expreso un sincero agradecimiento al Ing. Carlos Mafla por su tiempo, paciencia y apoyo a lo largo de la realización de mi trabajo de titulación. Sus consejos y conocimientos fueron fundamentales para la culminación de mi carrera universitaria.

A la carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Técnica del Norte, por los conocimientos brindados durante toda mi formación académica. Asimismo, agradezco a sus docentes y al personal administrativo por las facilidades brindadas para el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, agradezco a toda mi familia, quienes con sus consejos, apoyo y sabiduría me han guiado a lo largo de esta etapa académica. Sin su ayuda nada de esto habría sido posible. Este logro lo dedico a todos ellos y, de manera especial, a mi padre que está en el cielo, de quien sé se sentiría orgulloso de su hijo.

Christian Anthony Muñoz Zabala



RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación se centra en el diseño y simulación de bujes de suspensión fabricados con material de poliuretano para un vehículo tipo M, con el propósito de analizar su comportamiento mecánico y evaluar su desempeño frente a los bujes convencionales de caucho-metal utilizados en los sistemas de suspensión automotriz. Estos componentes desempeñan un papel fundamental dentro del sistema de suspensión, ya que permiten unir elementos metálicos móviles, reducir vibraciones, absorber impactos y mejorar la estabilidad y el confort durante la conducción del vehículo. En este contexto, el objetivo principal del estudio fue diseñar y analizar bujes de suspensión a base de poliuretano que puedan ofrecer una alternativa viable en términos de resistencia, durabilidad y desempeño estructural. Para el desarrollo del proyecto se empleó una metodología basada en herramientas de ingeniería inversa, modelado tridimensional y simulación computacional. Inicialmente se realizó el escaneo tridimensional y la medición física de la mesa de suspensión inferior de un vehículo Chevrolet Aveo, lo que permitió obtener las dimensiones reales del componente para posteriormente generar su modelo tridimensional mediante software de diseño asistido por computadora. Posteriormente se efectuaron simulaciones estructurales utilizando el método de elementos finitos (FEM), con el fin de analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de carga y determinar los niveles de esfuerzo y deformación presentes en los bujes. Finalmente, los resultados obtenidos evidencian que los bujes fabricados con poliuretano presentan características favorables en términos de resistencia mecánica y rigidez estructural, lo que permite considerar este material como una alternativa adecuada para mejorar el desempeño y la durabilidad de los componentes del sistema de suspensión automotriz.

Palabras clave: suspensión automotriz, bujes, poliuretano, simulación, elementos finitos, diseño CAD.



ABSTRACT

This research addresses the design and simulation of suspension bushings manufactured from polyurethane material for a type M vehicle, with the purpose of analyzing their mechanical behavior and evaluating their performance compared with conventional rubber-metal bushings used in automotive suspension systems. These components connect moving metallic elements, absorb vibrations and impacts, and contribute to vehicle stability and driving comfort. The main objective was to design and analyze polyurethane bushings capable of providing improved mechanical strength and durability. The methodology was based on reverse engineering, three-dimensional CAD modeling, and computational simulation. First, a 3D scanning process and physical measurements were carried out on the lower suspension arm of a Chevrolet Aveo, obtaining real dimensions used to generate the digital model. Then the bushings were modeled and assembled in design software, defining materials and loading conditions. Afterwards the finite element method was applied to determine stress and deformation under different operating scenarios. Finally the results showed that polyurethane bushings present higher structural stiffness and adequate mechanical resistance, maintaining proper performance of the suspension system. This allows polyurethane to be considered a viable alternative to improve durability and performance of suspension components in light vehicles, provided that the material hardness is properly selected to balance stability and driving comfort during vehicle operation in different road conditions and real automotive service environments for everyday mobility safety efficiency and reliability in modern transport systems worldwide today and future mobility demands of society and sustainable engineering development goals in automotive technology applications and engineering practice today.

Keywords: automotive suspension, bushings, polyurethane, simulation, finite element method, CAD design.



LISTA DE SIGLAS

CAD – Diseño Asistido por Computadora (Computer Aided Design).

CAE – Ingeniería Asistida por Computadora (Computer Aided Engineering).

FEM – Método de Elementos Finitos (Finite Element Method).

ABS – Acrilonitrilo Butadieno Estireno, material termoplástico utilizado en impresión 3D.

PLA – Ácido Poliláctico, polímero biodegradable usado en fabricación aditiva.

TPU – Poliuretano Termoplástico, material flexible empleado en la fabricación de piezas.

STL – Formato de archivo para modelos tridimensionales utilizado en impresión 3D.



Tabla de contenido

ÍNDICE DE TABLAS	16
ÍNDICE DE FIGURAS.....	17
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	19
CAPITULO I	20
1. INTRODUCCIÓN	20
1.1. Problema de investigación	20
1.2. Objetivos.....	21
1.2.1. Objetivo general.....	21
1.2.2. Objetivos Específicos.....	21
1.3. Formulación del problema de investigación.	22
1.3.1. Alcance y delimitación.....	22
1.4. Justificación	22
1.5. Hipótesis o preguntas de investigación	23
CAPÍTULO II.....	25
2. MARCO TEÓRICO	25
2.1. Antecedentes	25
2.2. Bases teóricas.....	27
2.2.1. Sistemas de suspensión automotriz.....	27
2.3. Principales componentes del sistema de suspensión automotriz	28
2.3.1. Barra estabilizadora.....	28
2.3.2. Amortiguadores.....	29
2.3.3. Rótula.....	30
2.3.4. Bujes y mangueta	31
2.4. Ángulo de convergencia y ángulo de divergencia	32
2.4.1. Ángulo de avance	32
2.4.2. Ángulo de caída	33
2.5. Bujes de suspensión automotriz.....	34
2.6. Procesos de manufactura para la fabricación de materiales para bujes de suspensión automotriz	38
2.7. Proceso de simulación para verificar la funcionalidad	40



SUBDECANATO

2.8.	Procesos de manufactura.....	41
CAPÍTULO III.....		43
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	43
3.1.	Materiales.....	43
3.1.1.	Software EXStar	43
3.1.2.	Mesa de suspensión automotriz inferior (Aveo).....	44
3.1.3.	Durómetro shore A	46
Figura 15		46
3.1.4.	Creality Ender 3	46
3.2.	Método.....	48
3.3.	Diseño CAD de bujes.....	50
3.3.1.	Escaneo 3D	50
3.3.2.	Modelado de mesa de suspensión	55
3.3.3.	Modelado de bujes de suspensión.....	57
3.3.4.	Ensamble mesa de suspensión	59
3.4.	Simulación computacional de bujes.....	59
3.4.1.	Formas de bujes	59
3.4.2.	Comportamiento mecánico de bujes.....	60
3.4.3.	Cálculo de rigidez en bujes	63
3.5.	Cálculo de rigidez para buje grande.....	65
3.5.1.	Materiales utilizados para la fabricación de bujes	67
3.5.2.	Propiedades de materiales	69
3.5.3.	Caucho Vulcanizado	69
3.5.4.	Poliuretano para fabricación	69
3.5.5.	Modelos matemáticos de materiales hiperelásticos para simulación computacional	70
3.5.6.	Unidades para simulación	70
3.5.7.	Mallado	71
3.5.8.	Condiciones para simulación	72
3.5.9.	Condiciones para simulación de buje grande	73
3.5.10.	Condiciones para simulación de buje pequeño.....	77
3.6.	Proceso de manufacturas de bujes	81
3.6.1.	Métodos para obtención de bujes de poliuretano.....	81



SUBDECANATO

3.6.2. Diseño de moldes.....	82
3.6.3. Fabricación de moldes (impresión 3D).....	83
3.6.4. Proceso de fundición líquida.....	85
CAPÍTULO IV	90
4. RESULTADOS	90
4.1. Resultados Del Proceso De Simulación: Buje Grande	90
4.1.1. Comportamiento radial del buje grande (Material original).....	90
4.1.2. Comportamiento radial del buje grande (Poliuretano).....	91
4.1.3. Comportamiento axial del buje grande (Material original)	92
4.1.4. Comportamiento axial del buje grande (Poliuretano).....	93
4.1.5. Comportamiento torsional del buje grande (Material original)	94
4.1.6. Comportamiento torsional del buje grande (Poliuretano).....	95
4.2. Resultados Del Proceso De Simulación: Buje Pequeño	96
4.2.1. Comportamiento radial del buje pequeño (Material original)	97
4.2.2. Comportamiento radial del buje pequeño (Poliuretano).....	97
4.2.3. Comportamiento axial del buje pequeño (Material original).....	98
4.2.4. Comportamiento axial del buje pequeño (Poliuretano)	99
4.2.5. Comportamiento torsional del buje pequeño (Material original).....	100
4.2.6. Comportamiento torsional del buje pequeño (Poliuretano).....	101
4.3. Análisis de resultados para el buje grande.....	103
4.3.1. Rigidez radial.....	103
Comparación de rigidez radial buje grande	103
4.3.2. Rigidez axial	103
Comparación de rigidez axial buje grande.....	104
4.3.3. Rigidez torsional	104
Comparación de rigidez torsional buje grande.....	104
4.4. Análisis de resultados para el buje pequeño	105
4.4.1. Rigidez radial.....	105
Comparación de rigidez radial buje pequeño.....	105
4.4.2. Rigidez axial	105
Comparación de rigidez axial buje pequeño	106
4.4.3. Rigidez torsional	106



SUBDECANATO

Comparación de rigidez torsional buje pequeño	106
4.5. Resultados de fabricación	107
4.5.1. Moldes impresos	107
4.5.2. Bujes fabricados	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117



SUBDECANATO ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Propiedades de los materiales termoplásticos y aplicación en la industria.....</i>	39
Tabla 2	<i>Especificaciones generales programa EXStar.....</i>	41
Tabla 3	<i>Especificaciones generales buje y plato de suspensión</i>	42
Tabla 4	<i>Especificaciones generales buje y plato de suspensión</i>	44
Tabla 5	<i>Características escáner 3D.....</i>	48
Tabla 6	<i>Comparación de propiedades de materiales para fabricación de bujes</i>	65
Tabla 7	<i>Material para parte elástica de buje original.....</i>	66
Tabla 8	<i>Material poliuretano para parte elástica de buje a fabricar.....</i>	67
Tabla 9	<i>Unidades utilizadas para la simulación</i>	68
Tabla 10	<i>Resultados FEM de rigidez radial del buje grande con material original.....</i>	88
Tabla 11	<i>Resultados FEM de rigidez radial del buje grande material poliuretano.....</i>	89
Tabla 12	<i>Resultados FEM de rigidez axial del buje grande con material original.....</i>	90
Tabla 13	<i>Resultados FEM de rigidez axial del buje grande material poliuretano.....</i>	91
Tabla 14	<i>Resultados FEM de rigidez torsional del buje grande material original.....</i>	92
Tabla 15	<i>Resultados FEM de rigidez torsional del buje grande material poliuretano.....</i>	93
Tabla 16	<i>Resultados FEM de rigidez radial del buje pequeño con material original... ..</i>	94
Tabla 17	<i>Resultados FEM de rigidez radial del buje pequeño material poliuretano.... ..</i>	95
Tabla 18	<i>Resultados FEM de rigidez axial del buje pequeño con material original</i>	96
Tabla 19	<i>Resultados FEM de rigidez axial del buje pequeño material poliuretano.....</i>	97
Tabla 20	<i>Resultados FEM de rigidez torsional del buje pequeño material original.....</i>	98
Tabla 21	<i>Resultados FEM de rigidez torsional del buje pequeño material poliuretano.....</i>	99
Tabla 22	<i>Comparación de rigidez radial buje grande.....</i>	100
Tabla 23	<i>Comparación de rigidez axial buje grande</i>	100
Tabla 24	<i>Comparación de rigidez torsional buje grande.....</i>	101
Tabla 25	<i>Comparación de rigidez radial buje pequeño</i>	101
Tabla 26	<i>Comparación de rigidez axial buje pequeño</i>	102
Tabla 27	<i>Comparación de rigidez torsional buje pequeño.....</i>	103



**SUBDECANATO
ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1 <i>Suspensión pasiva</i>	24
Figura 2 <i>Suspensión activa</i>	25
Figura 3 <i>Barra estabilizadora</i>	26
Figura 4 <i>Amortiguadores</i>	27
Figura 5 <i>Rótula</i>	28
Figura 6 <i>Buje y mangueta</i>	28
Figura 7 <i>Ángulo de convergencia y divergencia</i>	29
Figura 8 <i>Ángulo de avance</i>	30
Figura 9 <i>Ángulo de caída</i>	31
Figura 10 <i>Montaje de bujes</i>	32
Figura 11 <i>Curvas características del comportamiento de bujes: radial</i>	34
Figura 12 <i>Curvas características del comportamiento de bujes: axial</i>	34
Figura 13 <i>Curvas características del comportamiento de bujes: torsional</i>	35
Figura 14 <i>Mesa de suspensión automotriz inferior (Aveo)</i>	42
Figura 15 <i>Durómetro shore A</i>	43
Figura 16 <i>Creality Ender 3</i>	44
Figura 17 <i>Proceso metodológico desarrollado en este estudio</i>	46
Figura 18 <i>Ubicación de marcadores en la mesa de suspensión</i>	48
Figura 19 <i>Configuración inicial para escaneo</i>	49
Figura 20 <i>Escaneo de parte superior de mesa de suspensión</i>	50
Figura 21 <i>Escaneo de parte inferior de mesa de suspensión</i>	50
Figura 22 <i>Unión de partes para obtención de mesa de suspensión</i>	51
Figura 23 <i>Mesa de suspensión para exportar en STL</i>	52
Figura 24 <i>Importación de archivo escaneado en SolidWorks</i>	53
Figura 25 <i>Modelado 3D de la mesa de suspensión en base al escaneo 3D</i>	54
Figura 26 <i>Elemento original, modelado 3D y vista de sección de buje pequeño</i>	55
Figura 27 <i>Elemento original, modelado 3D y vista de sección de buje grande</i>	55
Figura 28 <i>Ensamble de mesa de suspensión con los bujes de suspensión</i>	56
Figura 29 <i>Formas de bujes de suspensión</i>	57
Figura 30 <i>Comportamientos típicos de la deflexión de bujes automotrices</i>	59
Figura 31 <i>Direcciones de rigidez en los bujes de suspensión McPherson</i>	59
Figura 32 <i>Dimensiones principales del buje</i>	60
Figura 33 <i>Factor de forma de bujes sometidos a carga radial</i>	61
Figura 34 <i>Mallado de bujes de suspensión</i>	69
Figura 35 <i>Aplicación de material acero a bocines</i>	70
Figura 36 <i>Aplicación de material original para el buje grande</i>	71



SUBDECANATO

Figura 37	<i>Aplicación de material poliuretano para el buje grande</i>	71
Figura 38	<i>Definición de contactos entre bocin interno y material elastómero</i>	72
Figura 39	<i>Definición de contactos entre bocin externo y material elastómero</i>	72
Figura 40	<i>Aplicación de condiciones para el comportamiento radial</i>	73
Figura 41	<i>Aplicación de condiciones para el comportamiento axial</i>	73
Figura 42	<i>Aplicación de condiciones para el comportamiento torsional</i>	74
Figura 43	<i>Aplicación de material acero a bocines</i>	75
Figura 44	<i>Aplicación de material original para el buje pequeño</i>	75
Figura 45	<i>Aplicación de material poliuretano para el buje pequeño</i>	76
Figura 46	<i>Definición de contactos entre bocin interno y material elastómero</i>	76
Figura 47	<i>Definición de contactos entre bocin externo y material elastómero</i>	77
Figura 48	<i>Aplicación de condiciones para el comportamiento radial</i>	77
Figura 49	<i>Aplicación de condiciones para el comportamiento radial</i>	78
Figura 50	<i>Aplicación de condiciones para el comportamiento torsional</i>	78
Figura 51	<i>Diseño de molde para buje pequeño</i>	79
Figura 52	<i>Diseño de molde para buje grande</i>	80
Figura 53	<i>Preparación de modelo pequeño para impresión 3D</i>	81
Figura 54	<i>Preparación de modelo pequeño para impresión 3D</i>	82
Figura 55	<i>Relación de mezcla en gramos Parte A y B para llenado molde pequeño</i>	83
Figura 56	<i>Relación de mezcla en gramos Parte A y B para llenado molde grande</i>	83
Figura 57	<i>Proceso de mezclado de las dos partes antes del vertido</i>	84
Figura 58	<i>Vertido de la mezcla A y B por el orificio de llenado del molde</i>	85
Figura 59	<i>Verificación de llenado a través del orificio de salida del aire</i>	85
Figura 60	<i>Deformación total buje grande con material original</i>	87
Figura 61	<i>Deformación total buje grande con material poliuretano</i>	88
Figura 62	<i>Deformación total buje grande con material original</i>	89
Figura 63	<i>Deformación total buje grande con material poliuretano</i>	90
Figura 64	<i>Deformación total buje grande con material original</i>	91
Figura 65	<i>Deformación total buje grande con material poliuretano</i>	92
Figura 66	<i>Deformación total buje pequeño con material original</i>	93
Figura 67	<i>Deformación total buje pequeño con material poliuretano</i>	94
Figura 68	<i>Deformación total buje pequeño con material original</i>	95
Figura 69	<i>Deformación total buje pequeño con material poliuretano</i>	96
Figura 70	<i>Deformación total buje pequeño con material original</i>	97
Figura 71	<i>Deformación total buje pequeño con material poliuretano</i>	98
Figura 72	<i>Molde pequeño impreso parte A y B</i>	104
Figura 73	<i>Molde grande impreso parte A y B</i>	104
Figura 74	<i>Buje pequeño y grande a base de uretano</i>	105



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 <i>Rigidez radial</i>	60
Ecuación 2 <i>Modulo elástico</i>	61
Ecuación 3 <i>Relación de dimensiones</i>	61
Ecuación 4 <i>Rigidez axial</i>	62
Ecuación 5 <i>Rigidez torsional</i>	62



CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de investigación

El desarrollo de la investigación sobre la metodología para la fabricación de bujes de suspensión propone obtener los materiales ideales y resistentes para dichos bujes, siendo capaces de desarrollar una eficiencia alta a fuerzas de movimiento, desgaste a imperfecciones de carretera y sobrepeso en el vehículo. Además, la fabricación será netamente con recursos de la industria de la manufactura nacional lo cual nos permite hacer énfasis en la capacidad de desarrollar bujes de calidad con las mismas características o aún mejores para sobrellevarlo a una venta en un futuro , esto nos hace tener un énfasis en la disminución de ruidos y mejoramiento del confort el cual es muy esencial y seguro de los cuales se requiere que los bujes tengan la capacidad de soportar esfuerzos mayores y prestaciones de mejor servicio a lo largo de su vida útil en los vehículos automotores livianos, a su vez obtener un índice de seguridad alto y funcionalidad del sistema de suspensión adecuado, es así como nuestro principal objetivo serán evitar los cambios continuos, mantener las propiedades mecánicas y dar una mejor conductibilidad al ocupante.

Por lo general la falla de los bujes es muy común debido a las cargas fluctuantes que se aplican al acelerar y frenar el vehículo, lo cual se ve afectado en lapso corto, generando tironeo, golpeteo metálico, hasta un desgaste poco uniforme de las llantas, generan ruidos



demasiados molestos, un confort inaceptable e inestabilidad del vehículo. Desde otro punto de vista debemos analizar la escasez de recursos de manufactura actualmente en el país para la fabricación y análisis del estudio a investigar, la falta de instrumentos y equipos nos mantendrá en un régimen de desarrollo un poco limitado.

1.2. Objetivos

1.2.1. *Objetivo general*

Desarrollar una metodología para la fabricación de bujes de suspensión usando procesos de manufactura disponibles en el mercado ecuatoriano.

1.2.2. *Objetivos Específicos*

- Analizar los materiales y procesos de manufactura que se utilizan para la elaboración de elementos de unión elásticos de la suspensión (bujes).
- Diseñar los bujes de suspensión para un vehículo liviano usando un software CAD/CAE.
- Desarrollar el proceso de fabricación para los bujes de suspensión usando procesos de manufactura disponibles en la industria nacional.
- Instalar los bujes de suspensión fabricados en un vehículo para verificar su comportamiento.



1.3. Formulación del problema de investigación.

1.3.1. Alcance y delimitación

Realizar una investigación acerca de los distintos materiales que se utilizan en la fabricación de bujes para suspensiones de vehículos livianos.

Simular el buje en el software CAD/CAE con las medidas y especificaciones precisas, a su vez añadir el material a utilizar, por consiguiente, simular el objeto a diferentes tipos de mallado con análisis de elementos finitos y mirar la diferencia en repetidas iteraciones.

Desarrollar un proceso de fabricación de bujes de suspensión, indicando las técnicas e instrumentos adecuados, las cantidades u operaciones efectuadas en cada punto, generando un análisis en cada punto para que no existan fallas en su elaboración, cabe recalcar que solamente se utilizará procesos de manufactura disponibles en la industria nacional.

Por último, instalar el buje de suspensión fabricado en un vehículo para evaluar su comportamiento en la conducción en distintos tipos de carreteras a fin de evidenciar la confiabilidad y seguridad del elemento.

1.4. Justificación

Un componente importante de una economía libre de sistema de precios en los cuales estos juegan un rol importante a la cuando llega el proceso de fabricación y distribución el punto clave en el que se fijan son precios por encima del valor del mercado, por lo que se genera la sobreproducción con la esperanza de venderlos, sin embargo, dichos bienes terminan bajando debido al exceso de oferta. Por lo contrario, cuando se ofrecen valores mínimos generan incentivos para no producir cantidades suficientes produciendo escasez



y por consecuencia el incremento de los precios.

El estudio del plan de creación de oportunidades lo tomamos desde el punto económico, debido a que el costo de bujes de caucho que se los realiza a altas producciones se ve obligado a que su valor suele ser considerado un poco bajo, es así que los bujes de poliuretano al someterles a pruebas de fatiga, dureza y algunas otras, se analiza la durabilidad y los cambios continuos que se ofrecen, es así que se generar costos superiores a los pensados anteriormente, es por eso que al implementar buje con otro tipo de material aportando dureza y durabilidad se puede obtener a costos más accesibles que estos nos ayudan a evitar falta de seguridad y por consiguiente el cambio continuo en nuestro vehículo, teniendo en cuenta que a altas producciones reduciríamos costos considerables, pero a pequeña escala de producción resultan ser más caros, es por eso que apuntamos a tratar de desarrollar un buje que cumpla con todos los requisitos y necesidades que requiere el vehículo.

1.5. Hipótesis o preguntas de investigación

Las hipótesis de investigación son afirmaciones tentativas sobre las relaciones entre dos o más variables en un estudio. En otras palabras, son suposiciones que el investigador hace sobre lo que podría estar ocurriendo en el fenómeno que está estudiando. Las hipótesis son importantes porque proporcionan una guía para la recolección y análisis de datos, y ayudan a los investigadores a evaluar la validez de sus resultados.

Por otro lado, las preguntas de investigación son las preguntas que el investigador fórmula para guiar su estudio y buscar respuestas a un problema específico. Las preguntas de investigación deben ser específicas, claras y precisas para que el investigador pueda



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



obtener información útil y relevante para su estudio. Las preguntas de investigación pueden ser abiertas o cerradas y se utilizan para guiar la búsqueda de información, la recolección de datos y el análisis de los resultados.



CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

En el artículo desarrollado por (Ziobro, 2015), se realiza un análisis sobre la funcionalidad del buje caucho-metal. Esta es considerada una de las partes más importantes de la suspensión automotriz ya que favorece al confort y la seguridad. La investigación se basó en la comparación de diferentes tipos de bujes (caucho-metal y poliuretano) mediante un análisis numérico. Entre los principales resultados, el autor destaca que los materiales de menor dureza (caucho-metal) presentan un nivel de tensión menor y una deformación significativa en comparación con los bujes de poliuretano. En este contexto, el estudio concluye mencionando que los casquillos de poliuretano necesitan una elección minuciosa del material ya que esto permitirá equilibrar la estabilidad y la comodidad en la conducción.

Por otro lado, en el estudio realizado por Cerit et al. (2010), se desarrollaron diferentes análisis estructurales de una barra estabilizadora fabricada en SAE 9262. Esto se realizó mediante la técnica de elementos finitos (EF) para determinar la distribución de tensiones. Además, se investigaron sistemáticamente los efectos de la dureza y el espesor de pared del caucho utilizado en los bujes sobre la distribución de tensiones. Para esto, se analizaron diversos cauchos de poliuretano (75, 85, 90 y 95 Shore A) así como tres espesores de pared de los bujes (5,25, 7 y 8,75 mm). Se observó que tanto el caucho blando como el espesor de pared grueso tienden a reducir la tensión en la región crítica. Con base en los resultados de los análisis de elementos finitos (EF), se planificaron

**SUBDECANATO**

varias pruebas de barras estabilizadoras con bujes específicos. Los autores concluyeron que la reducción de la tensión equivalente en la barra estabilizadora, lograda mediante la modificación del buje, proporciona una mejora significativa en la durabilidad a la fatiga.

Manrique et al. (2017), en su estudio analizó el tiempo de resistencia de tres prototipos (AA-723, AA-725 y AA-726) de caucho metal usando el método de elementos finitos (MEF). Inicialmente se ajustó la función de energía Yeoh, la cual describe la deformación del material y la energía almacenada en el buje. A continuación, se hizo un análisis estático aplicando una carga gradual de 29170 N a la mitad del cilindro exterior del buje a presión. Esto permitió obtener la curva de esfuerzo-deformación. Los resultados más relevantes indican que el prototipo AA-726 presenta una durabilidad a la fatiga mayor a los demás prototipos.

Finalmente, el artículo desarrollado por Duleba et al. (2012) aborda la aplicación de manufacturas rápidas en moldes de silicona que permiten la elaboración de bujes de suspensión específicamente en vehículos de competición (Honda Civic EK9). La metodología consistió en diseñar y simular componentes de cargas reales para la fabricación de un prototipo con poliuretano de dureza shore 90A. Los bujes desarrollados se ubicaron en el vehículo recorriendo 80 km en pista y 1500 km en carretera. Como resultado de este estudio, mejoró significativamente la estabilidad y el comportamiento dinámico especialmente en curvas. Esto permitió reducir el tiempo de vuelta en más de 5 segundos aproximadamente.



2.2. Bases teóricas

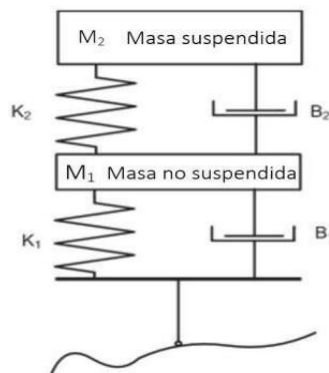
2.2.1. Sistemas de suspensión automotriz

La suspensión de un vehículo cumple la función de enlazar las ruedas directrices con el chasis. Esto garantiza una conducción cómoda y estable ya que se atenúan las irregularidades de la calzada (Anrrango y Meneses, 2024). En este contexto, existen dos tipos de suspensión (activa y pasiva), las cuales tienen diferentes roles. El sistema de suspensión pasiva se define por el uso de resortes o más conocidos como almacenadores de energía y amortiguadores para soportar el peso. Las directrices de la suspensión son fijos, dependiendo de las características de calzada y la carga aplicada.

En la Figura 1, se observa que la K_1 representa la rigidez del neumático y la K_2 denota la rigidez de la suspensión. Por otro lado, B_1 corresponde al coeficiente de amortiguamiento del neumático, y B_2 al coeficiente de amortiguamiento de la suspensión. Al modificar la rigidez o el coeficiente de amortiguamiento en una suspensión pasiva se presentan problemas de confort o lo más crucial la maniobrabilidad.

Figura 1

Suspensión pasiva



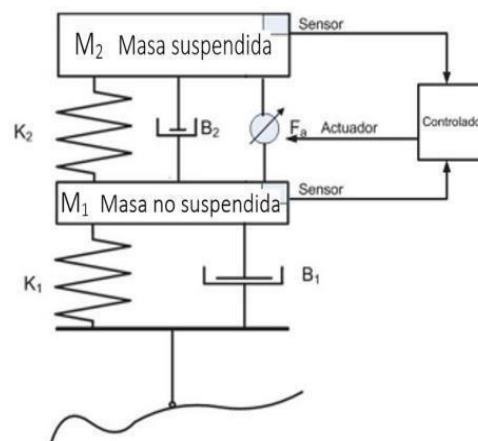
Tomada de: Anrrango y Meneses (2024) [1]



Por el contrario, los sistemas de suspensión activa con la ayuda de sensores y actuadores del vehículo, ayuda a almacenar y disipar la energía provocada. En la Figura 2 se observa los sensores, actuadores y la ECU analizan el trayecto mediante señales eléctricas enviadas por la ECU con el fin de controlar los actuadores (Anrrango y Meneses, 2024).

Figura 2

Suspensión activa



Tomada de: Anrrango y Meneses (2024) [1]

2.3. Principales componentes del sistema de suspensión automotriz

2.3.1. Barra estabilizadora

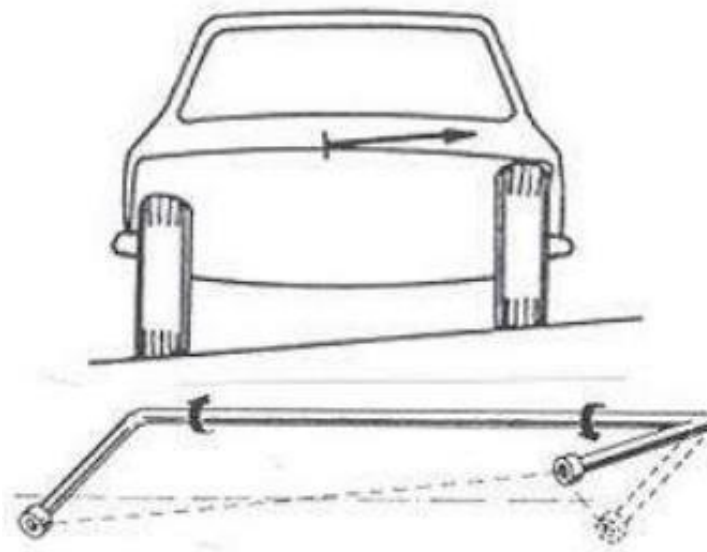
La barra estabilizadora es un componente elástico de la suspensión, está ubicada a lo largo del tren delantero o tren trasero independientemente. Cuando un automóvil pasa por superficies irregulares, se somete a diversos factores que modifican la distribución de las masas constantemente. La barra estabilizadora se encarga de modificar los movimientos fuertes de inclinación del vehículo contrarrestando los esfuerzos generados por una rueda hacia la otra.



Además, es un componente del vehículo que gracias a sus comportamientos mecánicos se encarga de mantener las ruedas en contacto directo con el suelo durante toda su trayectoria (Arévalo et al., 2022).

Figura 3

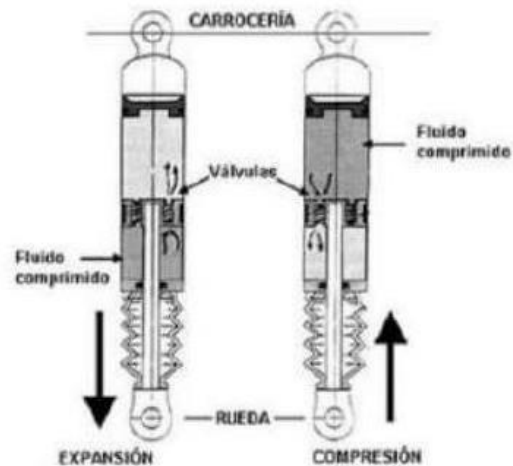
Barra estabilizadora



Tomada de: Arévalo et al. (2022) [2]

2.3.2. Amortiguadores

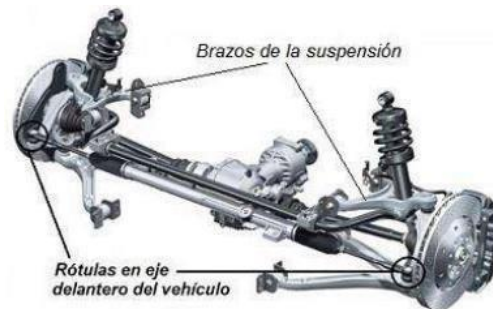
El amortiguador es el encargado de absorber la energía provocada, es decir, ayuda a disminuir las oscilaciones no deseadas en un movimiento instantáneo. Sin el uso del amortiguador, la carrocería del vehículo entraría en contacto con las ruedas directrices generando desequilibrio y pérdida del control del automotor. Los amortiguadores por lo general pueden ser de gas o hidráulicos depende el uso, calzada, y carga a la que se vean sometidos en diferentes tipos de vehículos (Arévalo et al. 2022).

**Figura 4***Amortiguadores*

Tomada de: Arévalo et al. (2022) [2]

2.3.3. Rótula

La rótula es una pieza fundamental de la suspensión y su función es unir los sistemas de suspensión y dirección del vehículo. Esto les permite a las ruedas girar y pivotar con facilidad. Existen diferentes tipos de rótulas y cada una de ellas cumple un papel específico. En este contexto, las rótulas de carga, son las que reciben y transmiten el peso del automóvil y se clasifican en rótulas de compresión y rótulas de tracción. Por otro lado, las rótulas seguidoras no reciben peso, solo guían el movimiento de la rueda. Cada tipo de rótula sirve para garantizar dirección precisa, seguridad y estabilidad en la conducción (Arévalo et al., 2022).

**Figura 5***Rótula*

Tomada de: Arévalo et al. (2022) [2]

2.3.4. Buje y mangueta

La mangueta es una pieza del sistema de suspensión, que permite la unión del buje, la rueda y los elementos del sistema de suspensión. La mangueta tiene distintas formas y ángulos que dependen mucho del tipo de vehículo y la geometría de este. El buje es la pieza donde está fijada la rueda y el sistema de frenos al igual que los rodamientos que necesita el vehículo para girar libremente (Arévalo et al., 2022).

Figura 6*Buje y mangueta*

Tomada de: Arévalo et al. (2022) [2]

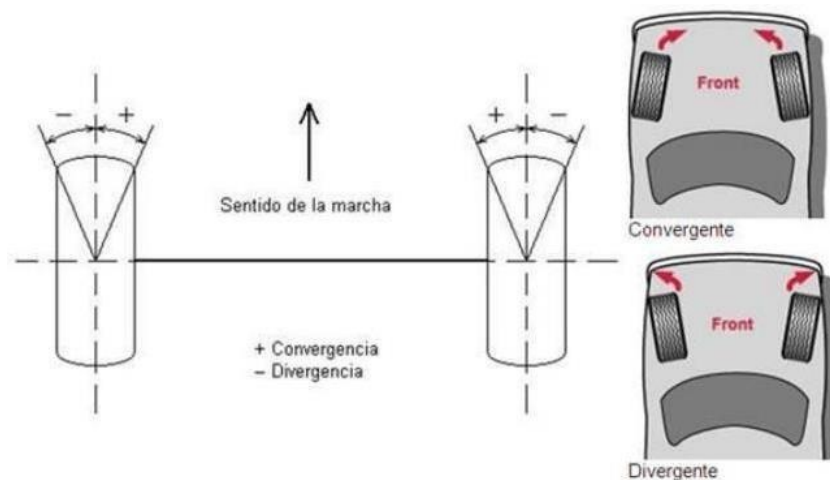


2.4. Ángulo de convergencia y ángulo de divergencia

En la Figura 7 se observa el ángulo de convergencia definido entre cada una de las ruedas y el eje longitudinal del vehículo, siempre en su proyección horizontal. Si las rectas que se ponen convergen para cortarse delante del vehículo, se habla de convergencia, sino es así, se habla de divergencia (Villares et al., 2016).

Figura 7

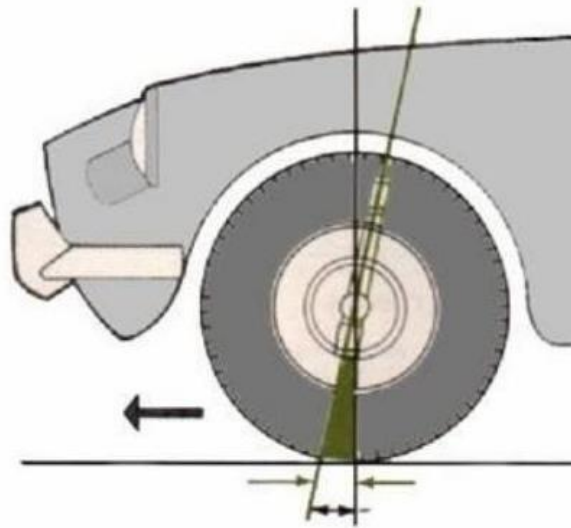
Ángulo de convergencia y divergencia



Tomada de: Villares et al. (2016) [3]

2.4.1. Ángulo de avance

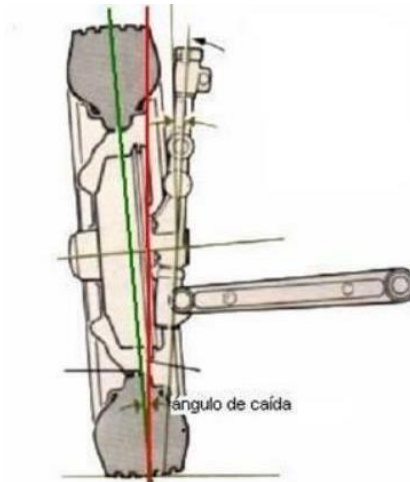
En la Figura 8 se muestra el ángulo de avance que ocasiona la auto alineación de la llanta, teniendo al vehículo en un grado elevado de estabilidad. Este ángulo, se define en grados y se hace la comparativa con una línea que pasa por la parte superior e inferior del pivote de dirección con una línea perpendicular a la calzada (Villares et al., 2016).

**Figura 8***Ángulo de avance*

Tomada de: Villares et al. (2016) [3]

2.4.2. Ángulo de caída

El ángulo de caída está dirigido entre el plano x del neumático y el suelo. La Figura 9 indica la caída positiva en la parte superior de la rueda sobresale más cualquier otra parte del neumático. Existe la caída negativa en el suelo que sobresale más que cualquier otra parte del neumático, suelen añadirse más a carros deportivos o modificados (Villares et al., 2016).

**Figura 9***Ángulo de caída*

Tomada de: Villares et al. (2016) [3]

2.5. Bujes de suspensión automotriz

Los bujes de suspensión automotriz se componen de un cilindro elastómero, contenido entre acero cilíndricos interior y exterior. La forma de los bujes de suspensión ayuda a las oscilaciones y vibraciones en el componente metálico se aplique en el caucho. Las principales deformaciones en los bujes de suspensión automotriz que se estudian incluyen las deformaciones radiales, torsionales y axiales (Rivas et al., 2019).

El artículo desarrollado por Rivas (2019), sugiere que la mayoría de los bujes de suspensión automotriz sufren afectaciones por diferentes cargas, se debe incluir el análisis de los factores de desgaste como fatiga, fricción y carga. El diseño debe tener una particularidad en forma y diseño para diferentes condiciones de manejo, las cuales pueden generar grietas o ruptura total del caucho con el metal en un cierto número de ciclos de esfuerzo.

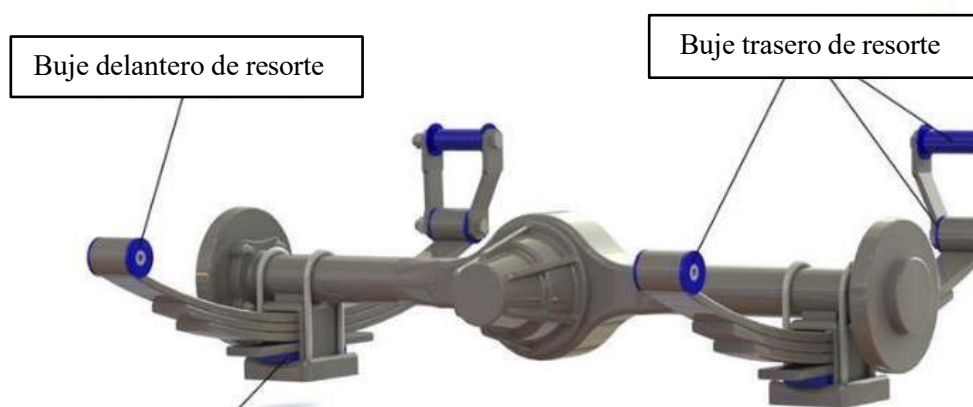


Los bujes de suspensión son elementos muy importantes dentro del sistema automotriz permitiendo que dos piezas metálicas móviles se unan. Además, la función principal de estas piezas es facilitar el desplazamiento ininterrumpido, reduciendo la fricción y aislando los ruidos generados por el contacto entre piezas (Córdova et al., 2018). Para analizar la estructura de estos elementos, se debe considerar el tipo de material y las condiciones de trabajo que deben soportar. Esto ya que de ello depende su durabilidad, la capacidad de absorber vibraciones y su resistencia. En conclusión, los bujes de suspensión tienen como finalidad evitar vibraciones, desgastes y movimientos excesivos de la suspensión automotriz, generando así un mejor confort y modo de manejo.

En la Figura 10 se observa el montaje de los bujes de suspensión, los cuales tienen la funcionalidad de recibir el desgaste, flexibilidad y dureza de las partes móviles de la suspensión del automóvil.

Figura 10

Montaje de bujes



Tomada de: Córdova et al. (2018) [4]

**SUBDECANATO**

El desempeño de un buje de suspensión automotriz depende de numerosos factores, como es el tipo de conducción y las condiciones de funcionamiento del vehículo. En condiciones normales, su vida útil aproximada es de 288 horas de trabajo. Sin embargo, en camionetas o vehículos de transporte pesado que operan en condiciones mucho más forzadas y recorren distancias largas en carreteras poco regulares, este periodo puede reducirse significativamente, llegando apenas a 96 horas de uso (Córdova et al., 2018).

La dureza es la medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada, la abrasión, el rayado, la cortadura y las deformaciones permanentes. Existen dos tipos de escala más utilizados en los cauchos que son SHORE e IR, en la cual la dureza IRHD se la genera en ensayos no destructivo. Por otro lado, la escala SHORE produce un desgaste permanente en el material y es más usado en el análisis de la producción (Guachisaca et al., 2022).

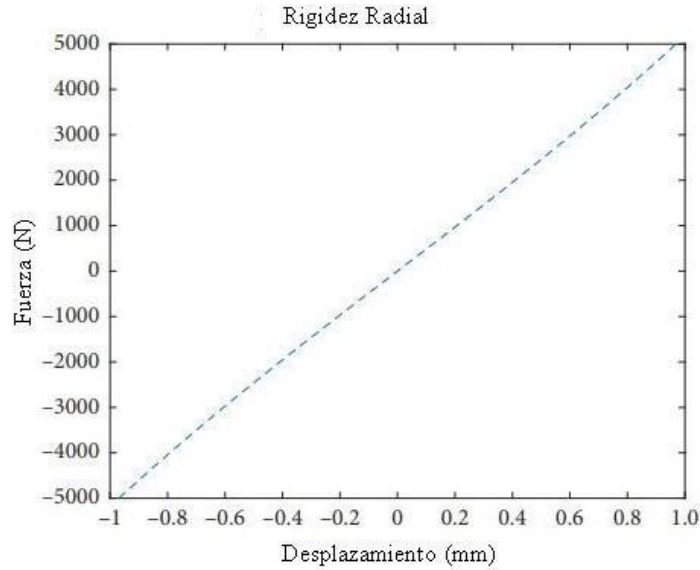
Cabe mencionar que un buje puede presentar diferentes tipos de fallas. En este contexto, la fricción y fatiga entre componentes metálicos con deformaciones del material son de las principales fallas que se dan en estas piezas. Esto genera que el buje pierda la funcionalidad de estabilidad a la suspensión afectando al confort y la seguridad en la conducción.

En la Figura 11 se muestran las curvas características objetivo de rigidez en el modo radial, la Figura 12 indica el modo axial y la Figura 13 el modo torsional. Para una suspensión McPherson delantera o trasera, la rigidez axial suele ser lineal en un rango de desplazamiento de ± 15 mm, la rigidez torsional es lineal entre $\pm 10^\circ$, y, aunque la rigidez radial no es lineal bajo condiciones normales de suspensión automotriz, puede considerarse lineal para desplazamientos cortos ($\pm 1,5$ mm).



Figura 11

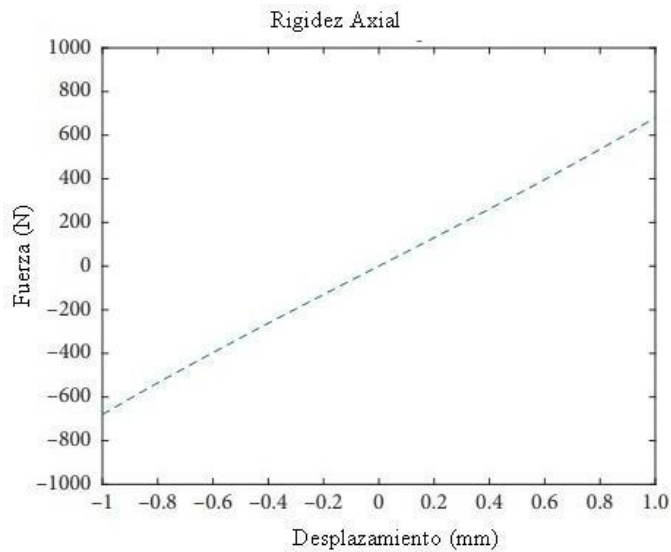
Curvas características del comportamiento de bujes: radial



Tomada de: Rivas et al. (2019) [13]

Figura 12

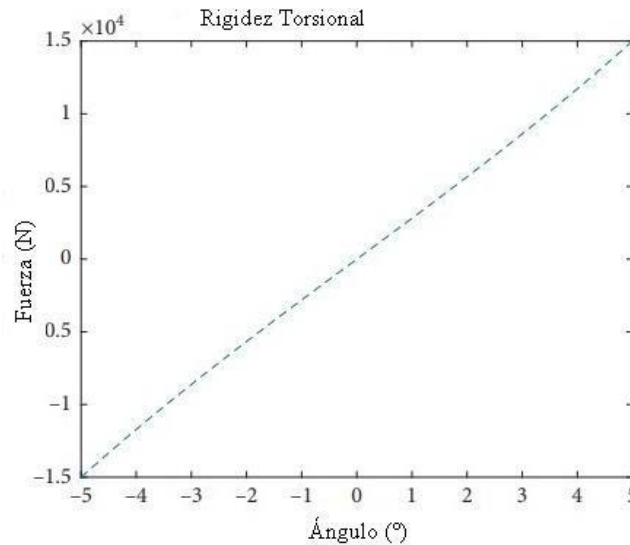
Curvas características del comportamiento de bujes: axial



Tomada de: Rivas et al. (2019) [13]

**Figura 13**

Curvas características del comportamiento de bujes: torsional



Tomada de: Rivas et al. (2019) [13]

2.6. Procesos de manufactura para la fabricación de materiales para bujes de suspensión automotriz

En el mercado ecuatoriano existe el acero SAE 4041 y DIN 20Mn V6 / En 10294-1 (barra perforada) que sirve para elaborar los bujes de suspensión automotriz. Este material permite que se apliquen tratamientos térmicos a los aceros en procesos de fricción, desgaste y lubricación en las superficies en contacto. Además, estos tienen la capacidad de soportar cargas excesivas y condiciones de trabajo muy extremas (Guachisaca et al., 2022). Los bujes suelen ser fabricados de compuestos de materiales sintéticos muy duros, como el poliuretano. Este material es escogido debido a la resistencia que tiene ante variaciones de temperatura o la corrosión que generalmente se crea por la presencia de aceites o sal.



Al analizar las propiedades de los materiales, se concluyó que el Aluminio 7075, T6 es una opción altamente recomendada. Este material cumple los requisitos necesarios para garantizar el correcto funcionamiento de la pieza. A su vez, esto genera un excelente rendimiento, a un precio accesible (Borreguero et al., 2019).

En cuanto al molde, es una pieza que requiere contar con un material resistente y duradero. Por esta razón, el material sugerido es el Acero Templado AISI 1141 enfriado en aceite. Este material presenta propiedades de alta dureza gracias al gran porcentaje de carbono que contiene (Córdova et al., 2018).

Los cauchos vulcanizados empleados en la fabricación de los bujes caucho-metal se debe analizar la dureza shore A, esfuerzo a máxima tensión y el desgaste por fricción. Los materiales AA723, AA725 y AA726 son materiales utilizados para la elaboración de bujes según el cumplimiento de la norma ASTM D2000. Se encontró que el caucho AA725 tiene mayor desempeño mecánico, es decir tiene mayor resistencia a la tracción que los demás elastómeros termoestables al comparar en las pruebas experimentales y a las simulaciones de vida a la fatiga (Quintero et al., 2017).

La manufactura en el sector automotriz constituye un factor determinante debido a la gran acogida en el sector industrial lo que le permite incentivar a los diferentes sectores manufactureros a generar estrategias las cuales les permitan crecer de una manera óptima, para el trabajo de productos de calidad y mejor solvencia económica. El sector automotriz representa una industria con una amplia ventaja, teniendo la simplicidad de brindar a países un desarrollo estratégico, permitiendo que se mejore el ámbito de la industria mediante obra de mano a bajos costos, a su vez con la finalidad de tener impresión hacia otros países para tener una economía estable (Chuqui et al., 2022).



En el Ecuador la trayectoria de la manufactura ha disminuido de manera exponencial, por las consecuencias de dependencia del comercio de países externos que genera la no aceptación de un mercado local. Se realizó un estudio en el rendimiento de la producción nacional y asegura un índice bajo de crecimiento por la falta de capacitación y empleo, se apunta a que un método que favorezca a una producción mayor y amplia para satisfacer las necesidades teniendo como principal objetivo, la omisión de un método primario exportador y extractivista (Ochoa et al., 2022).

Las materias primas se pueden presentar en dos maneras distintas tanto en fibras sin resina y los pre impregnados, que se deben mantener en bajas temperaturas y su manufactura es demasiado complicada ya que se maneja bajo parámetros exigentes de temperatura y presión, pero el uso es más sencillo a comparación a las fibras sin resina. Cuando se necesita fabricar un producto con buenas propiedades mecánicas, gran calidad y repetitividad en el proceso, se recomienda el uso de pre impregnados. Aunque se requiere una mayor tolerancia a golpes e impactos a gran escala, suele ser de mayor eficacia el uso de materiales de mayor dureza y en casos excesivos se opta por materiales de mayor rigidez y durabilidad, aunque al tener mayores propiedades mecánicas sus precios se disparan para utilizar en aplicaciones (Arano et al., 2010).

2.7. Proceso de simulación para verificar la funcionalidad

Es un método fundamentado en técnicas de software, que puede ser usado para el análisis de cuerpos y diferentes sistemas de aplicación ingenieril. El MEF es versátil para resolver problemas de análisis ingenieriles, gracias al avance de la tecnología, han favorecido a la eficiencia de los programas de elementos finitos, para tener una mejor respuesta a los diferentes análisis creados (Cubillos et al., 2007).



2.8. Procesos de manufactura

En uno de los procesos de la fabricación aditiva (AM de Additive Manufacturing) o dicha de manera general, la impresión 3D, ayuda a la personalización de figuras u moldes con complejidad geométrica, reducción de tiempo y coste de fabricación a comparación de otros procesos de manufactura. El uso de un software que permita generar moldes exactos y simétricos con el fin replicar la elaboración de bujes originales del carro aplicado, teniendo la instalación de la pieza realizada en la aprobación de la calidad del buje. En comparación a otras técnicas de maquinado como torno, fresadora, corte CNC que son procesos un poco más complejos, llevan más tiempo y su costo es excesivo (Fernández et al., 2019).

En la Tabla 1 se observa las propiedades de los materiales termoplásticos para FDM y su aplicación en diversas industrias.



Tabla 1

Propiedades de los materiales termoplásticos y aplicación en la industria

Material	Propiedades	Aplicación / Industria
ABS	Resistente y fuerte.	Automoción, aeroespacial, dispositivos médicos.
ASA	Resistencia mecánica y estabilidad UV	Prototipos de automóviles y piezas de producción prácticas para uso en exteriores bajo el sol.
Nylon 12	Buena resistencia química, alta resistencia a la fatiga e impacto	Componentes de protección contra impactos y alta resistencia a la fatiga, fricción y ajustes a presión.
PC	Alta resistencia a la tracción y flexión	Prototipos funcionales, herramientas y accesorios, moldes para las industrias automotriz y aeroespacial.
PPSF/PPSU	Excelente resistencia química, calor y fuerza mecánica	Prototipos automotrices y herramientas para aplicaciones exigentes en una variedad de industrias.
PEI o ULTEM	Biocompatible, excelente resistencia mecánica, química y estabilidad térmica	Creación rápida de prototipos y herramientas avanzadas en las industrias aeroespacial, automotriz.
PLA	Buena resistencia a la tracción y calidad de la superficie	Ideal para modelos y prototipos que requieren detalles estéticos.
TPU	Excelente resistencia al desgarro, desgaste, alto impacto, fuerza y dureza	Flexibilidad y resistencia a la corrosión para muchos productos químicos y aceites industriales.

Tomada de: Fernández et al. (2019) [5]



CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El capítulo III aborda de manera detallada la selección de los materiales y la metodología aplicada para el desarrollo del estudio. Inicialmente, se describen los criterios de elección de los materiales empleados y sus propiedades. Estos resultan fundamentales para garantizar la precisión y validez de los resultados. A continuación, se explica el procedimiento a seguir para generar modelos geométricos, considerando las dimensiones y condiciones de diseño. Finalmente, se presenta la simulación computacional realizada mediante el método de elementos finitos (FEM). Esta técnica permite evaluar el comportamiento de las piezas bajo distintas condiciones de carga, facilitando un análisis más confiable y cercano a la realidad.

3.1. Materiales

Los materiales seleccionados para el desarrollo del presente proyecto de grado, se sustentan en los parámetros establecidos durante las fases de diseño y simulación. A continuación, se presentan de manera específica cada uno de los materiales empleados en función de su utilidad, características y su pertinencia para los objetivos descritos.

3.1.1. Software EXStar

Para la realización del proyecto se utilizó el software EXStar, mediante el cual fue posible generar una malla inicial. Esta aplicación formó la base para el modelado de la mesa de suspensión automotriz inferior, junto con los respectivos bujes del vehículo a estudiar. Esto se realizó a través de un diseño asistido por computadora (SolidWorks). Finalmente, la etapa de simulación estructural se ejecutó en el software ANSYS (versión estudiantil),



SUBDECANATO

reconocido por su capacidad para el análisis mediante el método de elementos finitos, lo que permitió validar el comportamiento del modelo bajo condiciones de carga específicas.

Tabla 2

Especificaciones generales programa EXStar

CARACTERÍSTICA	DETALLE
Modo de escaneo	Escaneo con luz estructurada
Distancia de punto	0.1 mm – 3mm
Fuente de luz	Luz estructurada VCSEL infrarroja
Distancia de trabajo efectiva	160 mm – 1400 mm
Distancia de trabajo optima	400 mm
Profundidad de campo	160 – 1400 mm
Campo de visión máximo	434 mm x 379 mm

Tomada de: Einstar (2024) [9]

3.1.2. Mesa de suspensión automotriz inferior (Aveo)

La mesa de suspensión inferior automotriz del vehículo Aveo, se considera como un elemento principal de estudio en el proyecto. Este elemento permitió la adquisición de datos precisos mediante el escaneo tridimensional y la medición física. Los datos constituyeron la base para la elaboración de los bujes a escala real. En este contexto, se pudo comparar la funcionalidad entre los bujes de caucho originales y los fabricados en poliuretano. El propósito de esta comparación fue evaluar su desempeño y validar posibles mejoras en el sistema de suspensión.



Tabla 3

Especificaciones generales buje y plato de suspensión

CARACTERÍSTICA	DETALLE
Material plato suspensión	Acero
Material buje suspensión	Caucho-metal
Procedencia	Coreano
Fabricante	Deporpas
Modelo	SC141
Marca	Yokobo
Medidas buje suspensión grande	12.4 x 56 x 24 (mm)
Medidas buje suspensión pequeño	12.4 x 47 (mm)

Tomada de : Deporpas (2023) [8]

Figura 14

Mesa de suspensión automotriz inferior (Aveo)





3.1.3. Durómetro shore A

El durómetro shore A es un instrumento de medición que sirve para determinar la dureza de materiales blandos (cauchos, elastómeros, plásticos flexibles, algunos polímeros, etc.). Su principal función se basa en la inserción de una aguja en la superficie del material, bajo una carga estandarizada. La medición en la escala shore A refleja la resistencia del material a la deformación. Además, permite evaluar sus propiedades mecánicas y compararlas de manera objetiva. Este parámetro es fundamental en aplicaciones donde la rigidez, la capacidad de absorción de impactos del material y la resistencia, son esenciales para su desempeño.

Figura 15

Durómetro shore A



Tomado de: Green Tech [7]

3.1.4. Creality Ender 3

La impresora 3D Creality Ender 3 se utilizó como herramienta de apoyo en este proyecto. En este contexto, este elemento permitió la obtención de diseños para la fabricación de moldes empleados en el proceso de manufactura. Los moldes fueron útiles

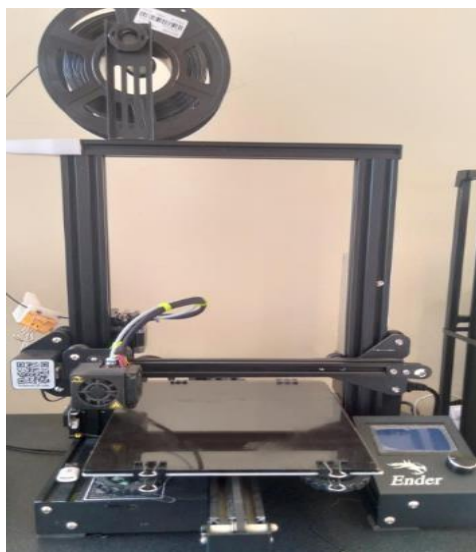


para la elaboración de los bujes, ya que posibilitaron la producción de múltiples piezas a partir de un mismo molde. De este modo, se optimizó tanto el tiempo como los recursos en el desarrollo de los bujes de suspensión automotriz.

Tabla 4*Especificaciones generales Creality Ender 3*

CARACTERÍSTICA	DETALLE
Tecnología de moldeo	Moldeo por deposición fundida
Tamaño de impresión	220 x 220 x 250 mm
Velocidad de impresión	180 mm/s , normal 30-60 mm/s
Precisión de impresión	0.1 mm
Diámetro de boquilla	0.4 mm
Filamento	PLA, ABS, TPU, etc.
Peso	8.1 kg
Tamaño de maquina	440 x 440 x 564 mm

Tomada de: Creality (2017) [10]

Figura 16*Creality Ender 3*



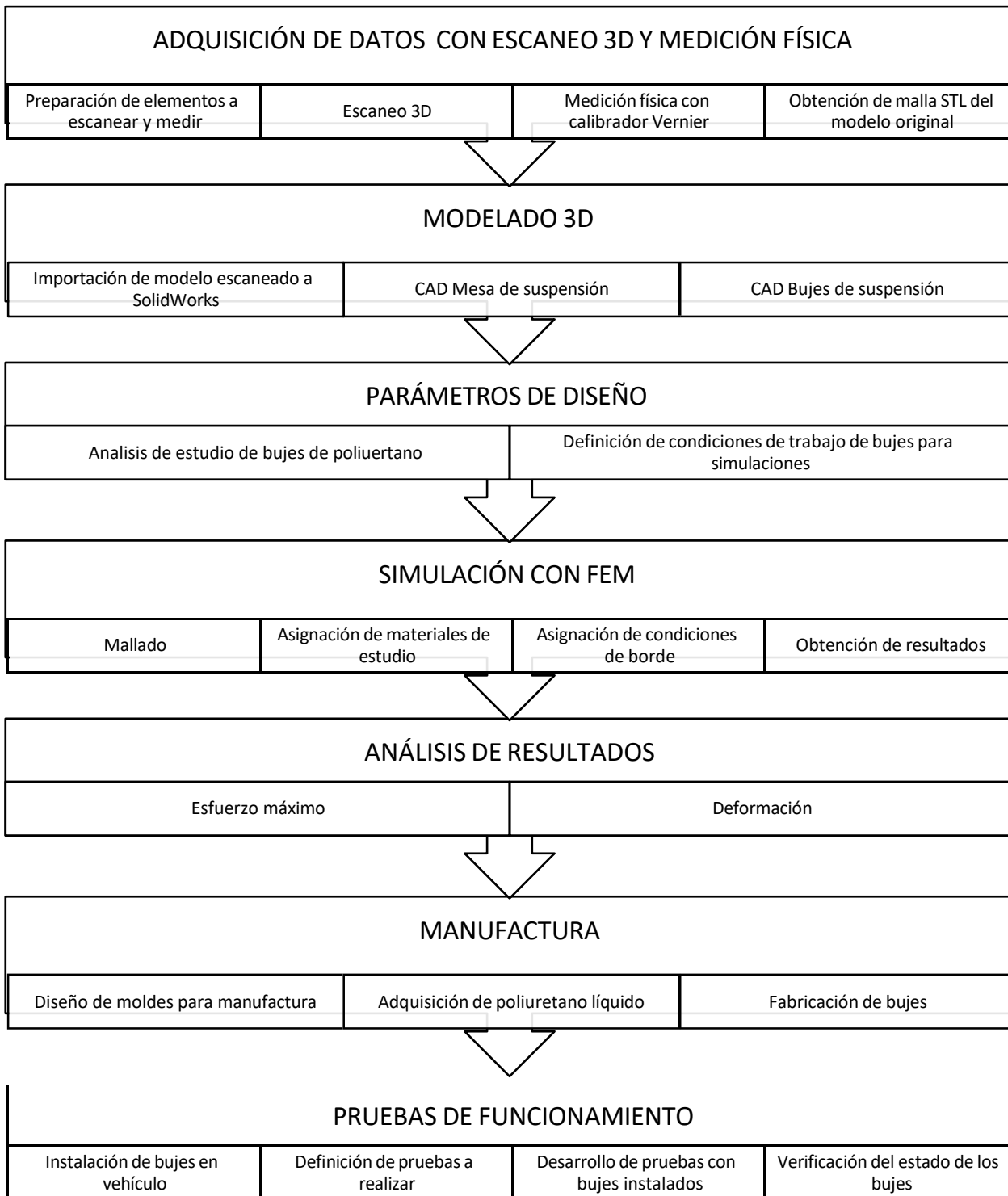
3.2. Método

En la Figura 17 se describe de manera consecutiva los procesos y métodos que se llevaron a cabo para la realización del estudio. Esta metodología asegura la validez científica de cada uno de los pasos ejecutados, al igual que la confiabilidad de los resultados obtenidos en las simulaciones computacionales, logrando así los objetivos propuestos en este estudio.



Figura 17

Proceso metodológico desarrollado en este estudio





3.3. Diseño CAD de bujes

3.3.1. Escaneo 3D

Se utilizó un escáner modelo Einstar de Shining que posee las características detalladas en la Tabla 5. El proceso de escaneo implicó colocar marcadores específicos del equipo, los cuales facilitan la localización del escáner y aceleran el proceso de escaneo. Estos marcadores se distribuyeron por toda la mesa de suspensión, especialmente en las áreas que presentan mayores dificultades para ser escaneadas.

La Figura 17 ilustra un ejemplo de la disposición de los marcadores en la zona de escaneo. La cantidad de marcadores varía según el tamaño del área a escanear, aunque se recomienda colocarlos de manera aleatoria a una distancia de entre 15 y 20 cm, especialmente en las áreas con pocas características geométricas, donde es más probable que el escáner pierda su referencia.



Tabla 5

Características escáner 3D

CARACTERÍSTICA	DETALLE
Modo de escaneo	Escaneo de luz estructurada
Distancia del punto	0,1mm ~ 3mm
Distancia de trabajo	Distancia de trabajo efectiva: 160 mm-1400 mm; Distancia de trabajo óptima: 400 mm
Campo de visión máximo	434 mm*379 mm (bajo la distancia de trabajo óptima)
Velocidad de escaneo	980.000 puntos/s, hasta 14 FPS
Modos de alineación	Alineación de características, alineación híbrida, alineación de texturas, marcadores globales
Escaneo de textura	Sí
Escaneo al aire libre	Sí

Tomada de: Shining et al. (2010) [11]

Figura 18

Ubicación de marcadores en la mesa de suspensión para proceso de escaneo

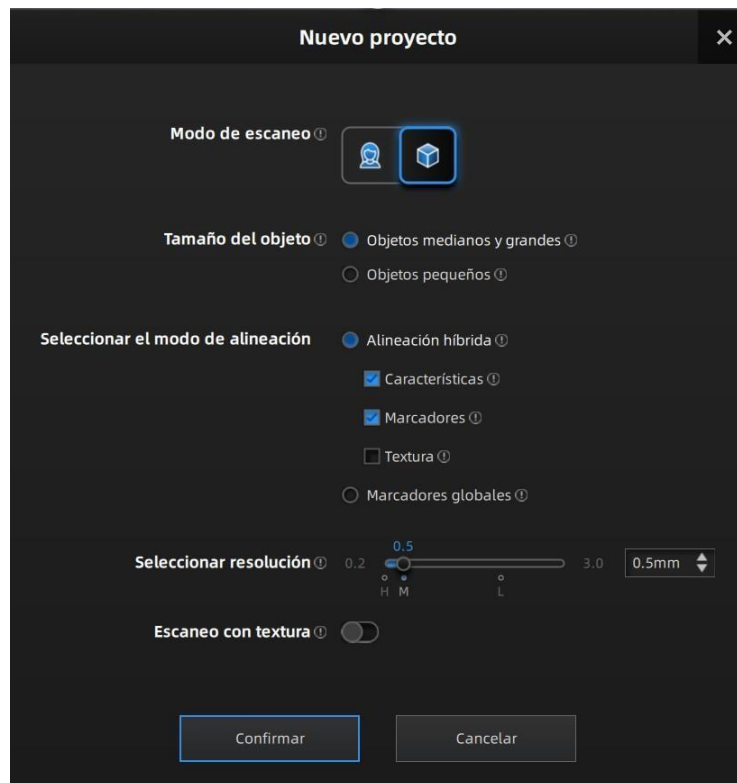




En la configuración inicial del escaneo, se eligió un tamaño de objeto mediano y grande, utilizando un modo de alineación híbrido que combina características y marcadores, y se estableció una resolución de 0.5 mm, como se muestra en la Figura 19.

Figura 19

Configuración inicial para escaneo



En la Figura 20 se muestra el escaneo del lado superior de la mesa de suspensión lo cual pertenece a un primer proyecto del grupo de escaneo. Luego se escaneó el otro lado de la mesa de suspensión como se muestra en la Figura 21.



Figura 20

Escaneo de parte superior de mesa de suspensión.

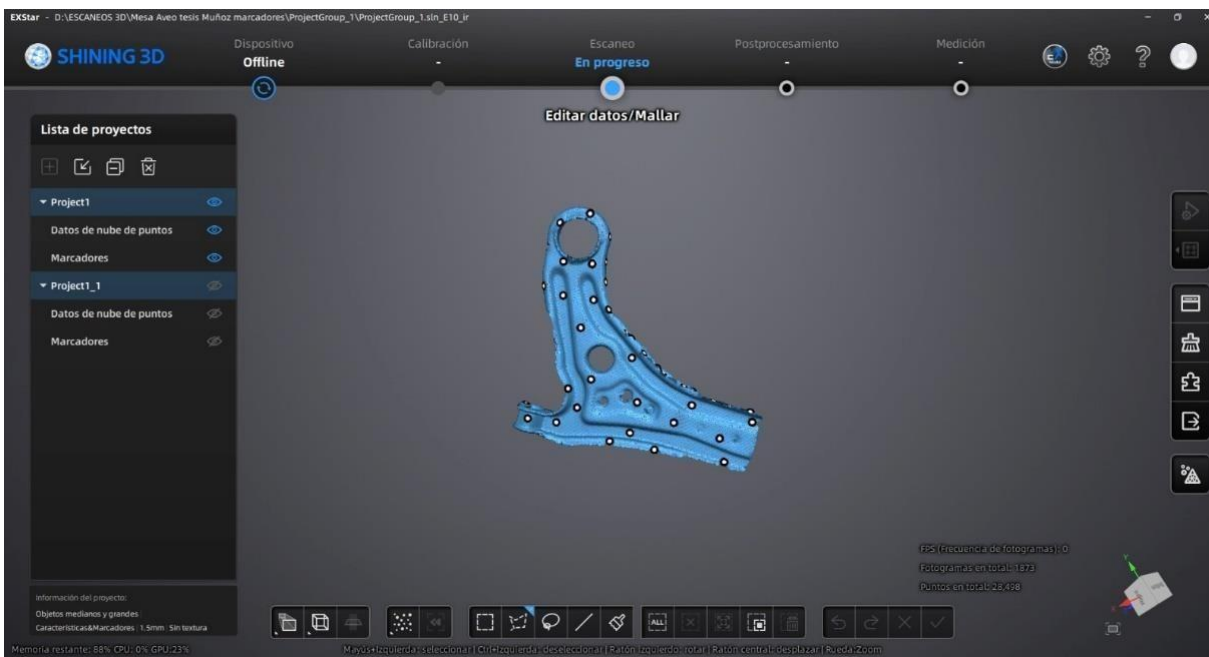


Figura 21

Escaneo de parte inferior de mesa de suspensión

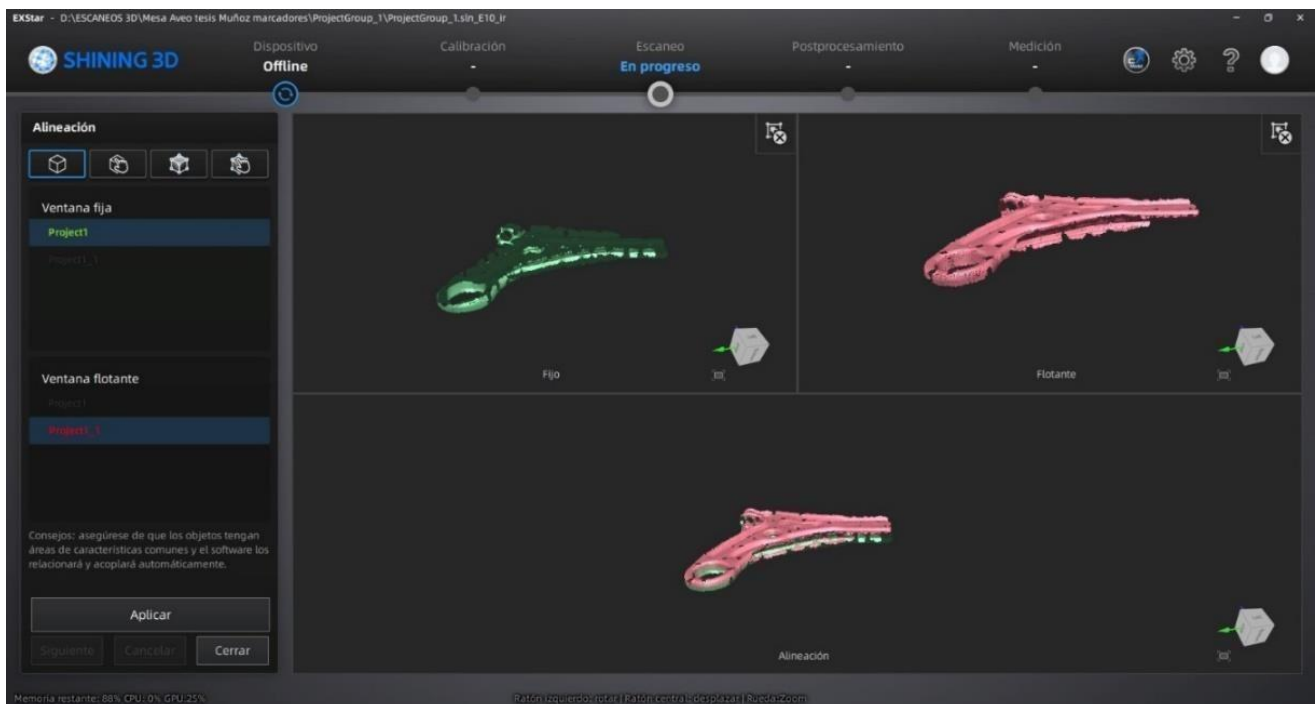




En la Figura 22 se unió los dos proyectos para obtener el modelo completo de la mesa de suspensión. Este proceso lo realiza el software de manera automática de acuerdo con las características de los elementos escaneados.

Figura 22

Unión de partes para obtención de mesa de suspensión



Tras finalizar el escaneo, se procedió a limpiar los elementos no útiles del archivo, para luego exportarlo en formato STL con el tamaño real del objeto como se indica en la Figura 23. Para lograr observar la mesa de suspensión a describir de manera idéntica a la original para nuestro trabajo de estudio y evitar la existencia de fallos en la simulación acercándonos a los datos más reales.

**Figura 23**

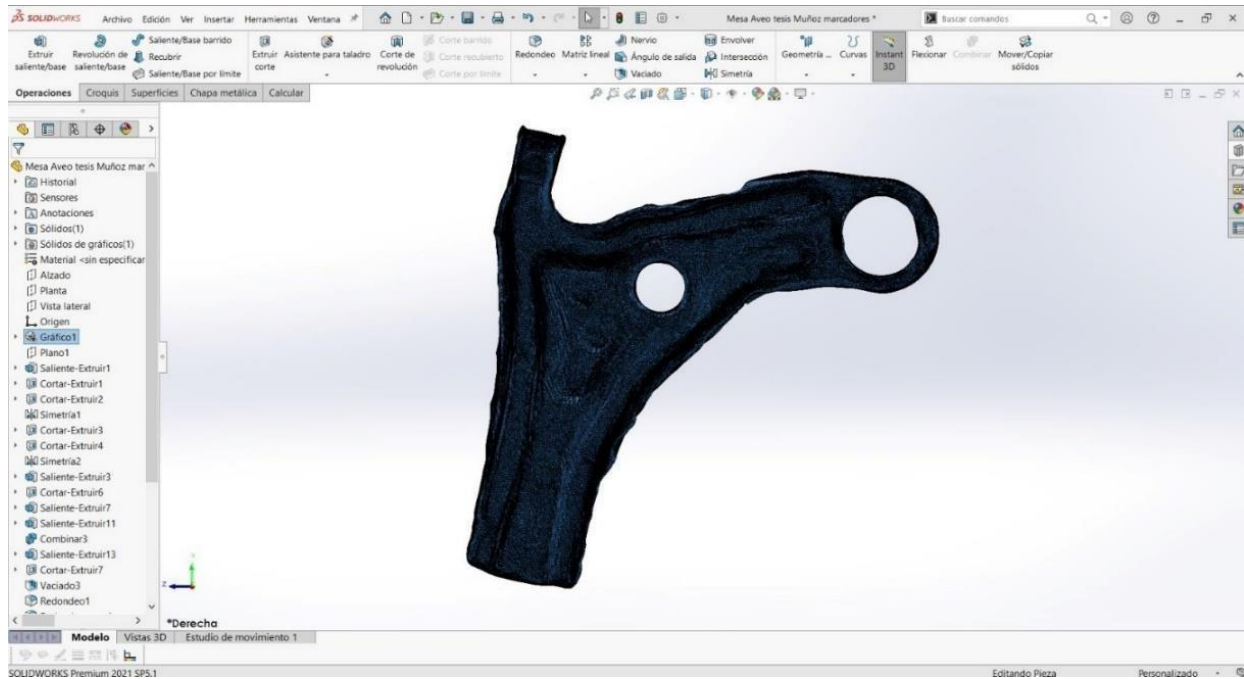
Mesa de suspensión para exportar en STL

**3.3.2. Modelado de mesa de suspensión**

En la Figura 24 se obtiene el archivo obtenido a través del escaneo se importa en SolidWorks como punto de partida para llevar a cabo el proceso de ingeniería inversa, con el objetivo de generar el modelo 3D de la mesa de suspensión, reproduciendo sus medidas y formas similares al modelo original.

**Figura 24**

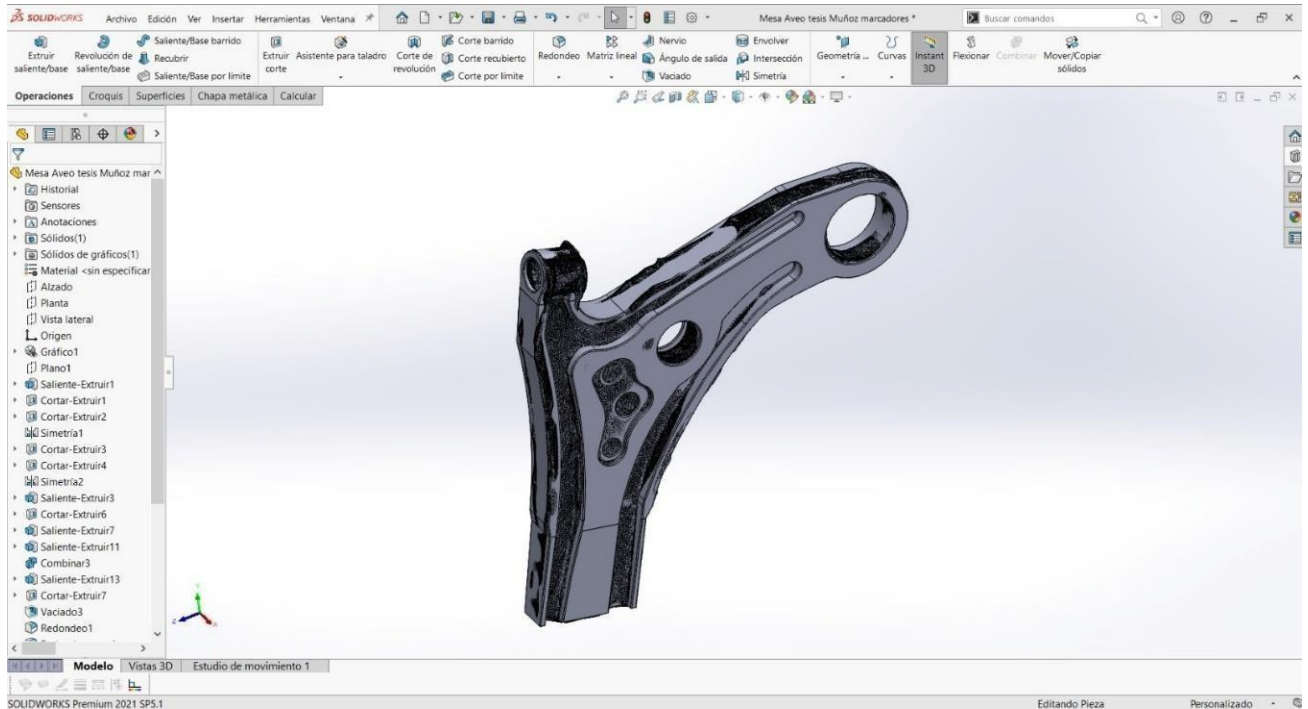
Importación de archivo escaneado en SolidWorks



Con el uso de las herramientas de modelado que dispone SolidWorks como la creación de planos, croquis 2D y operaciones de extrusión y corte se obtuvo el modelo 3D de la mesa de suspensión.

**Figura 25**

Modelado 3D de la mesa de suspensión en base al escaneo 3D



En la figura 25 se muestra el modelado completo de la mesa de suspensión del vehículo para ser analizado en la simulación.

3.3.3. Modelado de bujes de suspensión

Para el modelado de los bujes se realizó la medición directa de los elementos usando un calibrador Vernier, se ubicó las cotas en el croquis 2D y mediante operaciones de revolución se obtuvo cada uno de los elementos que conforman los dos bujes en estudio. Cada buje se realizó como ensamble a fin de asignar características individuales de material a cada uno de ellos para las simulaciones computacionales.



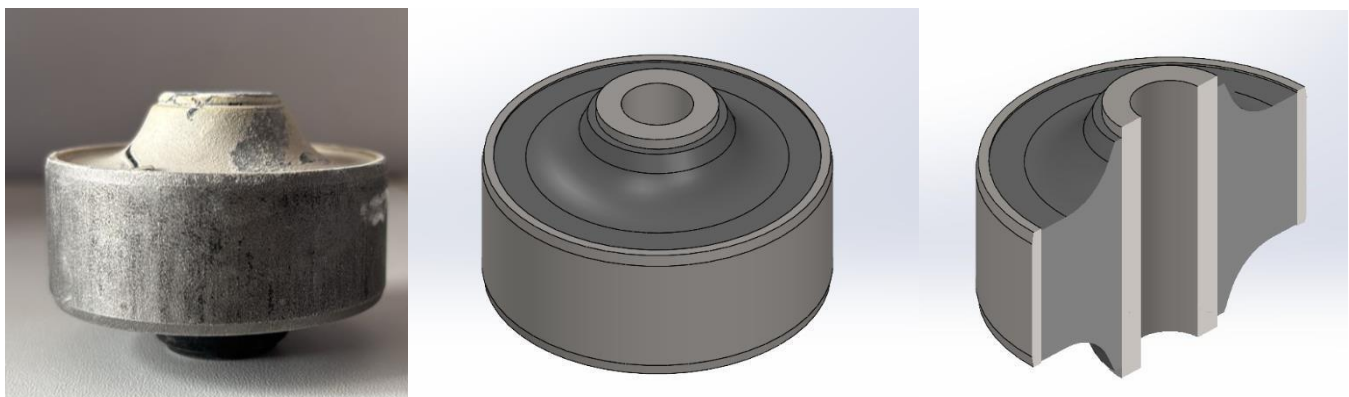
Figura 26

Elemento original, modelado 3D y vista de sección de buje pequeño



Figura 27

Elemento original, modelado 3D y vista de sección de buje grande



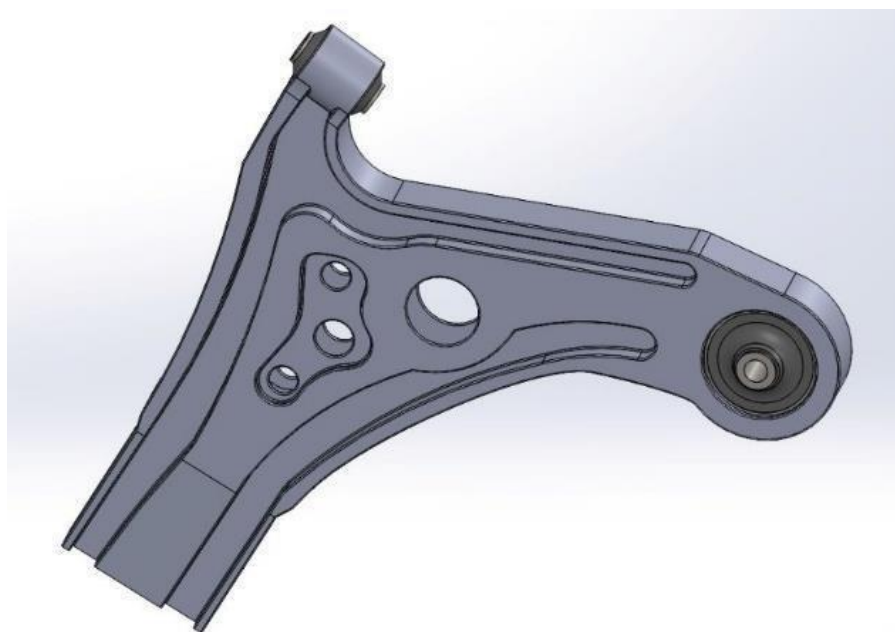


3.3.4. Ensamble mesa de suspensión

Una vez concluido el modelado de todos los elementos se ensamblaron en el software de diseño para su posterior simulación como se puede observar en la Figura 28.

Figura 28

Ensamble de mesa de suspensión con los bujes de suspensión



3.4. Simulación computacional de bujes

En este apartado se analiza los requerimientos y parámetros generales para la simulación computacional de bujes de suspensión automotriz, teniendo en cuenta cada uno de los apartados a mencionar basándonos en referencias bibliográficas.

3.4.1. Formas de bujes.

Existen diferentes formas de bujes según sus aplicaciones, por ejemplo, los bujes de superficies cilíndricas lisas y largas, mostrados en la Figura 29, son adecuados para suspensiones rígidas o para soportar cargas más elevadas. En particular, la construcción



presentada en la Figura 29 b es utilizada en vehículos ligeros debido a su superficie intermedia más corta. En automóviles de pasajeros, los silentblocks, representados en las Figuras 29 c-f, cumplen un rol versátil puesto que son de aplicación universal. Las variaciones ilustradas en las Figuras 29 g y h se caracterizan por el uso de caucho duro (Ziobro et al., 2015).

Figura 29

Formas de bujes de suspensión



Tomada de: Ziobro et al. (2015) [12]

3.4.2. Comportamiento mecánico de bujes.

Un buje suele estar compuesto por un cilindro elastomérico hueco ubicado entre dos manguitos cilíndricos de acero, uno en el interior y otro en el exterior, de manera que

**SUBDECANATO**

conecta los componentes del sistema de suspensión, permitiendo que las vibraciones y oscilaciones del componente metálico se transfieran al caucho, donde se amortiguan o eliminan. Para el diseño de bujes es esencial comprender su comportamiento y propiedades mecánicas básicas, ya que, durante el uso normal, los bujes experimentan desplazamientos y rotaciones entre sí, tanto en dirección paralela como perpendicular a la línea central del buje (Rivas et al., 2019).

El modo radial se refiere a una traslación perpendicular a la línea central de un bocín en relación con otro bocín que permanece fijo. Los modos torsional y axial se definen como la rotación y la traslación de un bocín respecto al otro alrededor y a lo largo de la línea central, respectivamente, además durante la deflexión torsional, el bocín exterior se mantiene fijo mientras el bocín interior rota, generando un momento o torsión alineado con el eje horizontal. La rigidez es una característica principal en el diseño de bujes.

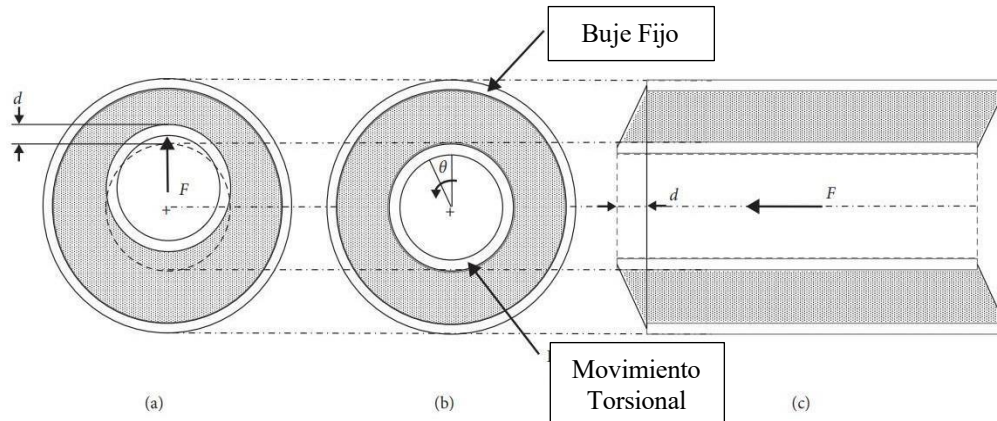
Las unidades de rigidez o índice de elasticidad, en las direcciones radial y axial, se expresan en N/mm, en donde la rigidez indica la fuerza requerida para generar una unidad de deflexión. Por otra parte, para el modo de deflexión torsional, la rigidez describe la capacidad mecánica de un material para resistir deformación torsional, por lo que se define, como la relación entre el momento torsional aplicado y el ángulo de torsión, y sus unidades son N·mm/rad. De esta manera, el buje trabaja en compresión y tensión en la dirección radial, lo cual le otorga mayor rigidez, mientras que, en las direcciones torsional y axial, el buje trabaja en cizallamiento, proporcionando una rigidez relativamente baja (Rivas et al., 2019).

En una suspensión automotriz, los modos de deformación principales incluyen deformaciones radiales, torsionales y axiales como se observa en la Figura 30



Figura 30

Comportamientos típicos de deflexión de bujes automotrices: a) radial, b) torsional, c) axial.



Tomada de: Rivas et al. (2019) [13]

La Figura 31 muestra las direcciones de rigidez de un buje de automóvil con suspensión McPherson, considerando que la fuerzas se generan de acuerdo con los modos de conducción más comunes que corresponden al paso por curvas, frenado y aceleración.

Figura 31

Direcciones de rigidez en los bujes de suspensión McPherson



Tomada de: Rivas et al. (2019) [13]



SUBDECANATO

3.4.3. *Cálculo de rigidez en bujes*

En la Ecuación 1 se indica el cálculo de la rigidez de los bujes se puede determinar mediante ecuaciones matemáticas cuando se conoce la dureza del material, mediante método de elementos finitos (FEM) y experimentalmente en máquinas de ensayos o bancos de pruebas. La rigidez de los bujes se puede obtener mediante métodos analíticos.

Para la rigidez radial se puede utilizar la siguiente ecuación (Stiliyana et al., 2024).

$$K_r = \frac{7,5\pi LG}{\ln(D/d)} k_1 \quad (1)$$

Donde:

K_r representa la rigidez radial

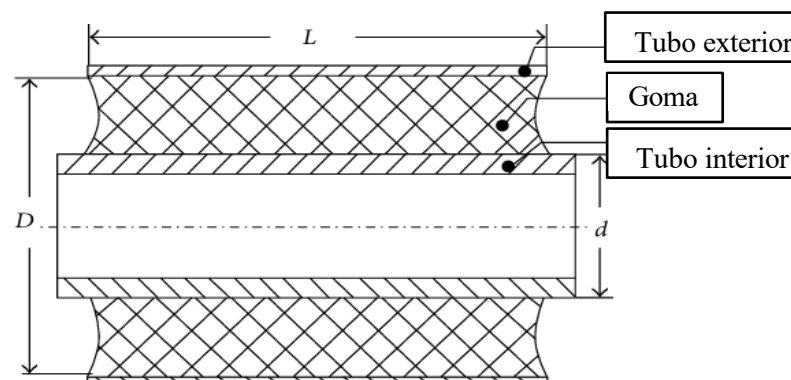
G es el módulo elástico

L , D y d indican las dimensiones del buje de acuerdo a la Figura 34

k_1 corresponde al factor de forma.

Figura 32

Dimensiones principales del buje



Tomada de: Tang et al. (2014) [14]



En la Ecuación 2 se muestra el cálculo del módulo elástico G , en donde H_s representa la dureza Shore del material:

$$G = 0,117e^{0,034(H_s)} \quad (2)$$

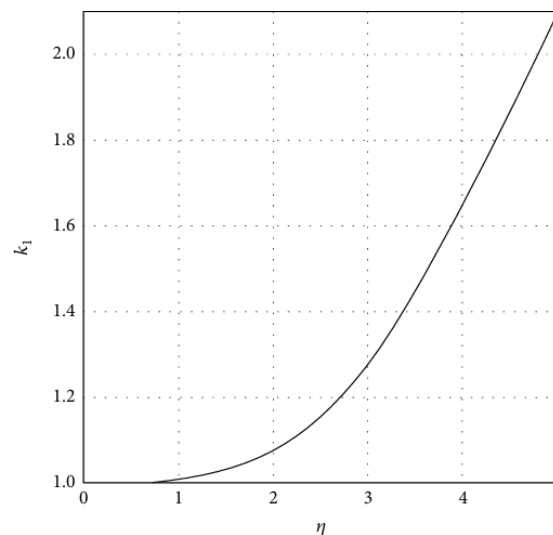
El valor del factor de forma k_1 se determina en las gráficas (Figura 11, Figura 12, Figura 13) tomando en consideración la Ecuación 3, que calcula la relación de dimensiones:

$$\eta = \frac{L}{\left(\frac{1}{2}\right) (D - d)} \quad (3)$$

El factor de forma es un factor matemático esencial en el diseño de bujes, siendo este el que determina la relación entre la rigidez y deformación del material bajo condiciones de carga. En el análisis de carga radial, este indicador se define como la razón entre la superficie del elastómero que se encuentra en contacto directo con el casquillo interior y las superficies expuestas hacia los extremos del buje.

Figura 33

Factor de forma de bujes sometidos a carga radial



Tomada de: Tang et al. (2014) [14]



Para el cálculo de rigidez axial se puede utilizar la ecuación (Tang et al., 2014).

$$K_a = \frac{2\pi LG}{\ln(D/d)} \quad (4)$$

En la ecuación 5 se muestra el cálculo de rigidez torsional se tiene la siguiente ecuación (Tang et al., 2014).

$$K_\theta = \frac{\pi LG(10^{-3})r^2R^2}{R^2 - r^2} \quad (5)$$

3.5. Cálculo de rigidez para buje grande

Para el buje grande se tiene las siguientes características:

$$L = 24 \text{ mm}$$

$$D = 56 \text{ mm}$$

$$d = 21 \text{ mm}$$

De acuerdo con los cálculos mencionados en el apartado anterior se tiene que:

$$\eta = \frac{24}{\left(\frac{1}{2}\right)(56 - 21)}$$

$$\eta = 1,37$$

De acuerdo con la gráfica el factor de forma sería $k_1 = 1,05$.



El módulo elástico se calculó para cada valor de dureza Shore: 60A para el buje original y 85A para el buje de poliuretano.

$$G_O = 0,117e^{0,034(60)} = 0,90$$

$$G_P = 0,117e^{0,034(85)} = 2,11$$

Con estas condiciones se calculó la rigidez radial para cada material.

$$K_{rO} = \frac{7,5\pi(24)(0,90)}{\ln(56/21)} (1,05)$$

$$K_{rP} = \frac{7,5\pi(24)(2,11)}{\ln(56/21)} (1,05)$$

Se observa que la rigidez radial del buje grande original según el cálculo analítico tiene un valor $K_{rO} = 544,8 \text{ N/mm}$ mientras que con el material de poliuretano el valor es de $K_{rP} = 1277,3 \text{ N/mm}$.

Para la rigidez axial se tiene:

$$K_{aO} = \frac{2\pi(24)(0,90)}{\ln(56/21)}$$

$$K_{aP} = \frac{2\pi(24)(2,11)}{\ln(56/21)}$$

Los valores de rigidez axial son $K_{aO} = \text{N/mm}$ para el buje original y

$K_{aP} = \text{N/mm}$ para el buje de poliuretano.



Para el cálculo de rigidez torsional se tiene:

$$K_{\theta} = \frac{\pi LG(10^{-3})r^2R^2}{R^2-r^2}$$

3.5.1. Materiales utilizados para la fabricación de bujes

Los bujes o también conocidos como “silentblocks” son componentes clave del sistema de sujeción del chasis del automóvil. Estos elementos son los encargados de absorber vibraciones y esfuerzos entre elementos estructurales. Además, consisten en dos casquillos metálicos cilíndricos separados por un material elastomérico, siendo el caucho y los poliuretanos los elastómeros más comunes. En la Tabla 8 se comparan las propiedades características de los casquillos amortiguadores fabricados en caucho y poliuretano (Ziobro et al., 2015).



Tabla 6

Comparación de propiedades de materiales para fabricación de bujes

Propiedad	Caucho	Poliuretano
Elasticidad	Alta elasticidad, ideal para absorber vibraciones y golpes.	Moderada elasticidad, ofrece un buen equilibrio entre flexibilidad y rigidez.
Durabilidad	Moderada, puede desgastarse más rápido debido a la exposición al calor, aceite o productos químicos.	Alta, resistente al desgaste, al aceite, al calor y a los productos químicos.
Resistencia a la deformación	Buena resistencia para deformarse bajo carga, pero tiende a perder eficacia con el tiempo.	Excelente resistencia a la deformación permanente y mantiene sus propiedades por más tiempo.
Capacidad de amortiguación	Superior en la absorción de vibraciones, ideal para una conducción más suave.	Menor capacidad de amortiguación que el caucho, pero proporciona una mayor precisión en la suspensión.
Resistencia al envejecimiento	Sensible al envejecimiento por factores como el calor y los rayos UV.	Alta resistencia al envejecimiento por factores ambientales mantiene su rendimiento durante más tiempo.
Costo	Generalmente más económico	Más costoso en comparación con el caucho
Rigidez	Menor rigidez, proporciona mayor confort de conducción.	Mayor rigidez, mejora el control y la estabilidad del vehículo
Resistencia a cargas dinámicas	Buena, pero puede sufrir fatiga con el tiempo bajo cargas extremas	Excelente resistencia a cargas dinámicas mantiene su forma y funcionalidad bajo esfuerzos repetitivos
Conducción	Mejora el confort y suavidad en la conducción, absorbiendo mejor las imperfecciones del terreno	Proporciona una conducción más firme y controlada, ideal para un manejo más preciso
Aplicaciones	Ampliamente utilizado en vehículos donde se prioriza el confort y la reducción de vibraciones (vehículos de pasajeros, camiones ligeros).	Se utiliza en aplicaciones donde se requiere mayor durabilidad y precisión, como en vehículos de alto rendimiento o industriales

Tomada de: Ziobro et al. (2015) [15]



3.5.2. *Propiedades de materiales*

Los materiales que se detallan a continuación corresponden al caucho del buje original y al poliuretano del buje a fabricar, cuyas características son de utilidad para las simulaciones computacionales.

3.5.3. *Caucho Vulcanizado*

Para el estudio se tomó las características y propiedades mecánicas del caucho de cloropeno sintético (CR), que corresponde a un material comúnmente usado en bujes de caucho revestidos con láminas de acero como refuerzo y cuyas propiedades se observan en la Tabla 4 (Esmail et al., 2020).

Tabla 7

Material para parte elástica de buje original (caucho de cloropeno sintético CR)

Propiedad	Valor	Unidad
Resistencia a la tracción	15,77	MPa
Módulo de elasticidad	1,215	MPa
Dureza	60	Shore A
Elongación máxima	320	%

Tomada de: Esmail et al. (2020) [16]

3.5.4. *Poliuretano para fabricación.*

En la Tabla 8 se detalla las propiedades mecánicas del material de poliuretano utilizado para la fabricación de los nuevos bujes.



Tabla 8

Material poliuretano para parte elástica de buje a fabricar

Propiedad	Valor	Unidad
Resistencia a la tracción	10,85	MPa
Módulo de elasticidad	8,36	MPa
Dureza	85	Shore A
Elongación máxima	164	%

Tomada de: Smooth-On et al. (2024) [18]

3.5.5. Modelos matemáticos de materiales hiperelásticos para simulación computacional

Los elastómeros, al ser materiales casi incompresibles poseen un coeficiente de Poisson de 0.5, suelen experimentar grandes deformaciones durante su uso y presentan estados de deformación complejos por lo cual los modelos de materiales hiperelásticos se emplean para describir su comportamiento mecánico. Los modelos Mooney-Rivlin son muy populares para modelar el comportamiento no lineal de materiales incompresibles ante grandes deformaciones (Lalo et al., 2018).

Existen algunos modelos matemáticos de materiales hiperelásticos que se pueden utilizar en las simulaciones computacionales, entre ellos los más utilizados son Mooney-Rivlin, Polinomial, Neo-Hookean, Yeoh y Ogden (Esmail et al., 2024).

3.5.6. Unidades para simulación

Las unidades utilizadas dentro del software durante las simulaciones corresponden a las indicadas en la Tabla 9.

**Tabla 9***Unidades utilizadas para la simulación*

Magnitud	Unidades
Masa	Kg
Tiempo	s
Longitud	mm
Fuerza	N
Esfuerzos	MPa

3.5.7. *Mallado*

La calidad de la malla se evalúa mediante el criterio Jacobiano, conocido como "Jacobian Ratio", ampliamente utilizado en análisis FEM de tipo estructural. Este método es especialmente adecuado para elementos de malla de segundo orden, como mallas sólidas y tipo shell o cáscara [1]. El Jacobian Ratio mide la desviación de un elemento respecto a su forma ideal. Por ejemplo, para cuadriláteros, se espera que sus lados sean paralelos y formen ángulos de 90° para alcanzar un valor ideal de 1. En el caso de elementos triangulares, el objetivo es que sus lados formen ángulos de 60° entre sí, logrando igualmente un valor de 1 [2].

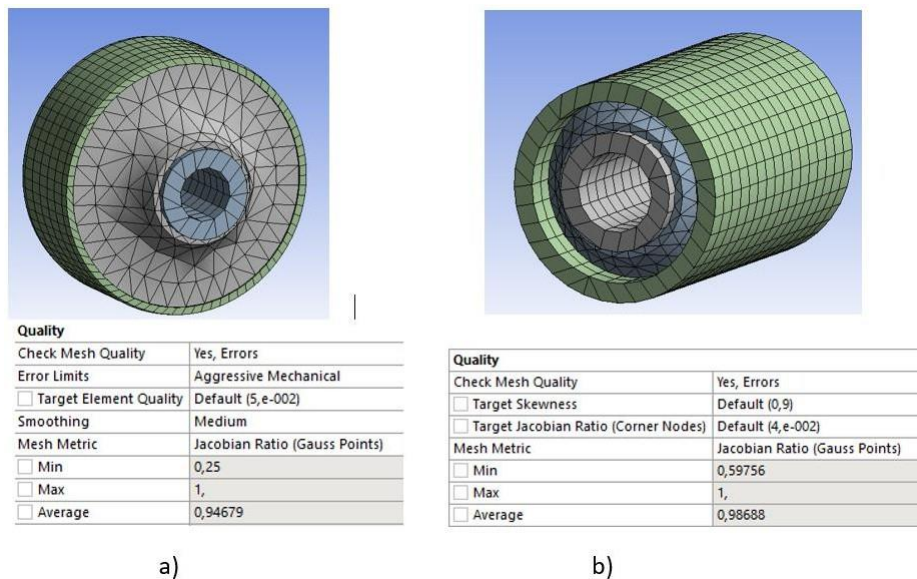
Esta métrica varía entre 1,0 y -1,0, donde un valor cercano o igual a 1,0 representa una malla perfecta. En cambio, valores cercanos o menores a 0 indican una baja calidad del elemento, lo que podría ocasionar fallos en la simulación y resultados inexactos. Para prevenir este tipo de problemas, Ansys recomienda usar elementos con un Jacobian Ratio de al menos 0,33.



En la Figura 34 se observa el mallado de los bujes de suspensión y la métrica de mallado según Jacobian Ratio. En el caso del buje grande se tiene un valor promedio de 0,94 y en el buje pequeño 0,98 lo cual indica una calidad de malla excelente para ambos casos lo cual asegura la fiabilidad de los resultados.

Figura 34

Mallado de bujes de suspensión



3.5.8. Condiciones para simulación

Los bocines o manguitos interno y externo de los bujes se definieron con el material de acero. El contacto entre los cuerpos (bocines y material elastomérico) se define como “unión global” lo que permite que todos los componentes que se tocan entre sí actúen solidarios. En la suspensión del vehículo, el bocín interno está fijado por un perno y las cargas se aplican en el bocín externo, por lo que se simuló la misma condición. El material elastomérico del buje se modeló como un material hiperelástico utilizando el modelo de Mooney-Rivlin.



Según los tres modos de deflexión de un buje automotriz, se llevaron a cabo tres conjuntos de simulaciones, uno para cada modo. En este contexto, se mantuvieron constantes el material, los contactos entre componentes y las restricciones, y variando únicamente la fuerza aplicada en cada caso. Además, se analizó el desplazamiento en los modos radial, axial y torsional para determinar la rigidez de cada uno. Esto se realizó mediante simulación computacional con FEM (método de elementos finitos) y compararla con el cálculo matemático analítico.

3.5.9. Condiciones para simulación de buje grande

Las condiciones generales de materiales, contactos y aplicación de cargas se describen a continuación, en el cual se asignó los materiales a cada uno de los componentes del buje grande.

Figura 35

Aplicación de material acero a bocines

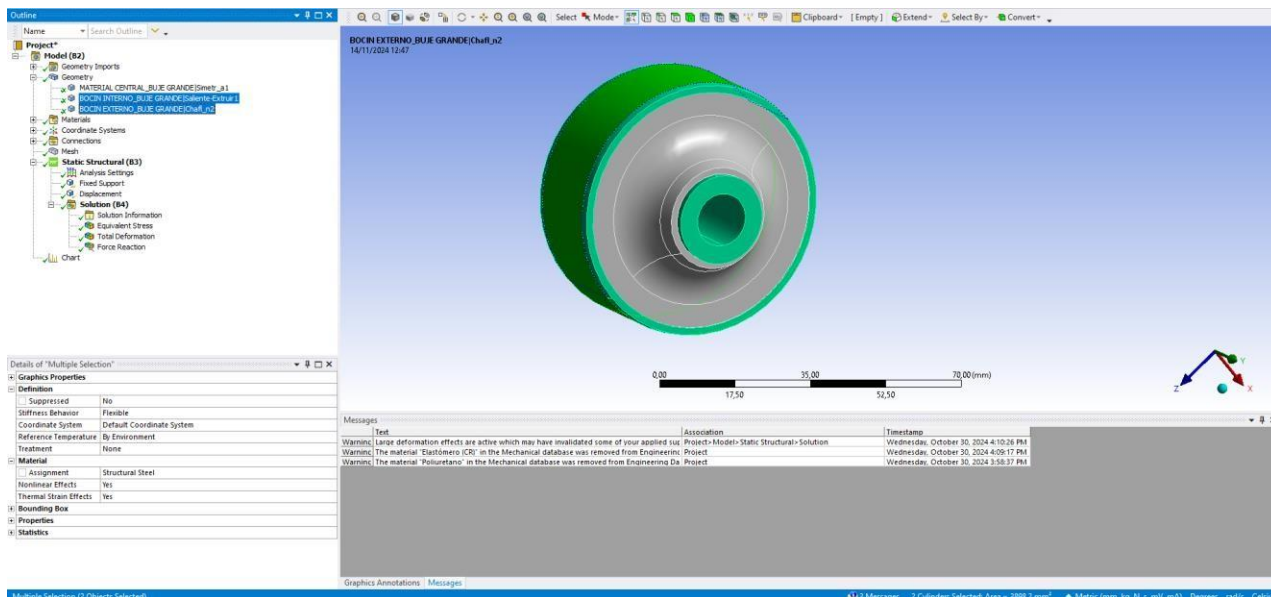




Figura 36

Aplicación de material original para el buje grande

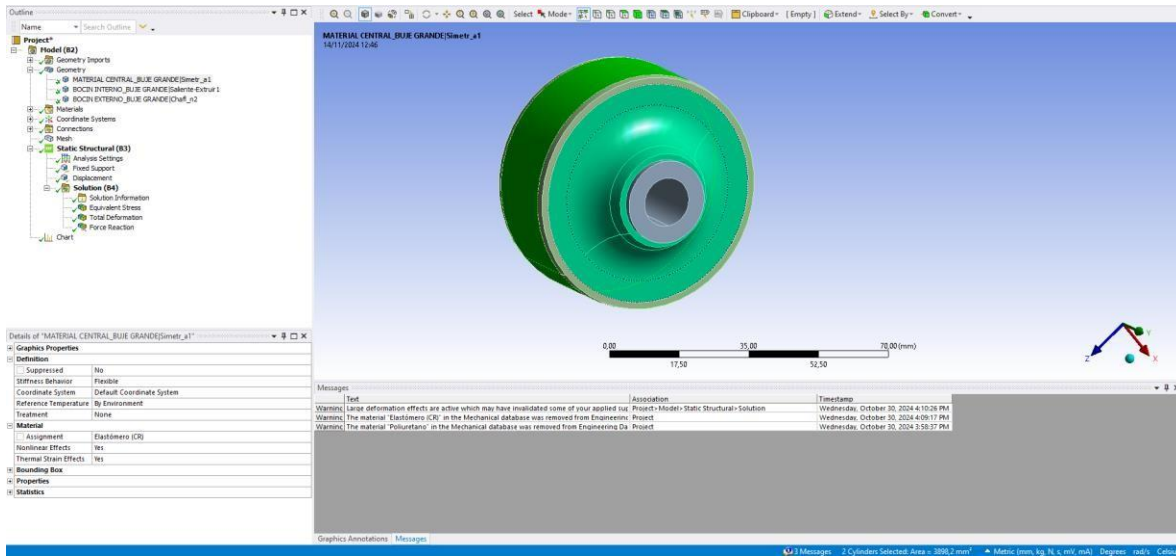
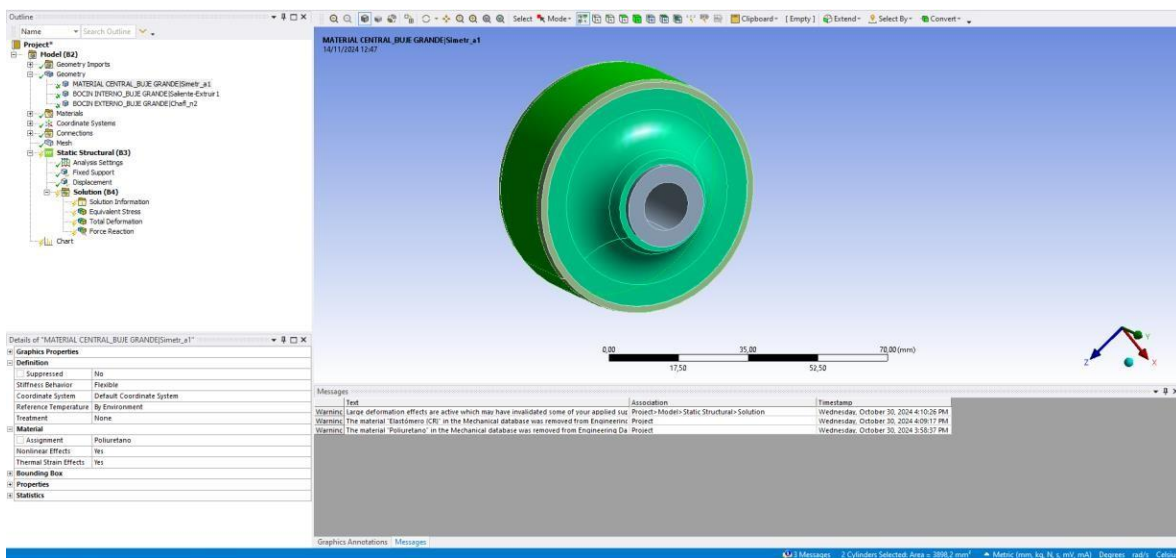


Figura 37

Aplicación de material poliuretano para el buje grande



Posteriormente de aplicar los materiales, se definió los contactos entre el bocín interno y el material del buje



Figura 38

Definición de contactos entre bocín interno y material elastómero

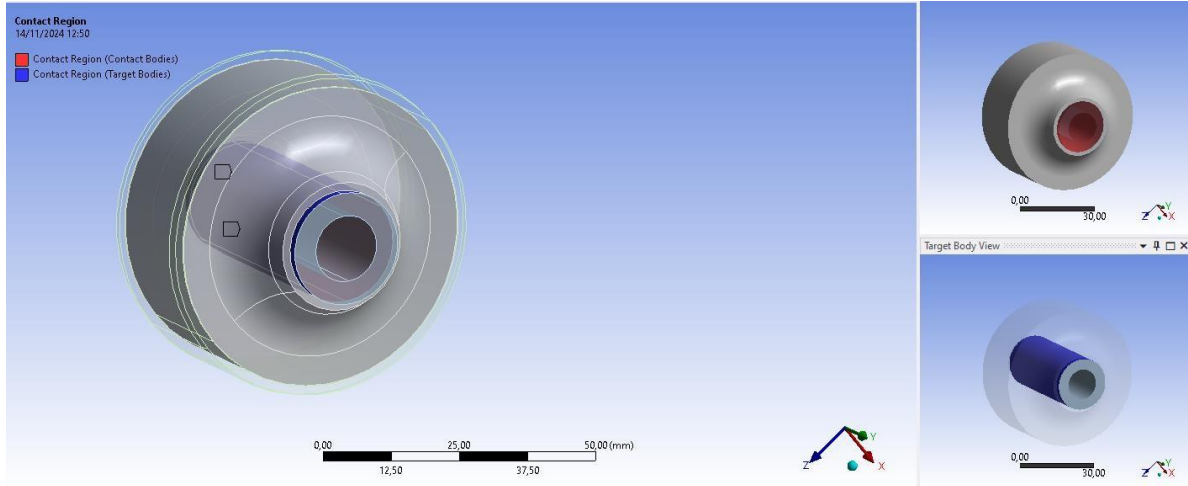
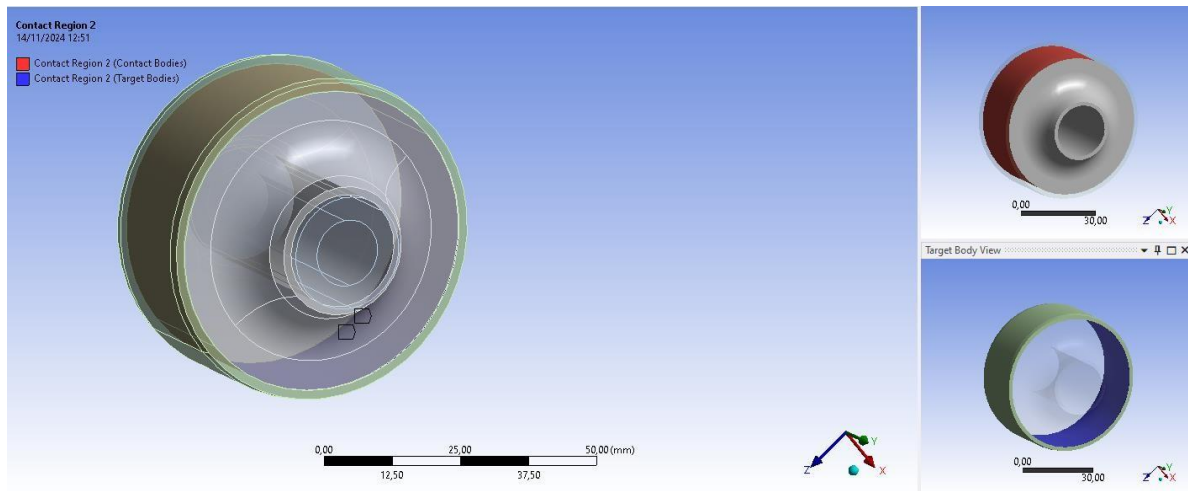


Figura 39

Definición de contactos entre bocín externo y material elastómero

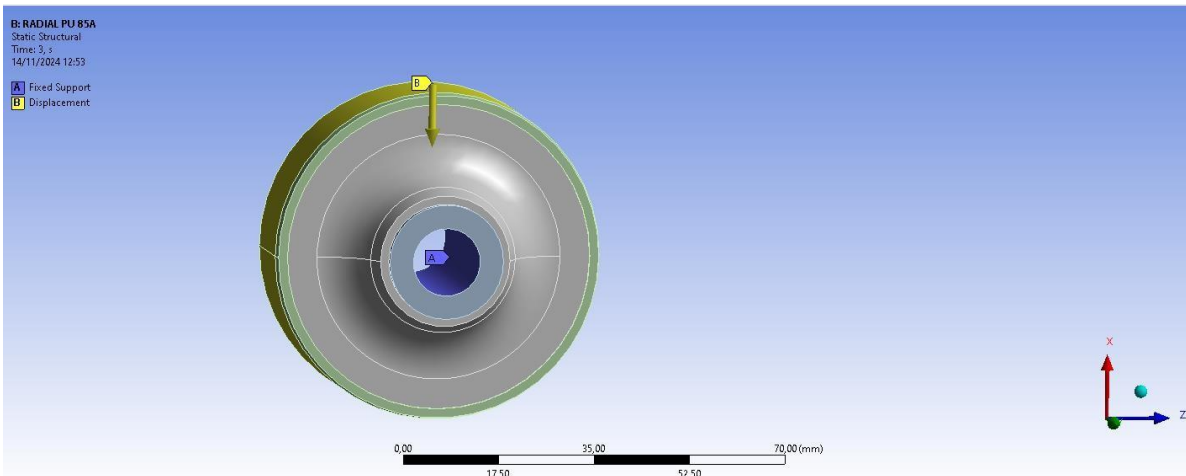


Para analizar el comportamiento radial se fijó la cara interna del bocín interior, y se aplicó el desplazamiento de $\pm 1 \text{ mm}$ en el sentido radial sobre el bocin externo.



Figura 40

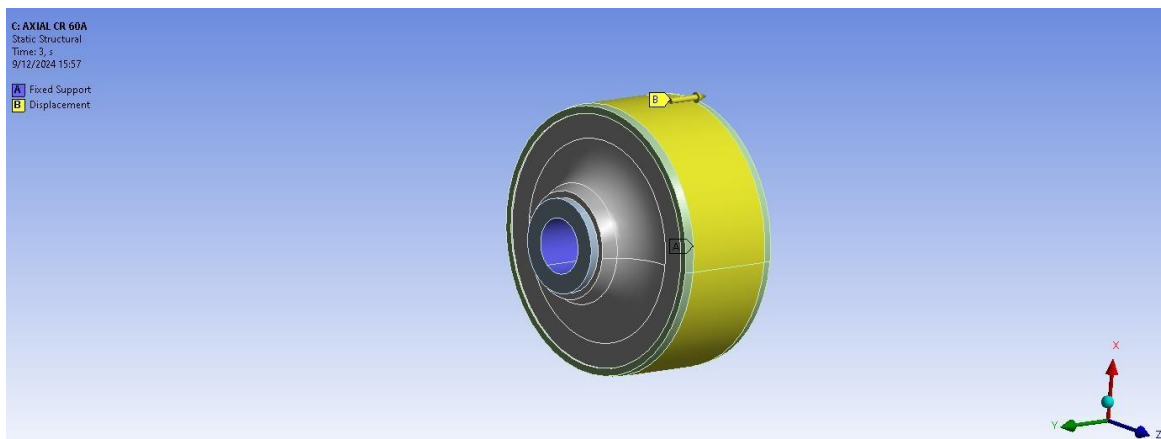
Aplicación de condiciones para el comportamiento radial



Para analizar el comportamiento axial se ubicó la condición “fijo” en el bocín interno y un desplazamiento de $\pm 1 \text{ mm}$ a lo largo del buje en el sentido axial sobre el bocin externo.

Figura 41

Aplicación de condiciones para el comportamiento axial

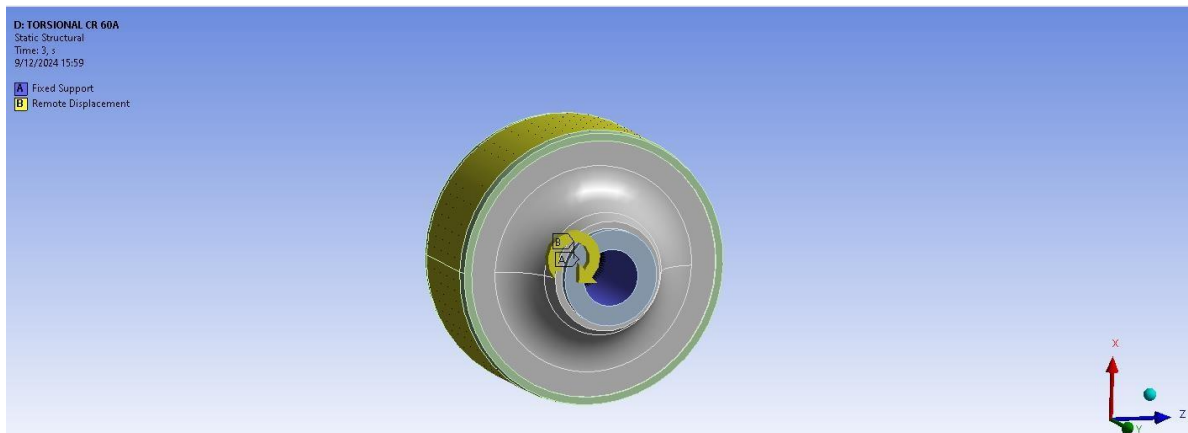




Para el análisis del comportamiento torsional también se fijó el bocín interno y se aplicó un desplazamiento angular de $\pm 5^\circ$ sobre el bocin externo.

Figura 42

Aplicación de condiciones para el comportamiento torsional



3.5.10. Condiciones para simulación de buje pequeño

Las condiciones generales de materiales, contactos y aplicación de cargas se describen a continuación, en el cual se asignaron los materiales a cada uno de los componentes del buje pequeño.

Figura 43

Aplicación de material acero a bocines



SUBDECANATO

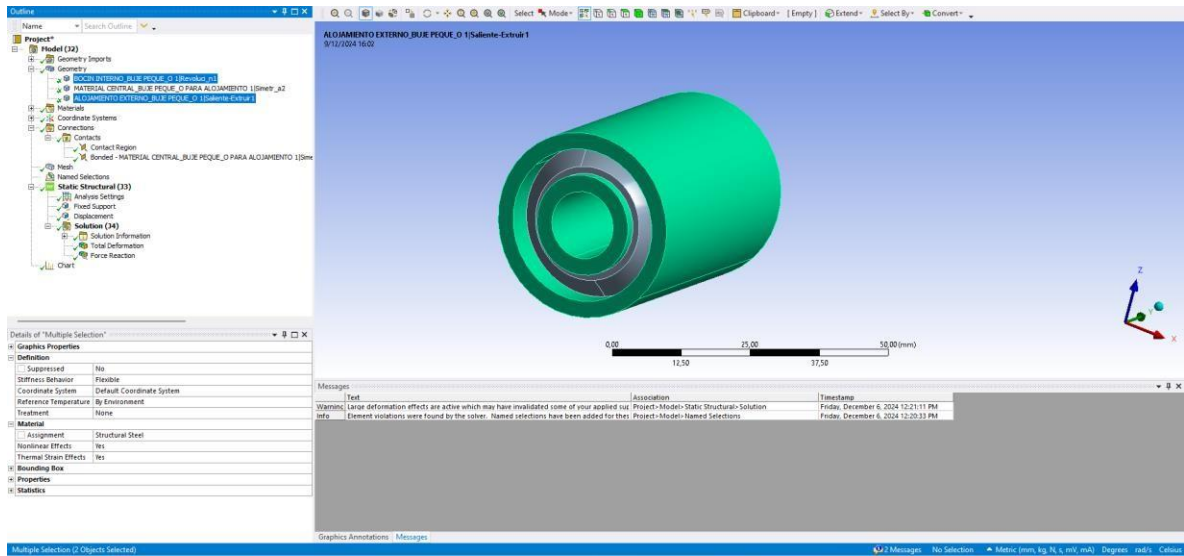


Figura 44

Aplicación de material original para el buje pequeño

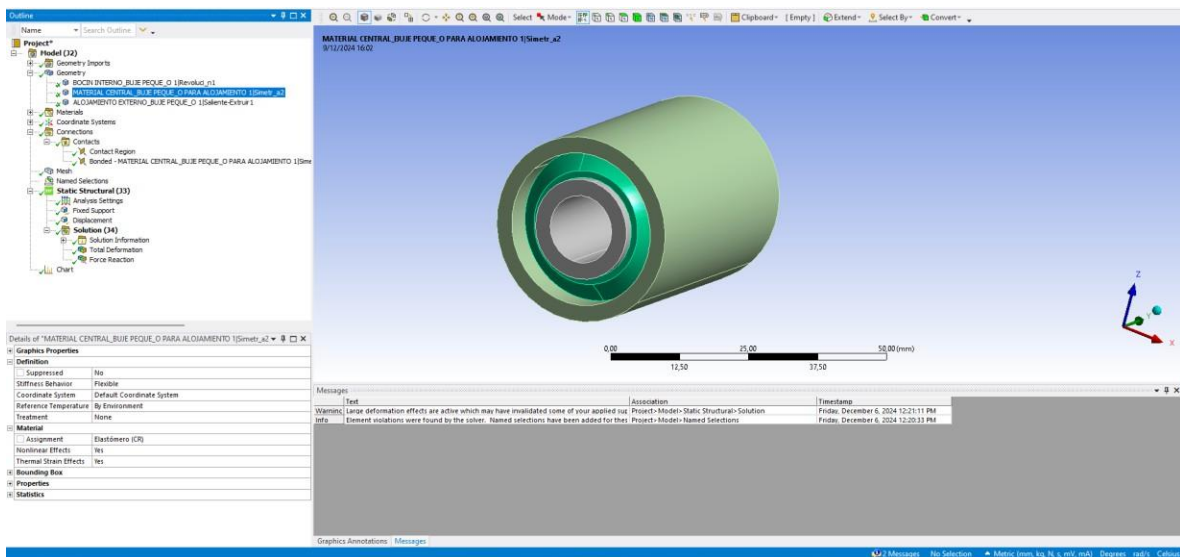
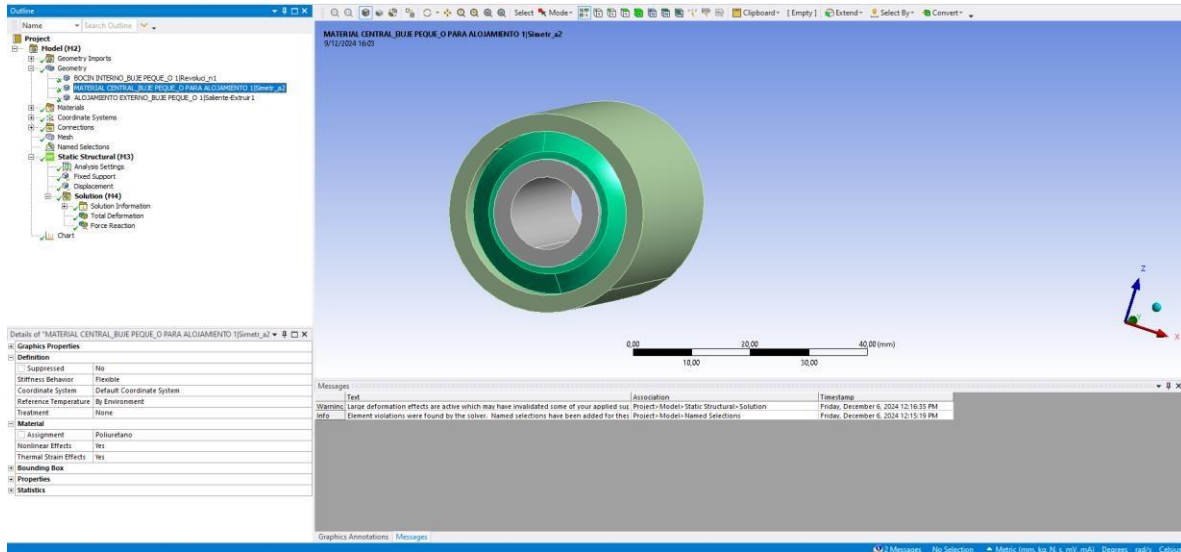


Figura 45

Aplicación de material poliuretano para el buje pequeño



SUBDECANATO



Posteriormente de aplicar los materiales, se definieron los contactos entre el bocin interno y el material del buje.

Figura 46

Definición de contactos entre bocin interno y material elastómero

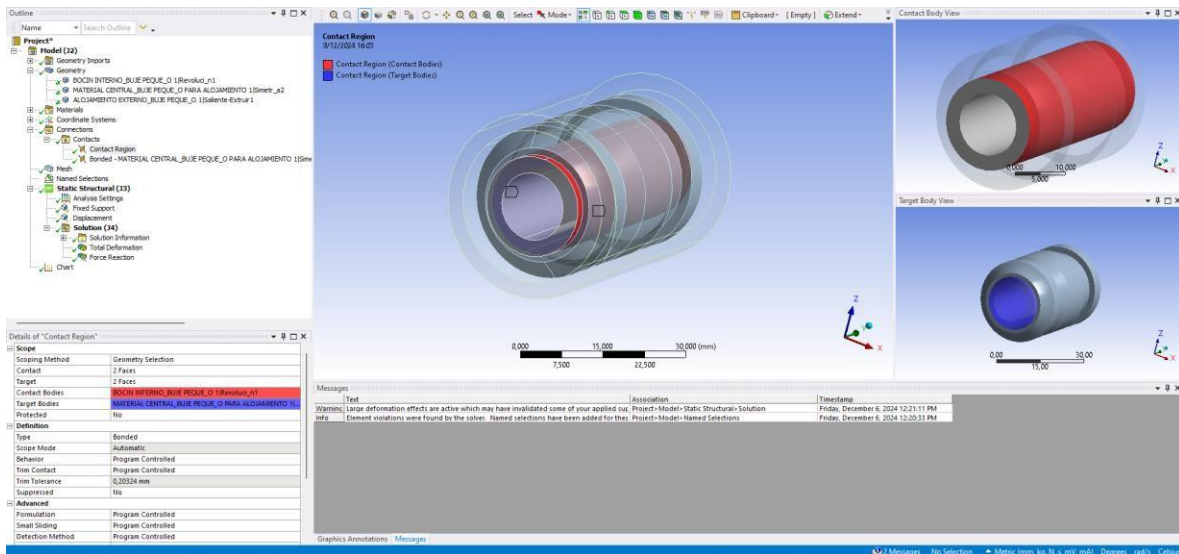
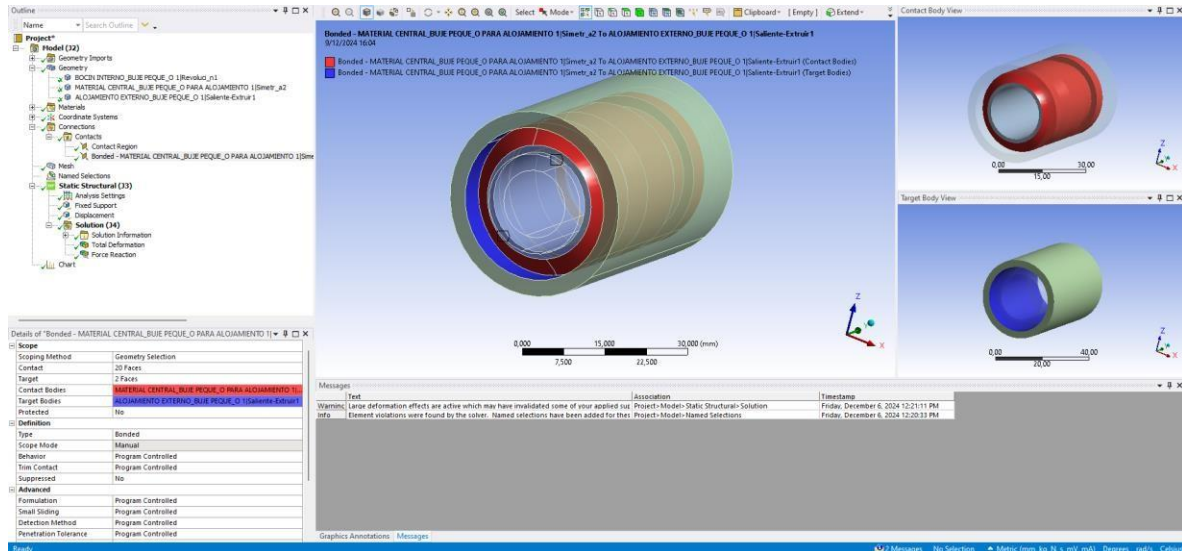




Figura 47

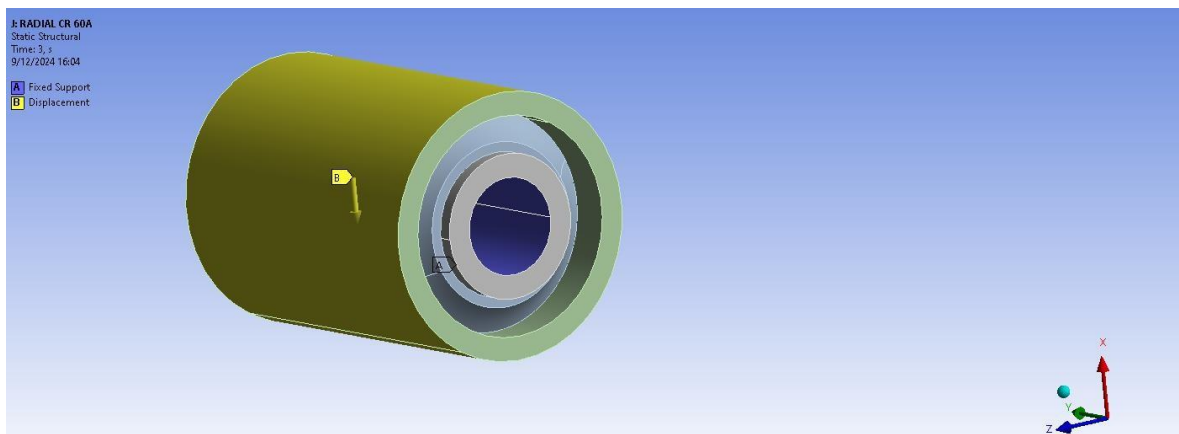
Definición de contactos entre bocín externo y material elastómero



Para analizar el comportamiento radial se fijó la cara interna del bocin interior, y se aplicó el desplazamiento de $\pm 1 \text{ mm}$ en el sentido radial sobre el bocin externo

Figura 48

Aplicación de condiciones para el comportamiento radial

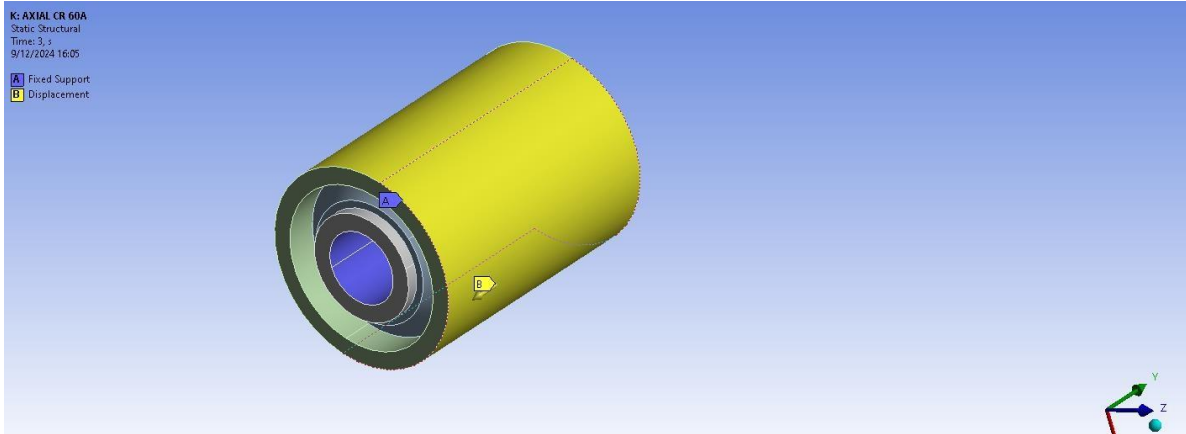


Para analizar el comportamiento axial se ubicó la condición “fijo” en el bocin interno y un desplazamiento de $\pm 1 \text{ mm}$ a lo largo del buje en el sentido axial sobre el bocin externo.



Figura 49

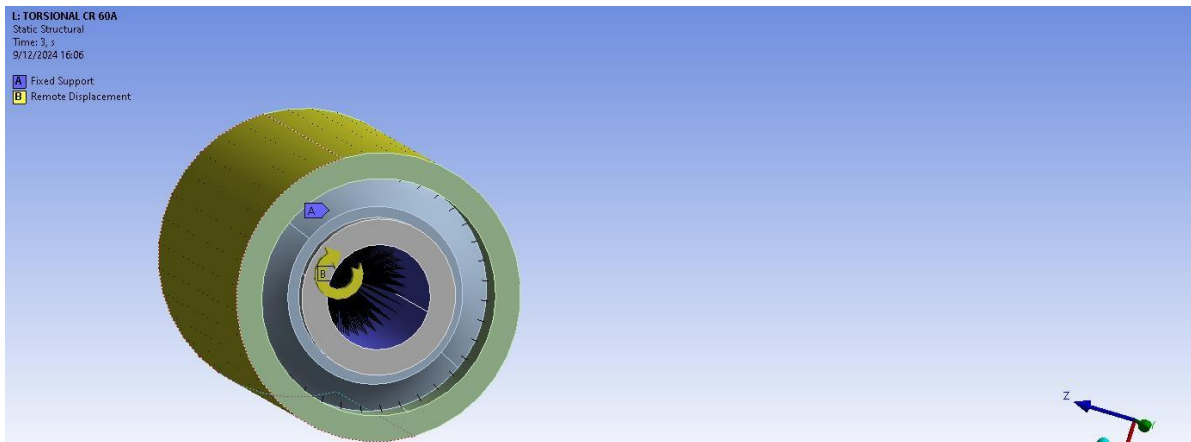
Aplicación de condiciones para el comportamiento axial



Para el análisis del comportamiento torsional también se fijó el bocín interno y se aplicó un desplazamiento angular de $\pm 5^\circ$ sobre el bocin externo.

Figura 50

Aplicación de condiciones para el comportamiento torsional



3.6. Proceso de manufacturas de bujes

3.6.1. Métodos para obtención de bujes de poliuretano

Para este trabajo se escogió el proceso de fundición líquida con el uso de moldes impresos en 3D. La mayoría de los bujes y soportes de uretano se fabrican utilizando un sistema de



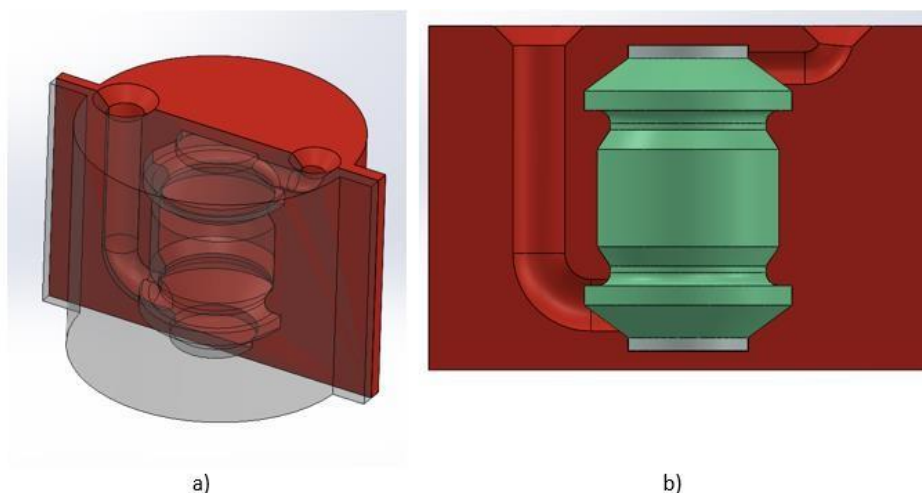
fundición líquida de dos componentes. Este sistema consiste principalmente en un polioli o prepolímero y un agente de curado. Estos componentes al mezclarse, se solidifican y forman un material rígido. La mezcla se vierte en moldes, donde se endurece y toma la forma del buje. Otras técnicas incluyen la inyección de gránulos de uretano fundido, similar al proceso de moldeo por inyección de plásticos, en el que los gránulos se derriten y se inyectan a través de una pequeña abertura en una cavidad de molde cerrado. Asimismo, otra opción es fundir una barra sólida de uretano y luego mecanizarla para darle la forma final [3].

3.6.2. Diseño de moldes

Los moldes se diseñaron en dos secciones (sección A y sección B), como se observa en la Figura 51. Esto permite la inserción de los bocines metálicos previo al llenado del poliuretano. Asimismo, esto posibilitó la extracción del buje fabricado sin la destrucción de los moldes impresos.

Figura 51

Diseño de molde para buje pequeño: a) división de secciones, b) tubos de llenado (izquierda) y ventilación (derecha)

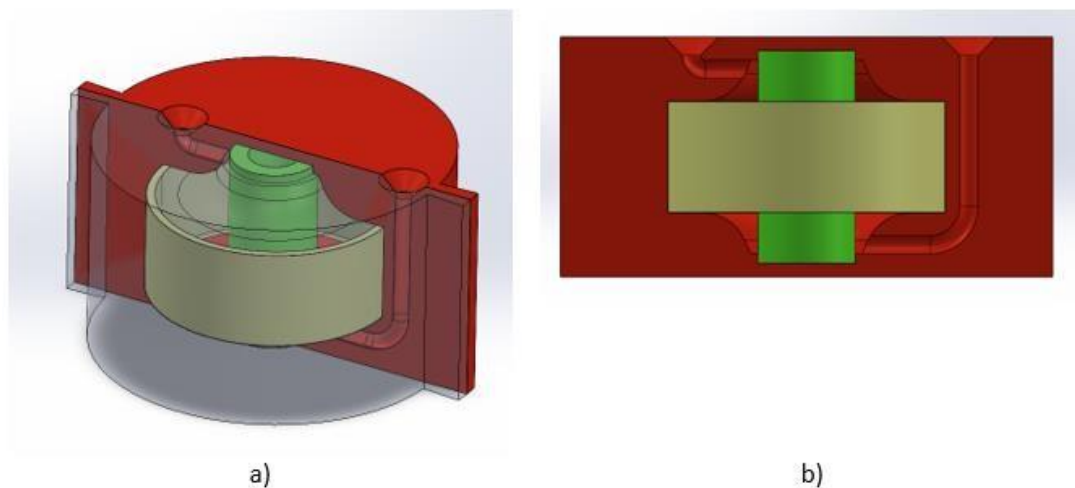




En el diseño de los moldes se consideró un tubo de llenado desde la parte inferior del buje, y un tubo de ventilación en la parte superior que permita la salida de aire y verificación del correcto llenado del poliuretano dentro del molde, según se observa en la Figura 52.

Figura 52

Diseño de molde para buje grande: a) división de secciones, b) tubos de llenado (izquierda) y ventilación (derecha)



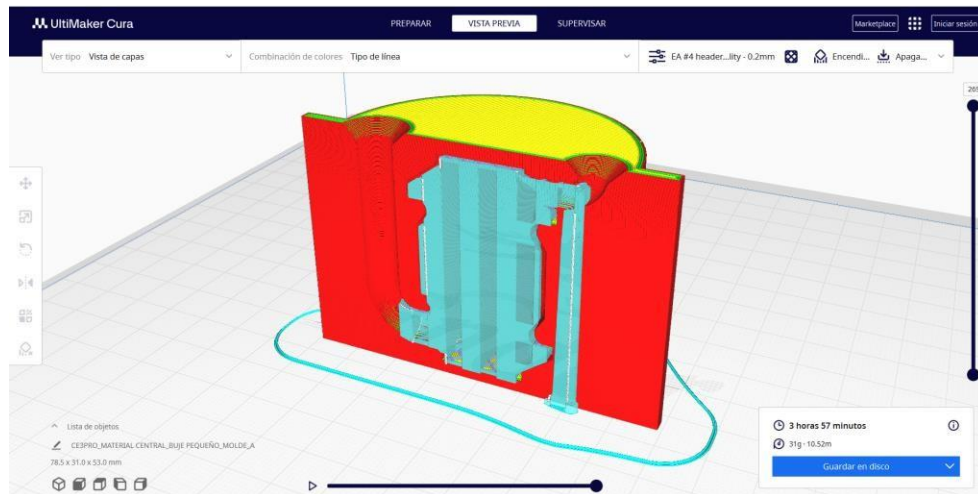
El diseño del molde para el buje grande se realizó de la misma manera que en el buje pequeño. En este contexto, se consideró que el diseño del molde para el buje grande posee un bocin externo metálico.

3.6.3. Fabricación de moldes (impresión 3D)

La fabricación de los moldes se la realizó en impresión 3D puesto que es un proceso disponible en el país, de fácil acceso y bajo costo para la elaboración de prototipos o producciones pequeñas. El material utilizado fue el PLA, material de bajo costo y uso común.

**Figura 53**

Preparación de modelo pequeño para impresión 3D

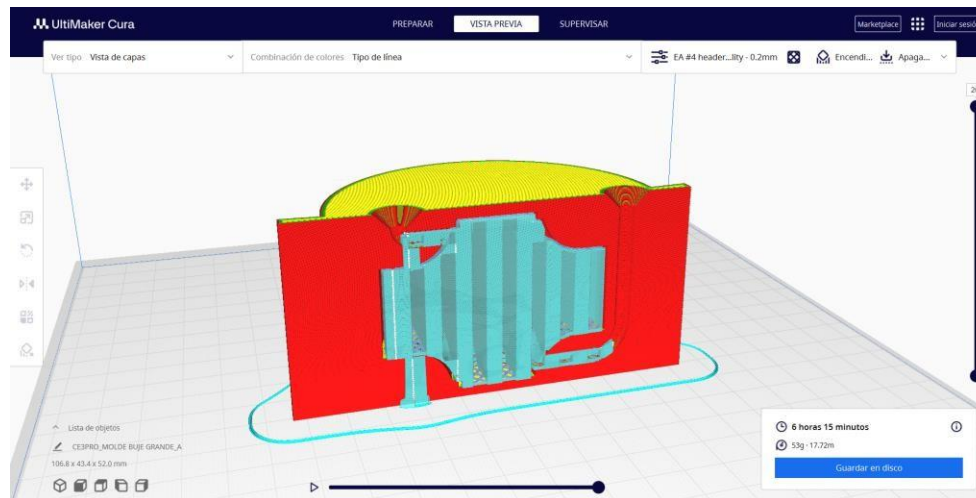


Para preparar los modelos 3D de los moldes para impresión se utilizó el software gratuito UltiMaker Cura. En este software se configuraron la temperatura y velocidad de impresión, la densidad de relleno, la altura de capa y el soporte de impresión. En la Figura 53 se observa la vista previa con la duración y cantidad de filamento requerido para la impresión de la mitad del molde pequeño.

En la Figura 54 se observa la vista previa con la duración y cantidad de filamento requerido para la impresión de la mitad del molde grande. Cada uno de los archivos (código G) preparados en el software CURA, se cargaron en la impresora 3D para imprimirlos, luego se retiró el material de soporte y con ello se insertaron los bocines metálicos para proceder con el proceso de fundición líquida de poliuretano.

**Figura 54**

Preparación de modelo grande para impresión 3D



3.6.4. Proceso de fundición líquida

El proceso de fundición líquida, se realiza la medición y mezcla de uretanos líquidos son sensibles a la humedad y absorben la humedad atmosférica, lo que podría generar burbujas en los moldes. En este contexto, las herramientas y los recipientes para mezclar deben estar limpios y ser de metal o plástico. La duración del producto se reduce drásticamente después de abrirlo. Debido a esto, se debe colocar las tapas de los envases inmediatamente después de dispensar el producto. La mezcla manual dio como resultado la obtención del poliuretano, mezclando las dos partes que conforman el producto, es decir “Parte A o polioli” y “Parte B o agente curador”.

Se recomienda realizar la mezcla considerando la proporcionalidad del 100% de parte A y 85% de parte B. Para garantizar un correcto llenado de los moldes, las proporcionalidades para el molde pequeño fueron 20 gramos de parte B por 17 gramos de parte A.

**Figura 55**

Relación de mezcla en gramos Parte A y B para llenado en el molde pequeño



Las proporcionalidades para el molde grande fueron 45 gramos de parte B por 38 gramos de parte A.

Figura 56

Relación de mezcla en gramos Parte A y B para llenado en el molde grande



Después de pesar y colocar las cantidades necesarias de las Partes A y B en el recipiente, se debe mezclar correctamente durante al menos 60 segundos. Además, se debe asegurar de remover los lados y el fondo del recipiente varias veces. A continuación, se vierte toda



SUBDECANATO

la cantidad en un recipiente nuevo y limpio y se vuelve a mezclar como se indicó anteriormente.

Figura 57

Proceso de mezclado de las dos partes durante 60 segundos antes del vertido



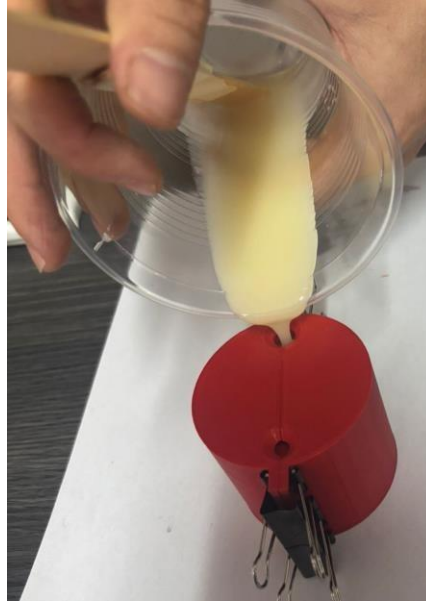
Se debe tener en cuenta que la durabilidad del material es de 4 minutos a 23 °C (73 °F).

Además, se debe considerar que la duración a temperaturas elevadas será menor y no debe llevar mucho tiempo entre la mezcla y el vertido. Aunque este producto está formulado para minimizar las burbujas de aire, la desgasificación mediante orificios de salida de aire en el molde reducirá aún más el riesgo de filtración de aire en el buje.

Para lograr buenos resultados se sugiere verter la mezcla en un único punto, de preferencia, comenzando en la parte más baja del molde. Un flujo constante y uniforme contribuirá a reducir al mínimo la presencia de aire atrapado.

**Figura 58**

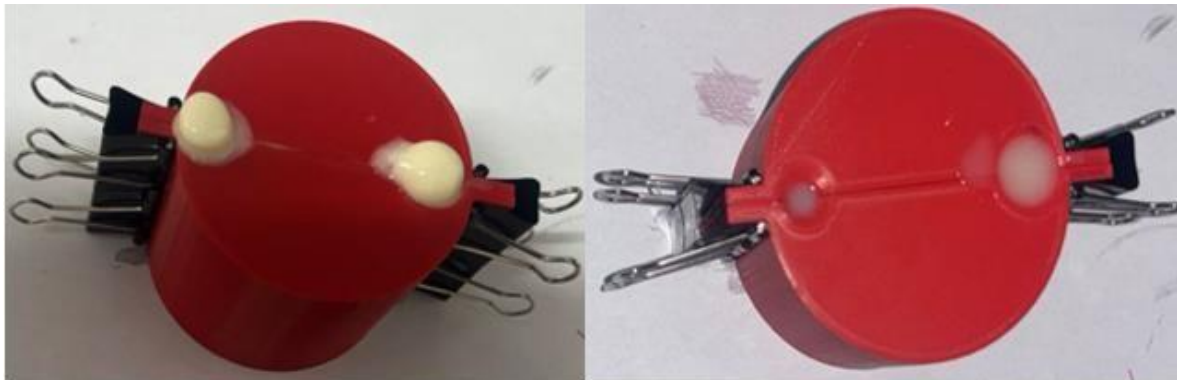
Vertido de la mezcla A y B por el orificio de llenado del molde



A medida que el material se va añadiendo, llenará progresivamente el molde, permitiendo que el aire escape a través del orificio de salida.

Figura 59

Verificación de llenado a través del orificio de salida del aire





El material colado se deja curar durante al menos 2 horas a temperatura ambiente (23 °C/73 °F) antes de desmoldarlo. No retirar los moldes a temperaturas inferiores a 18 °C/65 °F para evitar daños en los moldes. Cabe recalcar que el material alcanzará el curado completo en 48 horas a 23 °C/73 °F.



CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

En este capítulo se indican los resultados obtenidos de la simulación por elementos finitos (FEM) y del proceso de manufactura nacional. Estos resultados tienen la finalidad de evaluar el desempeño del buje automotriz y validar la coherencia entre el modelo teórico y la aplicación práctica.

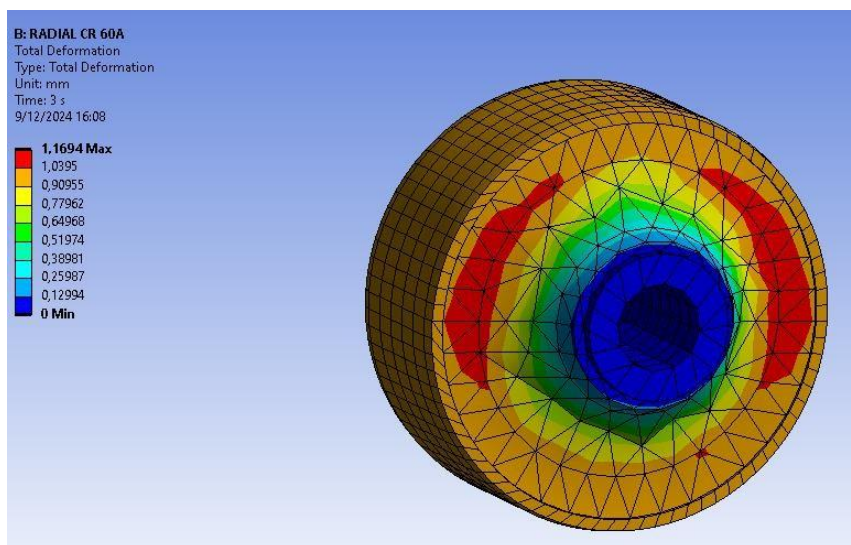
4.1. Resultados Del Proceso De Simulación: Buje Grande

4.1.1. Comportamiento radial del buje grande (Material original)

Luego de la aplicación de la carga en sentido radial, se obtienen los resultados de deformación total mostrados en la Figura 60.

Figura 60

Deformación total buje grande con material original



En la Figura 60, se puede decir que tiene una deformación máxima de 1.17 mm en la zona



externa (zona roja) en donde se obtiene una mayor deflexión, a su vez en la zona central se evidencia un desplazamiento nulo, manteniendo una deformación baja. Además, el buje en la mayoría de su estructura tiene deformaciones intermedias (zona amarilla) aproximadamente en 0,91 mm, donde se obtiene un comportamiento radial aceptable.

En la Tabla 10 se observan los resultados obtenidos del método de elementos finitos de fuerza respecto al desplazamiento durante la aplicación de carga radial, con ello se determina la rigidez del buje grande con material original.

Tabla 10

Resultados FEM de rigidez radial del buje grande con material original

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Rigidez FEM (N/mm)
0,6	293,7	489,5
0,8	405,9	507,4
-0,1	-48,8	487,7
-1	-505,7	505,7

4.1.2. Comportamiento radial del buje grande (Poliuretano)

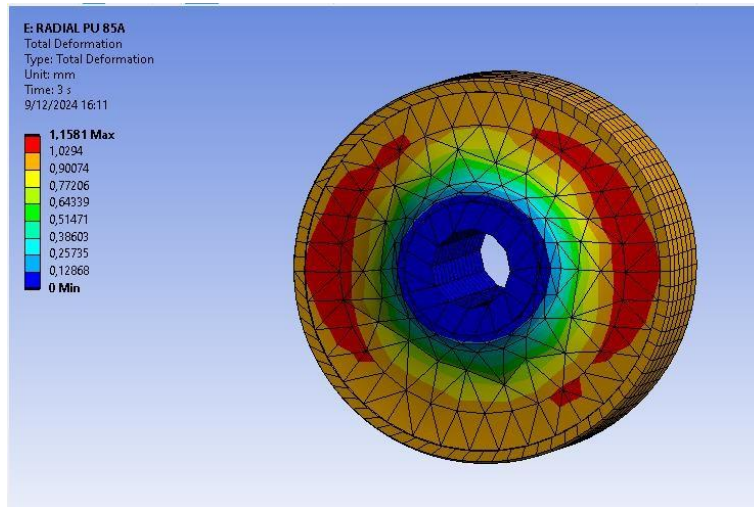
Luego de la aplicación de la carga en sentido radial se obtienen los resultados de deformación total, mostrados en la Figura 61.

Figura 61

Deformación total buje grande con material poliuretano



SUBDECANATO



En la Tabla 11 se observan los resultados obtenidos del método de elementos finitos de fuerza respecto al desplazamiento durante la aplicación de carga radial, con ello se determina la rigidez del buje grande con material poliuretano.

Tabla 11

Resultados FEM de rigidez radial del buje grande con material poliuretano

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Rigidez FEM (N/mm)
0,6	681,7	1136,1
0,8	948,3	1185,3
-0,1	-112,5	1124,9
-1	-1192,7	1192,7

4.1.3. Comportamiento axial del buje grande (Material original)

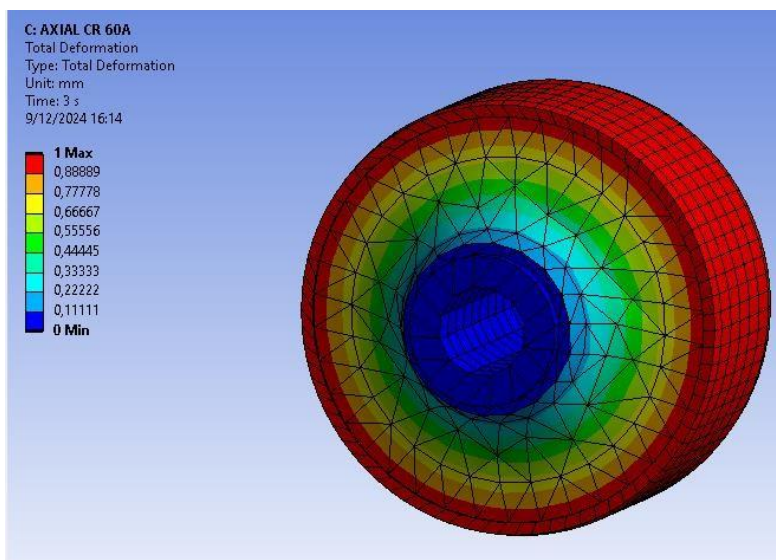
Luego de la aplicación de la carga en sentido axial se obtienen los resultados de deformación total, mostrados en la Figura 62.

Figura 62



SUBDECANATO

Deformación total buje grande con material original



En la Tabla 12 se observan los resultados obtenidos del método de elementos finitos de fuerza respecto al desplazamiento durante la aplicación de carga axial, con ello se determina la rigidez del buje grande con material original.

Tabla 12

Resultados FEM de rigidez axial del buje grande con material original

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Rigidez FEM (N/mm)
0,6	81,4	135,7
0,8	114,1	142,6
-0,1	-14,5	144,8
-1,0	-140,2	140,2

4.1.4. Comportamiento axial del buje grande (Poliuretano)

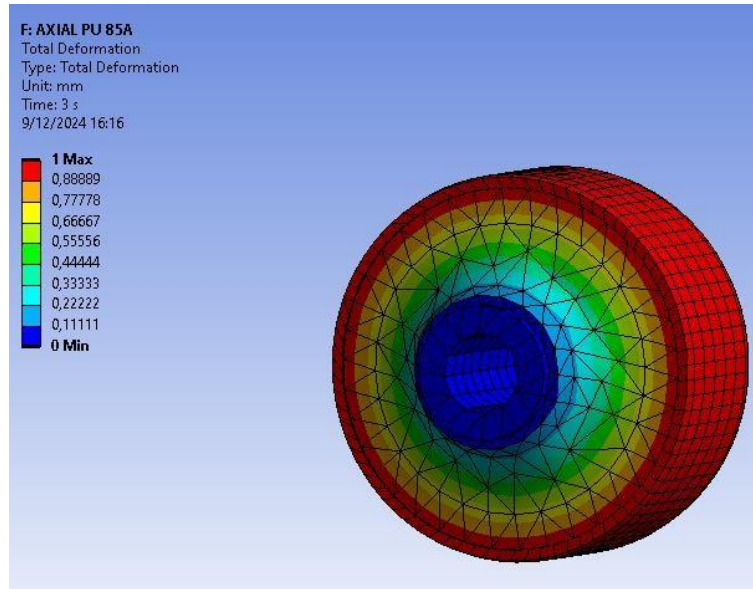
Luego de la aplicación de la carga en sentido axial se obtienen los resultados de deformación total, mostrados en la Figura 63.

Figura 63



SUBDECANATO

Deformación total buje grande con material poliuretano



En la Tabla 13 se observan los resultados obtenidos del método de elementos finitos de fuerza respecto al desplazamiento durante la aplicación de carga axial, con ello se determina la rigidez del buje grande con material poliuretano.

Tabla 13

Resultados FEM de rigidez axial del buje grande con material poliuretano

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Rigidez FEM (N/mm)
0,6	187,7	312,9
0,8	263,1	328,9
-0,1	-33,4	333,9
-1,0	-323,2	323,2

4.1.5. Comportamiento torsional del buje grande (Material original)

Luego de la aplicación de la carga en sentido torsional se obtienen los resultados de

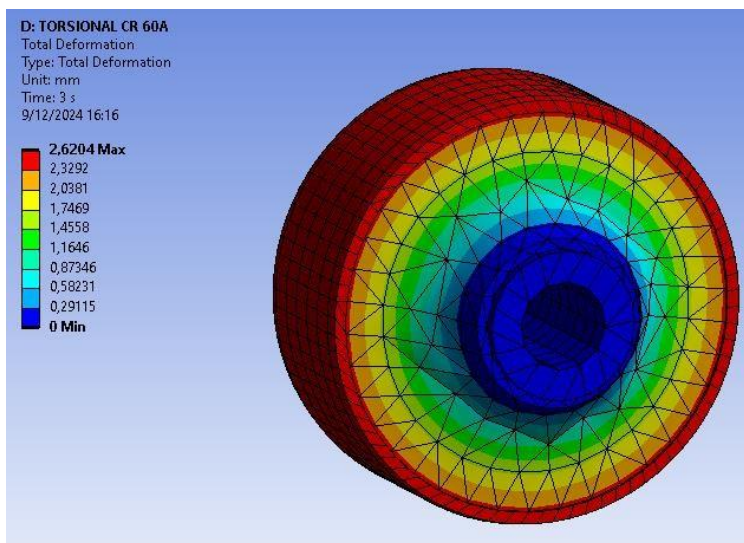


SUBDECANATO

deformación total, mostrados en la Figura 64.

Figura 64

Deformación total buje grande con material original



En la Tabla 14 se observan los resultados obtenidos del método de elementos finitos de fuerza respecto al desplazamiento durante la aplicación de carga torsional, con ello se determina la rigidez del buje grande con material original.

Tabla 14

Resultados FEM de rigidez torsional del buje grande con material original

Desplazamiento angular (deg)	Momento (N.mm)	Rigidez FEM (N.mm/deg)
3,0	1941,1	647,0
4,0	2799,5	699,9
-0,5	-348,3	696,5
-5,0	-3323,8	664,8

4.1.6. Comportamiento torsional del buje grande (Poliuretano)

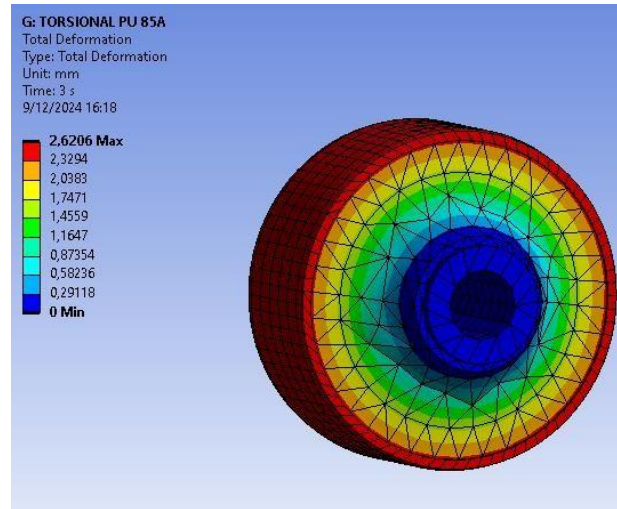


SUBDECANATO

Luego de la aplicación de la carga en sentido torsional se obtienen los resultados de deformación total, mostrados en la Figura 65.

Figura 65

Deformación total buje grande con material poliuretano



En la Tabla 15 se observan los resultados obtenidos del método de elementos finitos de fuerza respecto al desplazamiento durante la aplicación de carga torsional, con ello se determina la rigidez del buje grande con material poliuretano.

Tabla 15

Resultados FEM de rigidez torsional del buje grande con material poliuretano

Desplazamiento angular (deg)	Momento (N.mm)	Rigidez FEM (N.mm/deg)
3,0	4480,4	1493,5
4,0	6484,9	1621,2
-0,5	-802,1	1604,1
-5,0	-7670,0	1534,0

4.2. Resultados Del Proceso De Simulación: Buje Pequeño



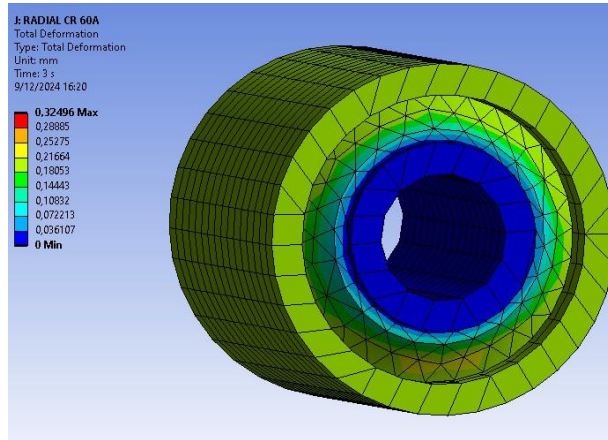
SUBDECANATO

4.2.1. Comportamiento radial del buje pequeño (Material original)

Luego de la aplicación de la carga en sentido radial se obtienen los resultados de deformación total, mostrados en la Figura 66.

Figura 66

Deformación total buje pequeño con material original



En la Tabla 16 se observan los resultados obtenidos del método de elementos finitos de fuerza respecto al desplazamiento durante la aplicación de carga radial, con ello se determina la rigidez del buje pequeño con material original.

Tabla 16

Resultados FEM de rigidez radial del buje pequeño con material original

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Rigidez FEM (N/mm)
0,2	414,6	2591,4
0,8	1922,4	2403,0
-0,2	-554,5	2772,5
-1,0	-2377,8	2377,8

4.2.2. Comportamiento radial del buje pequeño (Poliuretano)

Luego de la aplicación de la carga en sentido radial se obtienen los resultados de

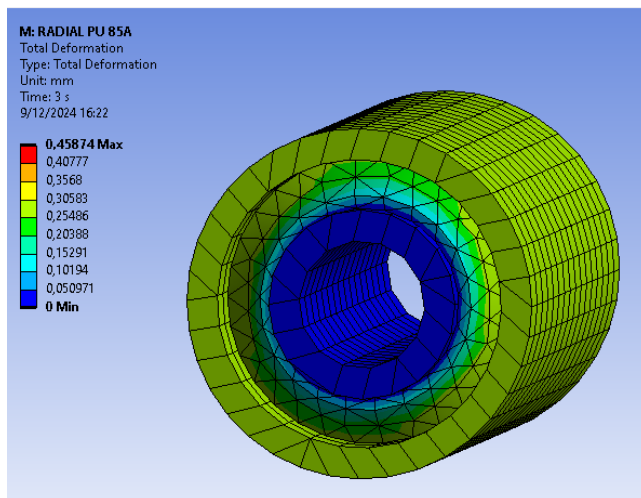


SUBDECANATO

deformación total, mostrados en la Figura 67.

Figura 67

Deformación total buje pequeño con material poliuretano



En la Tabla 17 se observan los resultados obtenidos del método de elementos finitos de fuerza respecto al desplazamiento durante la aplicación de carga radial, con ello se determina la rigidez del buje pequeño con material poliuretano.

Tabla 17

Resultados FEM de rigidez radial del buje pequeño con material poliuretano

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Rigidez FEM (N/mm)
0,2	1393,7	6700,5
0,8	4973,4	6216,8
-0,3	-1879,8	7230,0
-1,0	-5944,4	5944,4

4.2.3. Comportamiento axial del buje pequeño (Material original)

Luego de la aplicación de la carga en sentido axial se obtienen los resultados de

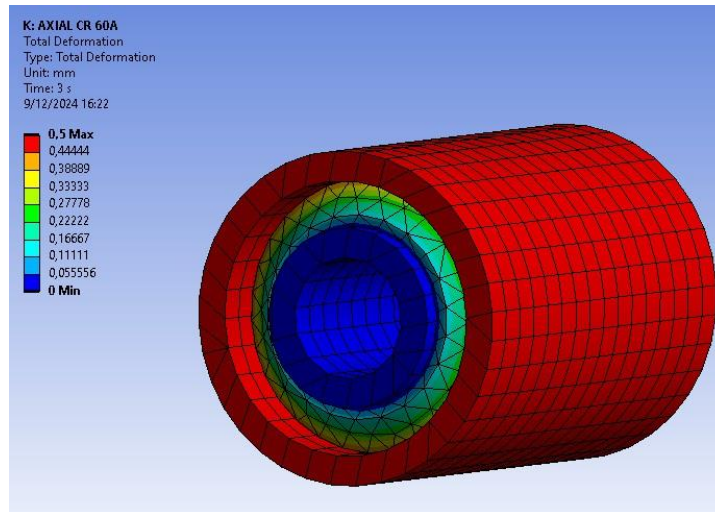


SUBDECANATO

deformación total, mostrados en la Figura 68.

Figura 68

Deformación total buje pequeño con material original



En la Tabla 18 se observan los resultados obtenidos del método de elementos finitos de fuerza respecto al desplazamiento durante la aplicación de carga axial, con ello se determina la rigidez del buje pequeño con material original.

Tabla 18

Resultados FEM de rigidez axial del buje pequeño con material original

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Rigidez FEM (N/mm)
0,2	47,2	302,6
0,2	74,3	357,4
-0,3	-85,4	328,6
-1,0	-340,9	340,9

4.2.4. Comportamiento axial del buje pequeño (Poliuretano)

Luego de la aplicación de la carga en sentido axial se obtienen los resultados de

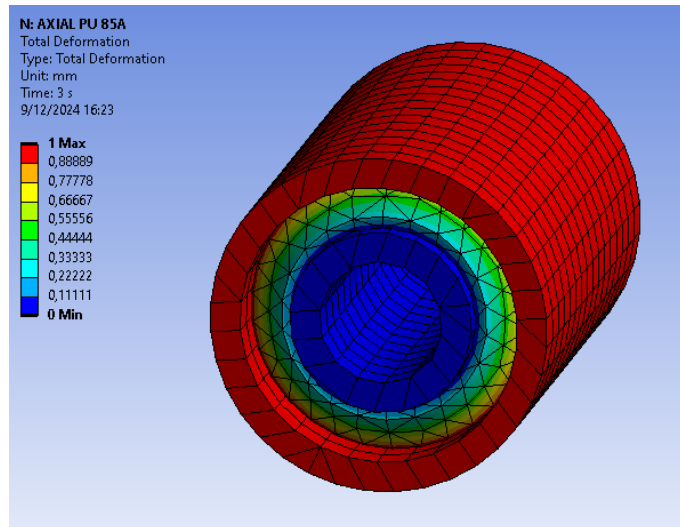


SUBDECANATO

deformación total, mostrados en la Figura 69.

Figura 69

Deformación total buje pequeño con material poliuretano



En la Tabla 19 se observan los resultados obtenidos del método de elementos finitos de fuerza respecto al desplazamiento durante la aplicación de carga axial, con ello se determina la rigidez del buje pequeño con material poliuretano.

Tabla 19

Resultados FEM de rigidez axial del buje pequeño con material poliuretano

Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	Rigidez FEM (N/mm)
0,6	510,2	850,3
0,8	732,6	915,7
-0,1	-89,5	895,2
-1,0	-888,5	888,5

4.2.5. Comportamiento torsional del buje pequeño (Material original)

Luego de la aplicación de la carga en sentido torsional se obtienen los resultados de

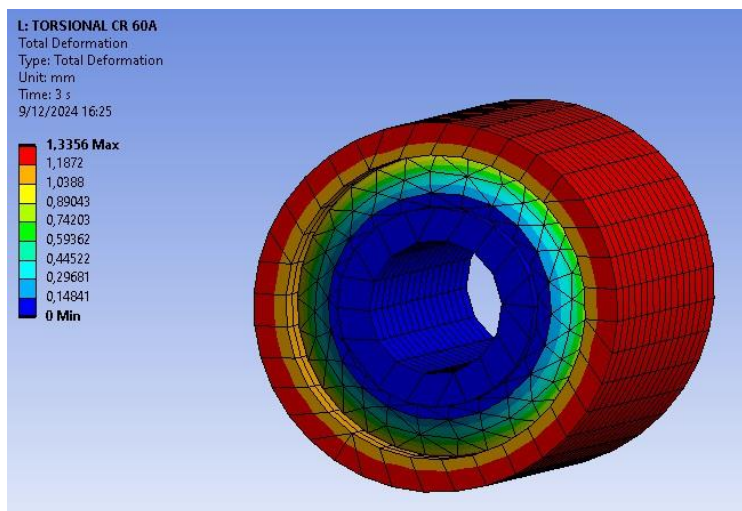


SUBDECANATO

deformación total, mostrados en la Figura 70.

Figura 70

Deformación total buje pequeño con material original



En la Tabla 20 se observan los resultados obtenidos del método de elementos finitos de fuerza respecto al desplazamiento durante la aplicación de carga torsional, con ello se determina la rigidez del buje pequeño con material original.

Tabla 20

Resultados FEM de rigidez torsional del buje pequeño con material original

Desplazamiento angular (deg)	Momento (N.mm)	Rigidez FEM (N.mm/deg)
3,1	2591,7	835,0
3,6	2974,8	826,3
-0,9	-724,3	781,2
-4,5	-3743,1	831,8

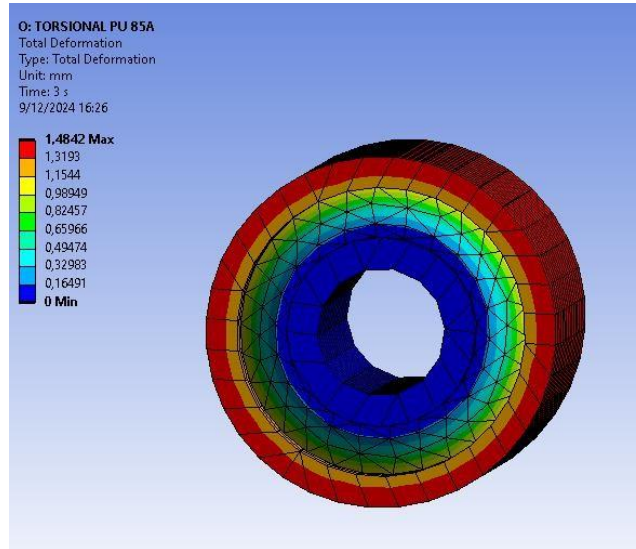
4.2.6. Comportamiento torsional del buje pequeño (Poliuretano)

Luego de la aplicación de la carga en sentido torsional se obtienen los resultados de deformación total, mostrados en la Figura 71.



Figura 71

Deformación total buje pequeño con material poliuretano



En la Tabla 21 se observan los resultados obtenidos del método de elementos finitos de fuerza respecto al desplazamiento durante la aplicación de carga torsional, con ello se determina la rigidez del buje pequeño con material poliuretano.

Tabla 21

Resultados FEM de rigidez torsional del buje pequeño con material poliuretano

Desplazamiento angular (deg)	Momento (N.mm)	Rigidez FEM (N.mm/deg)
3,0	5058,0	1686,0
4,0	7706,5	1926,6
-0,5	-943,1	1886,2
-5,0	-8943,1	1788,6



4.3. Análisis de resultados para el buje grande

4.3.1. Rigidez radial

Se determinó el promedio de rigidez radial con material original del proceso FEM de 497,6 N/mm. Respecto al valor calculado analíticamente 544,8 N/mm, representa una diferencia de 8,7% en el proceso de simulación. Por otro lado, para el poliuretano se observa una rigidez de 1159,8 N/mm y 1277,3 N/mm para el valor simulado y calculado respectivamente. Lo antes mencionado, representa una diferencia de 9,2%. Se evidencia que el uso de poliuretano incrementa la rigidez radial notablemente.

Tabla 22

Comparación de rigidez radial buje grande

Material	Promedio Rigidez FEM (N/mm)	Rigidez Cálculo (N/mm)	Diferencia (%)
Original	497,6	544,8	8,7
Poliuretano	1159,8	1277,3	9,2

4.3.2. Rigidez axial

Se determinó el promedio de rigidez axial con material original del proceso FEM de 140,8 N/mm. Respecto al valor calculado analíticamente de 138,4 N/mm, representa una diferencia de 1,7 % en el proceso de simulación. Por otro lado, para el poliuretano se observa una rigidez de 324,7 N/mm y 324,4 N/mm, para el valor simulado y calculado respectivamente. Lo antes mencionado, representa una diferencia de 0,1%. Se evidencia que el uso de poliuretano incrementa la rigidez axial notablemente.

**Tabla 23***Comparación de rigidez axial buje grande*

Material	Promedio Rigidez FEM (N/mm)	Rigidez Cálculo (N/mm)	Error (%)
Original	140,8	138,4	1,7%
Poliuretano	324,7	324,4	0,1%

4.3.3. Rigidez torsional

Se determinó el promedio de rigidez torsional con material original del proceso FEM de 677,1 N.mm/deg. Respecto al valor calculado analíticamente de 607,1 N.mm/deg, representa una diferencia de 11,5 % en el proceso de simulación. Por otro lado, para el poliuretano se tiene una rigidez de 1563,2 N.mm/deg y 1423,5 N.mm/deg, para el valor simulado y calculado respectivamente. Lo antes mencionado, representa una diferencia de 9,8%. Se evidencia que el uso de poliuretano incrementa la rigidez torsional notablemente.

Tabla 24*Comparación de rigidez torsional buje grande*

Material	Promedio Rigidez FEM (N.mm/deg)	Rigidez Cálculo (N.mm/deg)	Error (%)
Original	677,1	607,1	11,5%
Poliuretano	1563,2	1423,5	9,8%



4.4. Análisis de resultados para el buje pequeño

4.4.1. Rigidez radial

Se determinó el promedio de rigidez radial con material original del proceso FEM de 2389,6 N/mm. Respecto al valor calculado analíticamente de 2529,1 N/mm, representa una diferencia de 5,5% en el proceso de simulación. Por otro lado, para el poliuretano se tiene una rigidez de 5929,3 N/mm y 6080,6 N/mm, para el valor calculado y simulado respectivamente. Lo antes mencionado, representa una diferencia de 2,6%. Se evidencia que el uso de poliuretano incrementa la rigidez radial notablemente.

Tabla 25

Comparación de rigidez radial buje pequeño

Material	Promedio Rigidez FEM	Rigidez Cálculo	Error (%)
	(N/mm)	(N/mm)	
Original	2389,6	2529,1	5,5%
Poliuretano	6080,6	5929,3	2,6%

4.4.2. Rigidez axial

Se determinó el promedio de rigidez axial con material original del proceso FEM de 340,8 N/mm. Respecto al valor calculado analíticamente de 337,2 N/mm, representa una diferencia de 1,1 % en el proceso de simulación. Por otro lado, para el poliuretano se tiene una rigidez de 887,4 N/mm y 790,6N/mm, para el valor simulado y calculado respectivamente. Lo antes mencionado representa una diferencia de 12,2%. Se evidencia que el uso de poliuretano incrementa la rigidez axial notablemente.

**Tabla 26***Comparación de rigidez axial buje pequeño*

Material	Promedio Rigidez FEM (N/mm)	Rigidez Cálculo (N/mm)	Error (%)
Original	340,8	337,2	1,1%
Poliuretano	887,4	790,6	12,2%

4.4.3. Rigidez torsional

Se determinó el promedio de rigidez torsional con material original del proceso FEM de 818,6 N.mm/deg. Respecto al valor calculado analíticamente de 823,4 N.mm/deg, representa una diferencia de 0,6% en el proceso de simulación. Por otro lado, para el poliuretano se tiene una rigidez de 1821,9 N.mm/deg y 1929,4 N.mm/deg, para el valor simulado y calculado respectivamente. Lo antes mencionado, representa una diferencia de 5,6%. Se evidencia que el uso de poliuretano incrementa la rigidez torsional notablemente.

Tabla 27*Comparación de rigidez torsional buje pequeño*

Material	Promedio Rigidez FEM (N.mm/deg)	Rigidez Cálculo (N.mm/deg)	Error (%)
Original	818,6	823,4	0,6%
Poliuretano	1821,9	1929,4	5,6%



SUBDECANATO

4.5. Resultados de fabricación

4.5.1. Moldes impresos

La obtención de los moldes se realizó bajo la técnica de manufactura aditiva usando la impresora Creality Ender 3 a partir de material PLA. Este filamento se considera adecuado ya que al ser elementos que funcionarán sólo de moldes, no van a estar sometido a mayores esfuerzos. El modelo en formato STL se procesó en el software SolidWorks y se generaron 205 y 260 capas de 0,2 mm para el buje pequeño y grande respectivamente, como se muestra en la Figura 72.

Adicionalmente, se puede mencionar que los moldes impresos presentan la “sección A” o división de secciones y la “sección B” que corresponde a los orificios de vertido del poliuretano y al orificio de salida de aire del sistema interior. A continuación, se completó toda la forma del prototipo junto con los insertos de acero fabricados anteriormente. Los moldes terminados se muestran en las siguientes figuras 72 y 73.

Figura 72

Molde pequeño impreso en PLA A) molde buje pequeño B) molde para relleno

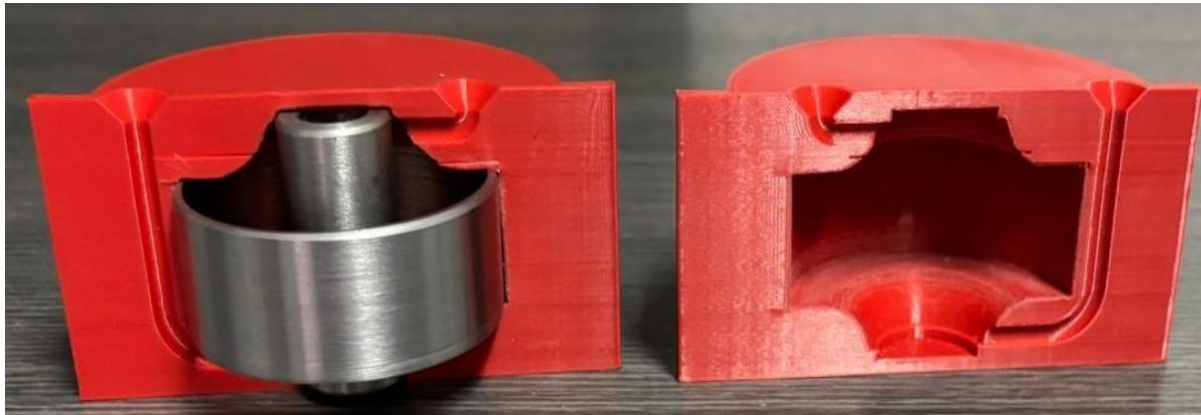
**A****B**



SUBDECANATO

Figura 73

Molde pequeño impreso parte A y B

**A****B****4.5.2. Bujes fabricados**

El buje completamente curado es resistente, duradero y funcionará si se usa y almacena correctamente. La durabilidad física del caucho depende de cómo lo utilice el usuario. En la Figura 75 se pueden apreciar las geometrías y detalles de los bujes pequeño y grande con características muy similares a los bujes originales.

Figura 74

Buje pequeño y grande a base de uretano



Buje pequeño

Buje Grande

**SUBDECANATO****4.6. ANÁLISIS DE ASPECTOS FÍSICOS**

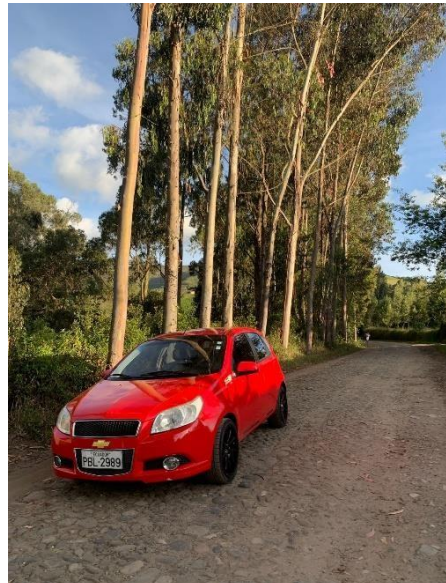
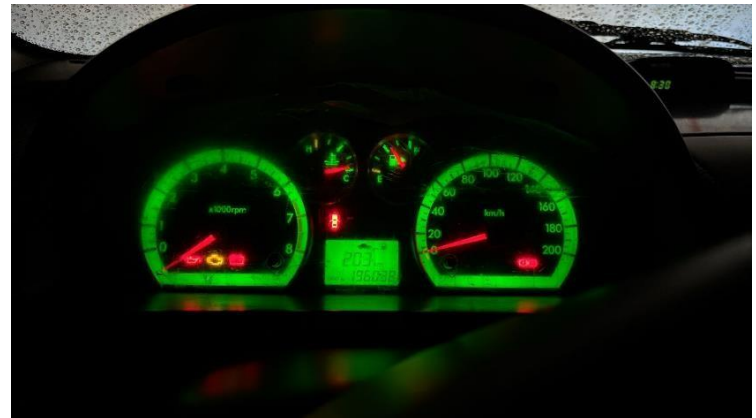
Para el análisis de los aspectos físicos de los bujes de poliuretano, se procedió a su instalación en el vehículo objeto de estudio. En el lado izquierdo del automóvil se colocaron los bujes fabricados en poliuretano, mientras que en el lado derecho se mantuvieron los bujes convencionales de caucho-metal, ampliamente utilizados en el sector automotriz. Esta configuración permitió realizar una comparación directa del comportamiento y desempeño de ambos tipos de bujes bajo las mismas condiciones de operación.



Una vez instalados los bujes, se procedió a realizar pruebas de campo en diferentes condiciones de conducción. Estas pruebas se efectuaron tanto en carreteras pavimentadas como en caminos irregulares, con el objetivo de evaluar el comportamiento de los bujes bajo distintas condiciones de operación. Para ello, fue necesario recorrer una considerable cantidad de 3.569 kilómetros que permitieran analizar su desempeño durante el uso continuo del vehículo. Los recorridos se realizaron en trayectos largos entre las ciudades de Tulcán-Ibarra y Tulcán-Quito, así como en sus respectivos retornos, lo que permitió obtener una evaluación más completa del comportamiento de los bujes durante la



conducción.



Una vez alcanzado el kilometraje establecido para las pruebas de campo, se procedió a desmontar los bujes instalados en el vehículo con el objetivo de realizar una inspección física detallada. Durante este proceso se evaluó la presencia de fisuras, desgaste, rupturas o deformaciones en los materiales que conforman cada buje.

En el análisis físico se evaluaron por separado los dos bujes que forman parte de la mesa de suspensión del vehículo: el buje de mayor tamaño y el buje de menor tamaño.



En el caso del buje de mayor tamaño fabricado en poliuretano, se observó una ruptura en la parte superior del material. Este comportamiento puede atribuirse a la alta rigidez del poliuretano, ya que, al ser un material más duro en comparación con el caucho, tiende a presentar fracturas cuando se somete a maniobras bruscas o esfuerzos elevados durante la conducción. Asimismo, el componente metálico en contacto con la mesa de suspensión presentó rayaduras y un leve desgaste superficial. Este fenómeno puede estar relacionado con la diferencia en las propiedades mecánicas del acero utilizado, el cual no posee las mismas características que el material presente en el buje original de caucho-metal.

Por otra parte, el buje convencional de caucho-metal presentó un menor nivel de desgaste. Esto se debe principalmente a la mayor flexibilidad del caucho, que permite absorber mejor las vibraciones y cargas generadas durante la conducción. Además, la calidad del acero utilizado en su fabricación proporciona una mayor resistencia al desgaste durante condiciones normales de operación. Estas características explican por qué los bujes de caucho-metal continúan siendo ampliamente utilizados y comercializados en el mercado automotriz.

En el caso del buje de menor tamaño, donde el poliuretano tiene contacto directo con la mesa de suspensión, no se evidenciaron deformaciones ni desgaste significativo en el material, lo que indica un comportamiento adecuado durante el período de prueba. Sin embargo, el bocín interior presentó un desgaste mínimo acompañado de ligeras rayaduras a lo largo de su superficie, similar a lo observado en el buje de mayor tamaño.





CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El análisis de materiales permitió determinar que el poliuretano presenta mayor rigidez mecánica en comparación con el caucho utilizado en bujes caucho–metal. Durante las pruebas realizadas tras un recorrido aproximado de 3569 km, el poliuretano evidenció una ruptura en el buje de mayor tamaño, mientras que el buje de caucho–metal presentó únicamente desgaste mínimo, demostrando una mayor capacidad de absorción de vibraciones y cargas dinámicas.
- El uso de herramientas CAD/CAE permitió desarrollar el modelado tridimensional de los bujes y realizar análisis estructurales mediante simulación. Estos análisis permitieron identificar zonas de mayor concentración de esfuerzos (radial, torsional y axial), particularmente en la parte superior del buje grande, coincidiendo con la zona donde posteriormente se evidenció la falla durante las pruebas de campo.
- El proceso de fabricación permitió obtener bujes funcionales utilizando materiales y procesos disponibles en la industria nacional. Sin embargo, tras las pruebas de campo se observó un desgaste leve y rayaduras en el bocín metálico, atribuibles a las propiedades mecánicas del acero utilizado en comparación con el material del componente original.
- Las pruebas de campo realizadas en trayectos Tulcán–Ibarra y Tulcán–Quito, con un recorrido aproximado de 2569 km, permitieron evaluar el comportamiento de los bujes en condiciones reales. Los resultados mostraron que el buje de caucho–metal presentó un mejor desempeño general, mientras que el buje de poliuretano evidenció mayor rigidez y menor capacidad de absorción de vibraciones.



5.2. Recomendaciones

- Se recomienda evaluar poliuretanos con menor dureza o diferentes composiciones elastomérico que permitan mejorar la flexibilidad del material y su resistencia ante esfuerzos dinámicos.
- Se recomienda realizar simulaciones adicionales considerando diferentes condiciones de carga y tipos de mallado para optimizar el diseño del componente y reducir posibles concentraciones de esfuerzo.
- Se recomienda utilizar aceros con mejores propiedades mecánicas o aplicar tratamientos superficiales que permitan mejorar la resistencia al desgaste del bocín metálico.
- Se recomienda ampliar las pruebas de evaluación a recorridos superiores a 5000 km y considerar diferentes condiciones de carga y tipo de terreno para obtener resultados más representativos del comportamiento del componente.



ANEXOS

Anexo 1: Verificación de geometría de los bujes de suspensión



Anexo 2: Instalación de los bujes de suspensión en el plato de suspensión del vehículo





SUBDECANATO



Anexo 3: colocación de la mesa de suspensión al vehículo con los bujes de poliuretano para hacer las pruebas de campo



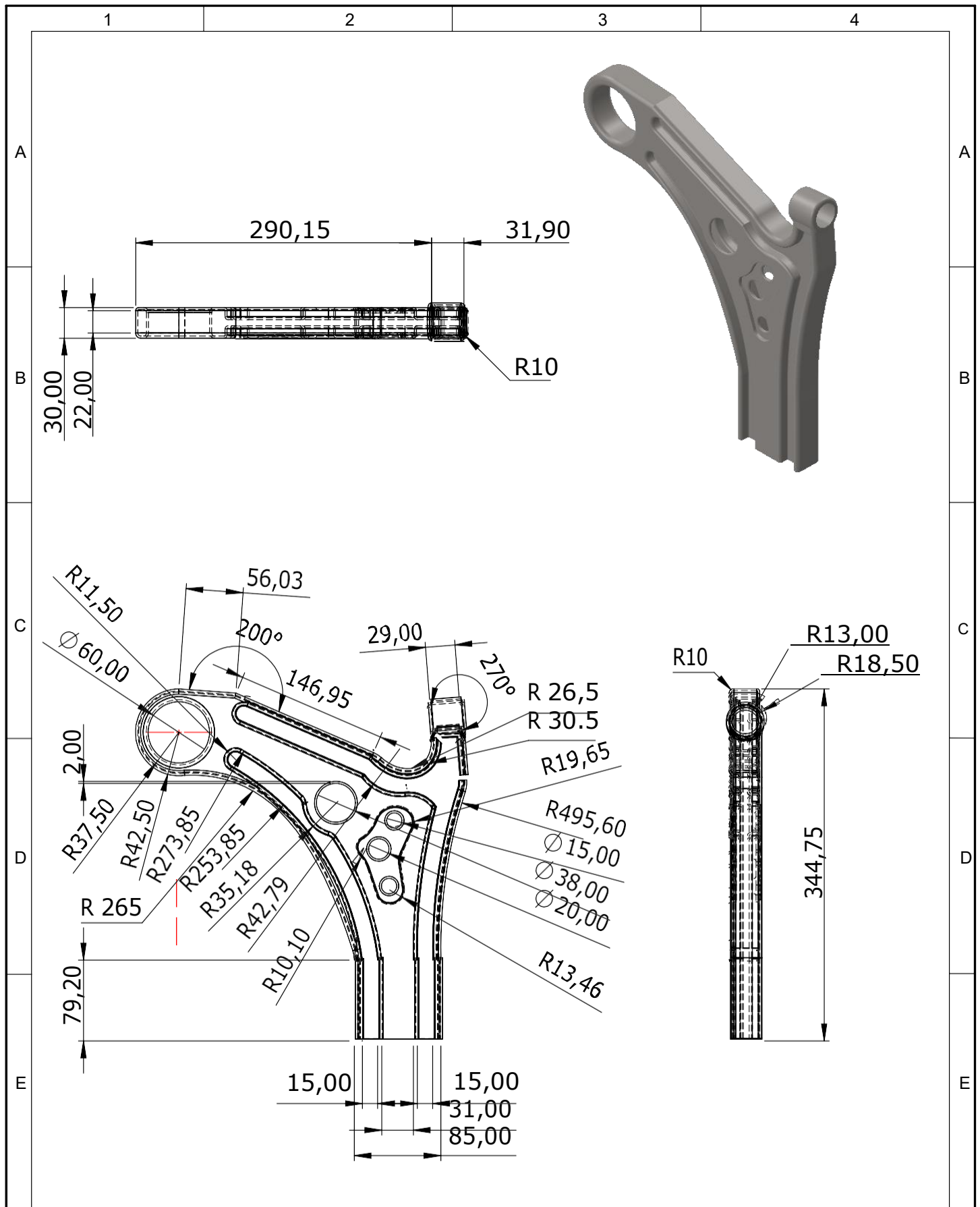


REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

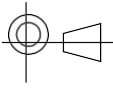
- Anrrango, A. & Meneses, M. (2024). Diseño y construcción de los sistemas auxiliares (dirección, suspensión y frenos) para el vehículo tipo formula SAE.
- Arano, I. (2010). Diseño de un sistema de suspensión en materiales compuestos para un formula SAE.
- Arévalo, G. (2022). Rediseño y construcción de la suspensión McPherson del tren delantero de un Chevrolet vitara clásico aplicando herramientas computacionales de simulación estructural y manufactura.
- Borreguero, P., & Carnicero, A. (2019). Diseño, análisis y fabricación de bujes delanteros y traseros para un prototipo de formula student.
- Cerit, M., Nart, E., & Genel, K. (2010). Investigation into effect of rubber bushing on stress distribution and fatigue behaviour of anti-roll bar. *Engineering Failure Analysis*, 17(5), pp. 1019–1027. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.01.009>
- Chuqui, J. (2022). Factores determinantes en la producción de automóviles ensamblados en el Ecuador.
- Córdova M., Noya D., & Flores A. (2018). Modelo integral de un sistema de control de presión en una prensa hidráulica para el ensamble de bujes, para la suspensión de camionetas de 3 1/2 toneladas.
- Cubillos, A. (2007). Introducción al método de elementos finitos.
- Duleba, B., & Greškovič, F. (2012). Possibility of Manufacturing of Race Polyurethane Bushings Using Rapid Prototyping and Prototype Molds. pp. 195–199.
- Guachisaca, J., & Ochoa, R. (2022). Diseño de un proceso de manufactura para el mantenimiento correctivo de los eslabones en las articulaciones de maquinaria pesada.



- Junik, K. et al. (2021). Impact of the hardness on the selected mechanical properties of rigid polyurethane elastomers commonly used in suspension systems, *Engineering Failure Analysis*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105201>.
- Manrique, W. (2017). Análisis de fatiga mediante elementos finitos a un buje caucho-metal usado en la suspensión de vehículos de carga.
- Marcos, A., & Rodriguez, J. (2019). Impresión 3D con materiales elásticos. España. <https://www.stratasys.com/es/polyjet-technology>.
- Ochoa, D., Armas, R., & Pereira, C. (2022). Manufacturas y crecimiento económico en Ecuador bajo una perspectiva regional. Un modelo de panel dinámico, 2007 - 2020. *Revista Vista Económica*, 10(1), pp. 31-44. <https://doi.org/10.54753/rve.v10i1.1290>
- Quintero, L. (2017). Análisis de fatiga y evaluación de propiedades mecánicas a bujes de caucho-metal.
- Villares, A. et al. (2016) 'Diseño y construcción de un sistema de suspensión para un vehículo tipo fórmula para la escuela de ingeniería automotriz'. Riobamba.



				Peso	Materiales:	
				2.4 Kg	ACERO	
				Fecha	Denominación:	
				3/02/2026	MESA SUSPENSIÓN	
				Nombre	Escala:	
				MUÑOZ C.	1:5	
				Rev.		
				3/02/2026		
				Apro.		
				3/02/2026		
				U.T.N		
				INGENIERIA AUTOMOTRIZ		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Número del dibujo:	1	
				Unidades:	mm	



1

2

3

4

A

A

B

B

C

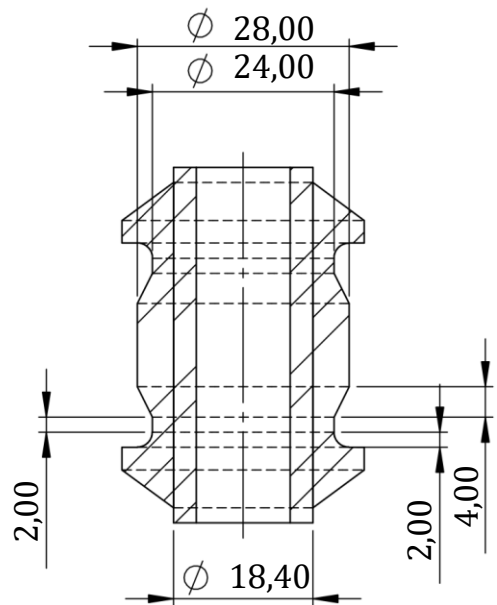
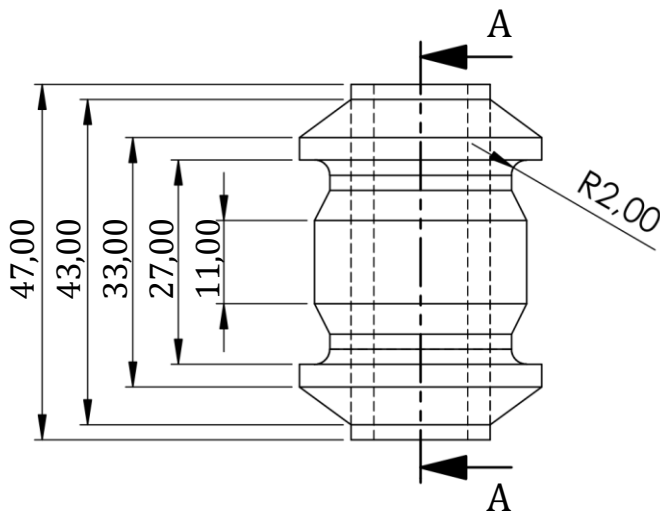
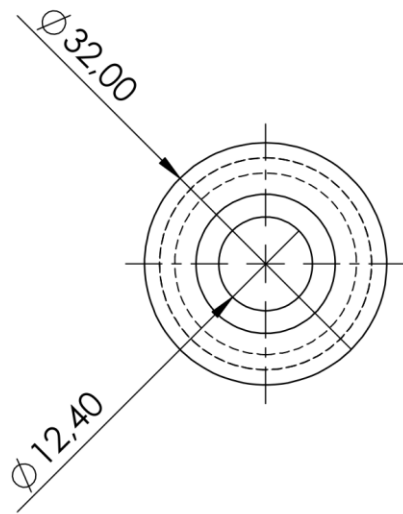
C

D

D

E

E



SECCIÓN A-A

					Peso	Materiales:	
					0,07 Kg	ACERO - CAUCHO VULCANIZADO	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dib. 3/02/2026	MUÑOZ C.		
				Rev. 3/02/2026	ING. MAFLA		
				Apro. 3/02/2026	ING. MAFLA	BUJE PEQUEÑO	1:1
				U.T.N INGENIERIA AUTOMOTRIZ			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Unidades: mm	

1

2

3

4

A

A

B

B

C

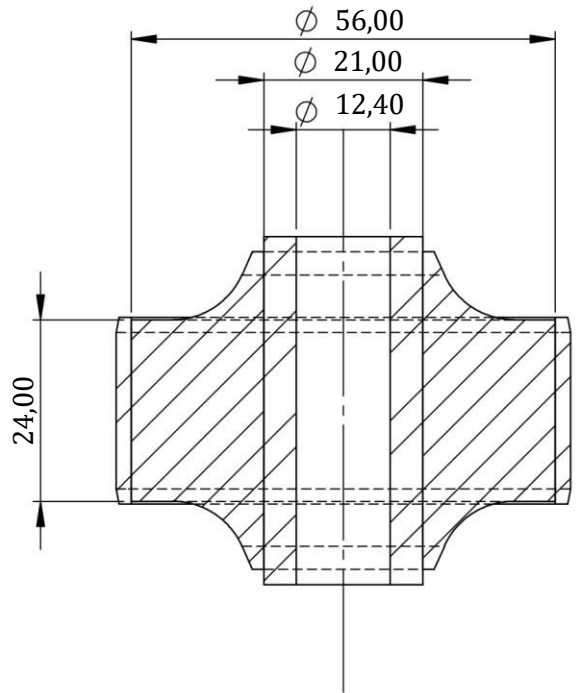
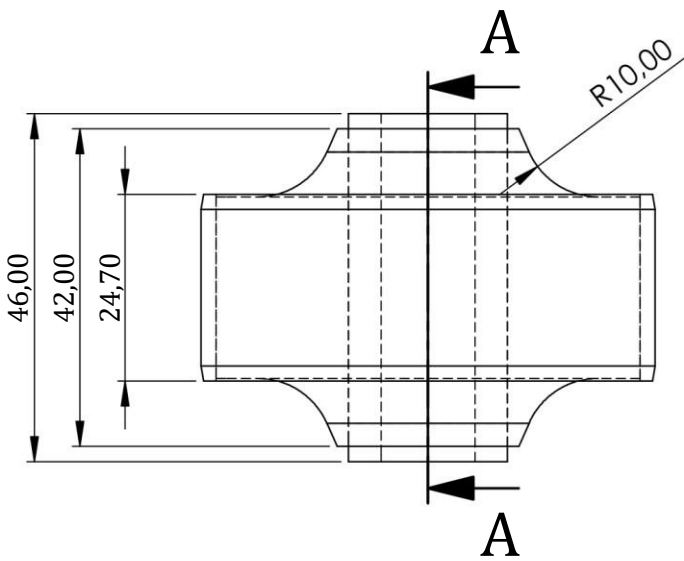
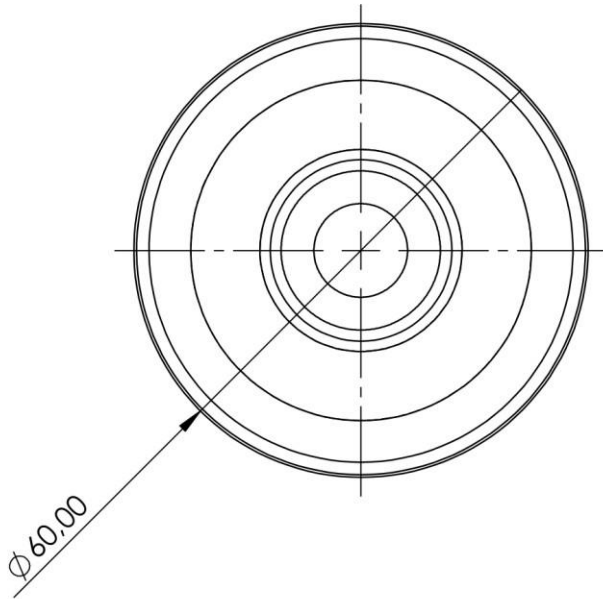
C

D

D

E

E



SECCIÓN A-A

ESCALA 1 : 1

				Peso	Materiales:	
				0,22 kg	ACERO - CAUCHO VULCANIZADO	
		Fecha	Nombre	Denominación:		Escala:
Dib.	3/02/2026	MUÑOZ C.		BUJE GRANDE		1:1
Rev.	3/02/2026	ING. MAFLA				
Apro.	3/02/2026	ING. MAFLA				
				Número del dibujo:		
				1		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	U.T.N		Unidades:
				INGENIERIA AUTOMOTRIZ		mm