



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE GUAYAQUIL  
CARRERA DE INGENIERÍA DE AUTOMOTRIZ**

**REDISEÑO Y ANÁLISIS DEL HUSILLO DE BLOQUEO DEL GOBERNADOR DE  
ACELERACIÓN DE UNA MINIEXCAVADORA MEDIANTE  
APLICACIONES CAD – CAE**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Automotriz

**AUTORES: ERIC SAMUEL ANDRADE BARZOLA  
JEAN CARLOS GUERRA MITE  
TUTOR: ING. JAVIER RENATO MOYANO ARÉVALO MSC.**

Guayaquil – Ecuador

2023

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Nosotros, Eric Samuel Andrade Barzola con documento de identificación N° 0950478503 y Jean Carlos Guerra Mite con documento de identificación N° 0940199755; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 14 de septiembre del año 2023

Atentamente,



---

Eric Samuel Andrade Barzola

0950478503



---

Jean Carlos Guerra Mite

0940199755

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Eric Samuel Andrade Barzola con documento de identificación No. 0950478503 y Jean Carlos Guerra Mite con documento de identificación No. 0940199755, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Rediseño y análisis del husillo de bloqueo del gobernador de aceleración de una miniexcavadora mediante aplicaciones CAD – CAE”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 14 de septiembre del año 2023

Atentamente,



---

Eric Samuel Andrade Barzola

0950478503



---

Jean Carlos Guerra Mite

0940199755

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Javier Renato Moyano Arévalo con documento de identificación N° 0603796442, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: REDISEÑO Y ANÁLISIS DEL HUSILLO DE BLOQUEO DEL GOBERNADOR DE ACELERACIÓN DE UNA MINIEXCAVADORA MEDIANTE APLICACIONES CAD – CAE, realizado por Eric Samuel Andrade Barzola con documento de identificación N° 0950478503 y por Jean Carlos Guerra Mite con documento de identificación N° 0940199755, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 14 de septiembre del año 2023

Atentamente,



---

Javier Renato Moyano Arévalo

0603796442

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a Dios por darme las fuerzas cada día, a mis padres quienes siempre me tienden la mano cuando más lo necesito y a mis mascotas por darme apoyo emocional.

Eric Samuel Andrade Barzola

## **DEDICATORIA**

Le dedico este proyecto a Dios, por guiarme y levantarme cada día, así las cosas, estén difíciles. Le dedico este trabajo a mis padres, quienes siempre me han apoyado y velado por mi bienestar, por acompañarme en todos mis logros, así como no dejarme en mis derrotas, a mi hermana por permanecer a mi lado y a mi enamorada por ser un apoyo incondicional cada día.

Jean Carlos Guerra Mite

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por permitirme concluir esta etapa de mi vida, a mis padres y mascotas quienes fueron mi soporte emocional y financiero, a la Universidad Politécnica Salesiana por impartir los conocimientos por medio de los profesores, al tutor de tesis por su guía y dedicación, a mis compañeros de clase y a mi compañero de proyecto por su paciencia y dedicación.

Eric Samuel Andrade Barzola.

## AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Dios por terminar este duro proceso de formación, a mis padres Carlos y Adriana por apoyarme y cuidarme cada día, por depositar su esperanza en mí. Le agradezco a mi hermana Danna por estar siempre a mi lado y ser un ejemplo como profesional, le agradezco al resto de mi familia por estar siempre presente y depositar su confianza en mi futuro. Le agradezco a mi enamorada por su apoyo, consejos y sobre todo por creer en mí y ayudarme a dar todo de mí en cada trabajo.

Le agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana por darme la oportunidad de compartir una bonita y dura experiencia, la cual no me hará dudar de decir que soy un Salesiano, le agradezco a mis profesores por repartir sus conocimientos y por guiarte no solo en el ámbito profesional, sino también en el ámbito social.

Jean Carlos Guerra Mite.



## RESUMEN

El presente estudio se centra en el rediseño y análisis del husillo de bloqueo del gobernador de aceleración en una miniexcavadora, empleando herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) y análisis por elementos finitos (CAE). El objetivo principal es rediseñar y analizar el husillo de bloqueo para la reutilización del gobernador de aceleración de una miniexcavadora mediante aplicaciones CAD – CAE.

Mediante la utilización de software CAD, se desarrolla un modelo tridimensional del mecanismo del actuador, permitiendo una visualización detallada de su geometría y componentes. Posteriormente, se utiliza técnicas de análisis por elementos finitos en donde los resultados se validan por métodos analíticos, los cuales evalúan los esfuerzos, tensiones y deformaciones en diversas condiciones de carga y operación. Esto permite identificar áreas críticas de estrés y determinar cómo afectan al rendimiento general del husillo.

Los resultados del análisis destacan la necesidad de ajustes en el diseño actual del husillo para minimizar los puntos de concentración de tensión y mejorar la distribución de cargas. A través de simulaciones CAE, se proponen modificaciones específicas en la geometría y materiales para lograr un rendimiento óptimo. Además, se discuten consideraciones prácticas para la fabricación y montaje de las mejoras propuestas.

**Palabras claves:** Actuador eléctrico, rediseño, elementos finitos.

## ABSTRACT

The present study focuses on the redesign and analysis of the acceleration governor lock spindle in a mini-excavator, using computer-aided design (CAD) and finite element analysis (CAE) tools. The main objective is to redesign and analyze the lock spindle for the reutilization of the acceleration governor in a mini-excavator through CAD-CAE applications.

Through the use of CAD software, a three-dimensional model of the actuator mechanism is developed, allowing for a detailed visualization of its geometry and components. Subsequently, finite element analysis techniques are employed, where the results are validated through analytical methods that evaluate stresses, strains, and deformations under various loading and operational conditions. This enables the identification of critical stress areas and determines how they affect the overall performance of the spindle.

The analysis results highlight the need for adjustments in the current spindle design to minimize stress concentration points and improve load distribution. Specific modifications to geometry and materials are proposed for optimal performance through CAE simulations. Furthermore, practical considerations for the manufacturing and assembly of the proposed improvements are discussed.

**Key words:** Electric actuator, redesign, finite elements.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.</b>	<b>Problema.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.1.</b>	<b>Antecedentes.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.2.</b>	<b>Importancia y alcances.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1.3.</b>	<b>Delimitaciones .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2.</b>	<b>Objetivos Generales y Específicos .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo General.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO II. MARCO TEORICO.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>Maquinaria pesada: Excavadoras y miniexcavadoras.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Actuadores.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.1.1</b>	<b>Tipos de Actuadores. ....</b>	<b>8</b>
<b>2.2</b>	<b>Materiales utilizados en la industria automotriz. ....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Tipos de materiales .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.1.1</b>	<b>Acetal (POM) .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.1.2</b>	<b>Ácido poliláctico (PLA) .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.1.3</b>	<b>Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS).....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.1.4</b>	<b>Acrilonitrilo butadieno estireno recubierto con fibra de vidrio (ABS-GF).....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.1.5</b>	<b>PLA reforzado con Fibra de Carbono (PLA-CF).....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1.6</b>	<b>Polietileno Tereftalato de Glicol (PETG) .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.1.7</b>	<b>Poliuretano Termoplástico (TPU) .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.1.8</b>	<b>Policarbonato (PC) .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Selección de materiales.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2.1</b>	<b>Métodos de selección de material .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3</b>	<b>Diseño mecánico.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Teoría De Diseño .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.1.1</b>	<b>Teoría De Distorsión.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.1.2</b>	<b>Teoría De Esfuerzo Cortante .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Fatiga en materiales.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.2.1</b>	<b>Teoría de Goodman .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.2.2</b>	<b>Resistencia a la fatiga .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2.3</b>	<b>Factores que intervienen en el límite de resistencia a la fatiga.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2.4</b>	<b>Número de ciclos .....</b>	<b>32</b>

2.3.2.5 Creación de diagrama S/N estimadas. ....	33
2.4 Tecnología CAD/CAM/CAE.....	34
2.4.1 Diseño Asistido por Computadora (CAD).....	34
2.4.2 Tecnologías de Manufactura Asistida por Computadora (CAM) .....	35
2.4.2.1 Fabricación Aditiva .....	36
2.4.3 Ingeniería Asistida por Computadora (CAE).....	37
2.4.4 Ventajas de las tecnologías CAD, CAM, CAE .....	38
2.4.5 Usos específicos de las tecnologías CAD, CAM, CAE .....	38
3 CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO .....	40
3.1 Identificación visual del mecanismo del actuador. ....	40
3.1.1 Modelado del mecanismo en 3D .....	42
3.1.2 Determinación de fuerzas que actúan en el mecanismo del actuador .....	43
3.1.3 Identificación del modo de fallo del mecanismo del actuador por análisis de elementos finitos.....	44
3.1.3.1 Simulación del mecanismo del actuador.....	45
3.1.3.2 Conexiones del mecanismo del actuador .....	46
3.1.3.3 Creación del mallado del mecanismo del actuador .....	48
3.1.3.4 Asignación de fuerzas y soportes que actúan en el mecanismo del actuador.....	53
3.1.3.5 Análisis de deformación del mecanismo del actuador.....	56
3.1.3.6 Análisis de esfuerzos de Von Mises del mecanismo del actuador .....	57
3.1.3.7 Análisis de esfuerzos cortantes del mecanismo del actuador.....	58
3.1.3.8 Análisis del factor de seguridad del mecanismo del actuador .....	59
3.1.3.9 Análisis por simulación de fatiga del actuador .....	59
3.1.4 Análisis por métodos analíticos del mecanismo del actuador.....	61
3.1.4.1 Análisis de fatiga del mecanismo del actuador de aceleración.....	64
3.2 Rediseño del husillo de bloqueo.....	69
3.2.1 Selección del material .....	69
3.2.1.1 Selección del material por densidad.....	71
3.2.1.2 Selección de material por temperatura de trabajo. ....	71
3.2.1.3 Selección del material por precio .....	72
3.2.1.4 Selección del material por temperatura de extrusión .....	73
3.2.1.5 Selección del material por la resistencia a la tracción.....	73
3.2.2 Modelado de los rediseños del husillo de bloqueo.....	74
3.3 Validación de datos por simulación y métodos analíticos.....	77

3.3.1	Asignación de materiales al mecanismo del actuador .....	78
3.3.1.1	Asignación del mallado en el mecanismo del actuador .....	78
3.3.1.2	Asignación de las condiciones de frontera del mecanismo.....	84
3.3.2	Análisis de deformaciones de los rediseños del husillo de bloqueo. ....	85
3.3.2.1	Análisis de esfuerzos cortantes en el mecanismo del actuador de los rediseños del husillo de bloqueo. ....	86
3.3.2.2	Análisis de esfuerzos de Von Mises en el mecanismo del actuador de los rediseños del husillo de bloqueo. ....	86
3.3.2.3	Análisis del factor de seguridad de los rediseños del husillo de bloqueo.....	87
3.3.2.4	Análisis comparativo de los rediseños del husillo de bloqueo por simulación a fatiga.....	88
3.3.2.5	Asignación de soportes cilíndricos para un análisis por fatiga de los rediseños del husillo de bloqueo. ....	89
3.3.2.6	Análisis del esfuerzo de Von Mises por fatiga de los rediseños del husillo de bloqueo.....	90
3.3.2.7	Análisis del factor de seguridad por fatiga de los rediseños del husillo de bloqueo.....	91
3.3.3	Análisis de fatiga del rediseño seleccionado por métodos analíticos.....	93
4	<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....</b>	<b>96</b>
4.1	Resultados.....	96
4.2	Elección de métodos de fabricación aditiva y material termoplástico.....	96
4.3	Fabricación del husillo .....	100
5	<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>109</b>
5.1	Conclusiones.....	109
5.2	Recomendaciones.....	110
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>112</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>118</b>

## **GLOSARIO**

**Fatiga:** Debilitamiento del material por carga cíclicas.

**Torneado:** técnica de mecanizado que involucra la rotación de una pieza de trabajo en torno a su eje, mientras que una herramienta de corte se desplaza en dirección a la pieza.

**Husillo de bloqueo:** Elemento mecánico que produce el desplazamiento lineal del actuador.

**Manufactura:** Proceso de fabricación de un elemento realizado por maquinas o con las manos.

**Metodología:** Conjunto de métodos que son empleados en el desarrollo de un proyecto.

**Resistencia a la tracción:** Esfuerzo de tracción mecánico máximo que soportar el material.

**Software de simulación 3D:** Herramienta virtual que permite crear modelos 3D con la posibilidad de realizar cambios al modelo en tiempo real.

## SIMBOLOGÍA

Símbolo	Denominación	Unidad
$K_a$	Factor de modificación de la condición superficial	-
$K_c$	Factor de modificación de la carga	-
$K_d$	Factor de modificación de la temperatura	-

$K_e$	Factor de confiabilidad	-
$K_f$	Factor de concentración de esfuerzo por fatiga	-
$K_{fs}$	Factor de concentración de esfuerzo por fatiga (cortante)	-
$K_t$	Factor de concentración de esfuerzos normales	-
$K_{ts}$	Factor de concentración de esfuerzos cortantes	-
$S_e$	Límite de resistencia a la fatiga	MPa
$S'_e$	Límite de resistencia a la fatiga	-
$S_f$	Factor de seguridad por ciclaje	-
$S_m$	Resistencia del material en ciclos	Ciclos
$S_{ut}$	Resistencia ultima a la tracción del material	MPa
$S_y$	Resistencia a la fluencia del material	MPa
$\sqrt{a}$	Coefficiente de Neuber	-
$n_s$	Factor de seguridad por fatiga	-
$q_s$	Sensibilidad a la muesca cortante	-
$\sigma'_F$	Esfuerzo verdadero	MPa



$\sigma_{VonMises}$	Esfuerzo de Von Mises	MPa
$\sigma_a$	Esfuerzo alternante	MPa
$\sigma_m$	Esfuerzo medio	MPa
$\tau_c$	esfuerzo cortante	N
$\tau_{max}$	Tensión máxima cortante	MPa
$d$	diámetro inferior	mm
$F_s$	Factor de seguridad por esfuerzo de Von Mises	-
$N$	Numero de ciclos	Ciclos
$a$	Factor	-
$b$	exponente	-
$f$	Fracción de resistencia ultima a la tracción	-
$q$	Sensibilidad a la muesca normal	-
$r$	radio de la muesca	mm
$z$	Factor	-
$\sigma$	Esfuerzo normal	MPa
$\sigma$	Momento	Nm

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Rotura en el husillo de bloqueo del actuador de aceleración .....	2
Fig. 2. Miniexcavadora.....	7
Fig. 3. Tipos de actuadores.....	8
Fig. 4. Evolución de los actuadores eléctricos .....	9
Fig. 5. Actuador eléctrico serie ET12-084 .....	11
Fig. 6. Rueda y corona dentada de acetal .....	13
Fig. 7. Mangueta de vehículo de formula Student impresa en PLA.....	15
Fig. 8. Parachoques fabricados de ABS .....	17
Fig. 9. Retrovisores fabricados de ABS-GF .....	17
Fig. 10. Aplicaciones de materiales plásticos con fibra de carbono.....	19
Fig. 11. Pieza funcional fabricada en PETG .....	19
Fig. 12. Piezas fabricadas en TPU .....	20
Fig. 13. Faro de vehículo fabricado en PC .....	21
Fig. 14. Funciones del Granta Selector en la selección del material .....	23
Fig. 15. Curvas estimadas para (a) materiales con articulaciones y (b) materiales sin	

articulaciones .....	34
Fig. 16. Aplicaciones de tecnologías CAD .....	35
Fig. 17. Aplicaciones de tecnologías CAM.....	36
Fig. 18. Esquema de funcionamiento de una impresora 3D.....	37
Fig. 19. Elementos del actuador de aceleración. ....	41
Fig. 20. Husillo de bloqueo fracturado.....	41
Fig. 21. Modelado del husillo de bloqueo por Inventor. ....	42
Fig. 22. Modelado del mecanismo del actuador.....	42
Fig. 23. Angulo de la hélice para engranaje helicoidal .....	43
Fig. 24. Selección del módulo análisis estructural .....	44
Fig. 25. Selección de materiales a utilizar para la simulación del mecanismo.....	44
Fig. 26. Asignación de materiales en las piezas del mecanismo en su posición inicial. ....	45
Fig. 27. Generación de corte en el husillo de bloqueo por ANSYS Design Molder (posición inicial).....	46
Fig. 28. Generación de corte en el husillo de bloqueo por ANSYS Design Molder (posición final).....	46
Fig. 29. Identificación de Conexiones en el mecanismo del actuador de aceleración en su posición inicial.....	47
Fig. 30. Definición del mallado en el mecanismo del actuador.....	48
Fig. 31. Calidad del mallado en el mecanismo del actuador por aspecto de radio. ....	49
Fig. 32. Calidad del mallado en el mecanismo del actuador por calidad del elemento.....	50
Fig. 33. Curvas de caracterización del mallado.....	51
Fig. 34. Curvas de caracterización del mallado.....	52
Fig. 35. Curvas de caracterización del mallado.....	52
Fig. 36. Asignación de los soportes fijos en el mecanismo a simular (posición inicial). ....	53
Fig. 37. Asignación del soporte cilíndrico al eje roscado y husillo de bloqueo zona roscada (mecanismo posición inicial).....	54
Fig. 38. Asignación de las fuerzas del mecanismo en su posición inicial. ....	55
Fig.39 Análisis de deformación del husillo de bloqueo del mecanismo. ....	56
Fig.40 Análisis de deformación del husillo de bloqueo del mecanismo. ....	56
Fig. 41. Análisis de esfuerzo de Von Mises en el mecanismo del actuador.....	57
Fig. 42. Análisis de esfuerzo de Von Mises en el husillo de bloqueo del mecanismo. ....	57
Fig. 43. Análisis de esfuerzo cortante en el mecanismo en su posición inicial.....	58
Fig. 44. Análisis de esfuerzo cortante en el husillo de bloqueo del mecanismo. ....	58
Fig. 45 Análisis del factor de seguridad del husillo de bloqueo del actuador. ....	59
Fig. 46. Curva S-N del Acetal .....	60
Fig. 47. Análisis del factor de seguridad por fatiga del husillo de bloqueo.....	60
Fig. 48. Análisis del ciclo de vida del husillo de bloqueo .....	61

Fig. 49. Asignación de fuerzas del mecanismo en MD SOLID .....	61
Fig. 50. Diagrama de momento flector y esfuerzo cortante del mecanismo del eje X.....	62
Fig. 51. Diagrama de momento flector y esfuerzo cortante del mecanismo del eje Y .....	62
Fig. 52. Diagrama de momento flector y esfuerzo cortante del mecanismo del eje Z .....	63
Fig. 53. Esquema de fuerzas del mecanismo del actuador en su posición de trabajo final. .	65
Fig. 54. Diámetro total del husillo de bloqueo .....	65
Fig. 55. Diámetro mayor y menor del exterior del husillo .....	67
Fig. 56. Grafica comparativa de las tecnicas de manufactura aditiva con los parametros de tolerancia y materiales termoplasticos.....	70
Fig. 57. Grafica comparativa de la densidad de los materiales termoplásticos.....	71
Fig. 58. Grafica comparativa de la temperatura de trabajo de los materiales termoplásticos .....	72
Fig. 59. Grafica comparativa del precio de los materiales termoplásticos.....	72
Fig. 60. Grafica comparativa de la temperatura de extrusión de los materiales termoplásticos.....	73
Fig. 61. Grafica comparativa de la resistencia a la tracción de los materiales termoplásticos.....	74
Fig. 62 Dimensión del primer prototipo de rediseño del husillo de bloqueo del mecanismo del actuador.....	75
Fig. 63 Dimensión del segundo prototipo de rediseño del husillo de bloqueo del mecanismo del actuador.....	75
Fig. 64 Dimensión del tercer prototipo de rediseño del husillo de bloqueo del mecanismo del actuador.....	76
Fig. 65. Esquema de rediseños del husillo de bloqueo del mecanismo del actuador. ....	77
Fig. 66. Asignación de materiales a las autopartes del mecanismo del actuador (Rediseños).....	78
Fig. 67. Mallado en el mecanismo del actuador (Rediseño por resistencia).....	79
Fig. 68. Mallado en el mecanismo del actuador (Rediseño por rigidez).....	80
Fig. 69. Mallado en el mecanismo del actuador (Rediseño por resistencia - rigidez).....	81
Fig. 70. Curvas de caracterización del mallado.....	83
Fig. 71. Curvas de caracterización del mallado.....	84
Fig. 72. Curvas de caracterización del mallado.....	84
Fig. 73. Asignación de fuerzas y soportes en el mecanismo del actuador (Rediseños) .....	85
Fig. 74. Deformaciones presentadas en los 3 rediseños del husillo. ....	85
Fig. 75. Esfuerzos cortantes presentados en los 3 rediseño.....	86
Fig. 76. Esfuerzos de Von Mises presentados en los 3 rediseño.....	87
Fig. 77. Factor de seguridad en los 3 rediseño. ....	87
Fig. 78. Curva S-N del PLA PREMIUM. ....	89
Fig. 79. Asignación de soportes cilíndricos.....	90

Fig. 80. Esfuerzos alternantes de los 3 rediseño del husillo de bloqueo. ....	91
Fig. 81. Factor de seguridad de los 3 rediseños del husillo de bloqueo. ....	92
Fig. 82. Análisis de ciclo de vida de los rediseños del husillo de bloqueo.....	92
Fig. 83. Medidas del diámetro y fuerzas que actúan en el husillo.....	93
Fig. 84. Proceso de parametrización en el Software Ultimaker Cura. ....	100
Fig. 85. Parámetros de calidad en Cura para la fabricación. ....	101
Fig. 86. Parámetros de relleno en Cura para la fabricación.....	101
Fig. 87. Parámetros de temperatura en Cura para la fabricación.....	102
Fig. 88. Parámetros de velocidad en Cura para la fabricación. ....	102
Fig. 89. Parámetros del soporte en Cura para la fabricación. ....	103
Fig. 90. Segmentación del husillo de bloqueo en Cura para iniciar el proceso de fabricación. .....	103
Fig. 91. Inicio de proceso de fabricación en la impresora Ender 3 Pro.....	104
Fig. 92. Monitoreo de los parámetros de temperatura en la impresora 3D. ....	105
Fig. 93 Impresión en 3D del husillo de bloqueo. ....	106
Fig. 94. . Rediseño del husillo de bloqueo fabricado. ....	106
Fig. 95. Verificación del husillo de bloqueo fabricado.. ....	107
Fig. 96. Verificación del husillo de bloqueo en la miniexcavadora.. ....	107
Fig. 97. Parámetros en el factor de la condición superficial.....	118
Fig. 98. Valores de parámetros en el factor de temperatura .....	119
Fig. 99. Valores de parámetros en el factor de confianza.....	120
Fig. 100. Valores de parámetros en el factor de concentración de esfuerzo por fatiga.....	121
Fig. 101. Valores de parámetros Kts .....	122
Fig. 102. Factor z para (26) .....	123
Fig. 103. Numero de horas donde se produce el fallo del actuador .....	125
Fig. 104. Codigos de fallo presentados en la miniexcavadora por falla del actuador .....	125
Fig. 105. Especificaciones del actuador eléctrico.....	127
Fig. 106. Posicion del husillo rediseñado en la carcasa del actuador.....	128

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I. TABLA DE LABORES E IMPLEMENTOS DE UNA MINIEXCAVADORA...	8
TABLA II. TABLA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ACTUADOR .....	12
TABLA III. TABLA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ABS-GF .....	18
TABLA IV. TABLA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PETG.....	20
TABLA V. CARACTERISCTICAS DE LAS TECNOLOGIAS CAD/CAE/CAM .....	39
TABLA VI. CARACTERIZACION DEL MALLADO .....	50
TABLA VII. DATOS DE LA CURVA S-N DEL ACETAL .....	60
TABLA VIII. INTERPOLACION DEL FACTOR $K_t$ .....	67
TABLA IX. MODELO, FABRICANTE Y PARAMETROS PROPUESTOS .....	70
TABLA X. PARÁMETROS DEL MALLADO DEL MECANISMO DEL ACTUADOR (REDISEÑOS).....	82
TABLA XI.....	82
TABLA XII. PARÁMETROS PARA LA CREACIÓN DE LA CURVA S-N DEL PLA PREMIUM.....	88
TABLA XIII. TABLA DE DECISION.....	97

TABLA XIV. TABLA DE DECISION DE LOS MATERIALES.....	98
TABLA XV. PRESUPUESTO .....	108
TABLA XVI. CONSTANTE DE NEUBER.....	124
TABLA XVII. CODIGOS DE FALLA PRESENTADOS EN LA MINIEXCAVADORA... .....	126

## ÍNDICE DE ECUACIONES

ecuación 1. Esfuerzo de Von Mises.....	24
ecuación 2. Factor de seguridad por esfuerzo de Von Mises .....	25
ecuación 3. Criterio de esfuerzo cortante .....	25
ecuación 4. Tensión máxima 1 .....	25
ecuación 5. Tensión máxima 2 .....	25
ecuación 6. Tensión máxima 3 .....	25
ecuación 7. Factor de seguridad por esfuerzo cortante.....	25
ecuación 9. Teoría de Goodman .....	26
ecuación 9. Condición de la teoría de Goodman .....	26
ecuación 10. Factor de seguridad por teoría de Goodman .....	27
ecuación 11. Límite de resistencia a la fatiga momentánea .....	27
ecuación 12. Limite de resistencia a la fatiga.....	28
ecuación 13. Factor de modificación de la superficie .....	28
ecuación 14. Factor de modificación del tamaño .....	29
ecuación 15. Dimensión efectiva de pieza hueca no rotativa .....	29
ecuación 16. Factor de modificación de la carga.....	29

ecuación 17. Factor de modificación de la temperatura .....	30
ecuación 18. Factor de confiabilidad .....	30
ecuación 19. Factor de concentración de esfuerzo por fatiga.....	30
ecuación 20. Sensibilidad a la muesca por flexión y torsión.....	31
ecuación 21. Esfuerzo alternante .....	31
ecuación 22. Esfuerzo medio.....	31
ecuación 23. Factor de seguridad por fatiga por bajo ciclaje .....	32
ecuación 24. Factor de seguridad por fatiga .....	33
ecuación 25. Factor a .....	33
ecuación 26. Coeficiente b.....	33
ecuación 27. Ciclo de vida.....	33
ecuación 28. Resistencia del material en ciclos.....	34
ecuación 29. Fuerza radial de un engranaje helicoidal .....	43
ecuación 30. Fuerza axial de un engranaje helicoidal .....	43
ecuación 31. Cálculo de la fuerza radial de un engranaje helicoidal.....	43
ecuación 32. Cálculo de la fuerza axial de un engranaje helicoidal .....	43
ecuación 33. Cálculo del esfuerzo cortante en el eje x (posición inicial).....	62
ecuación 34. Cálculo del esfuerzo cortante en el eje x (posición final) .....	62
ecuación 35. Cálculo del esfuerzo cortante en el eje y (posición inicial).....	63
ecuación 36. Cálculo del esfuerzo cortante en el eje y (posición final) .....	63
ecuación 37. Cálculo del esfuerzo cortante en el eje z (posición inicial).....	63
ecuación 38. Cálculo del esfuerzo cortante en el eje z (posición final).....	63
ecuación 39. Método de pitagoras .....	63
ecuación 40. Cálculo de esfuerzo cortante resultante (posición inicial).....	63
ecuación 41. Cálculo de momento flector resultante (posición inicial) .....	63
ecuación 42. Cálculo de esfuerzo cortante resultante (posición final) .....	64
ecuación 43. Cálculo de momento flector resultante (posición final) .....	64
ecuación 44. Esfuerzo de Von Mises estático .....	64
ecuación 45. Cálculo de esfuerzo de Von Mises (posición inicial).....	64
ecuación 46. Cálculo de esfuerzo de Von Mises (posición final) .....	64
ecuación 47. Cálculo del factor de seguridad por esfuerzo de Von Mises (posición inicial)...	64
ecuación 48. Cálculo del factor de seguridad por esfuerzo de Von Mises (posición final) ..	64
ecuación 49. Momento torsor .....	65
ecuación 50. Radio del husillo de bloqueo (diseño original) .....	65
ecuación 51. Cálculo del Momento torsor (diseño original) .....	65
ecuación 52. Momento flector por fatiga.....	66



ecuación 53. Cálculo del momento flector por fatiga.....	66
ecuación 54. Cálculo de resistencia a la fatiga momentánea (diseño original) .....	66
ecuación 55. Cálculo de dimensión efectiva (diseño original) .....	66
ecuación 56. Cálculo del kb (diseño original).....	66
ecuación 57. Cálculo de D/d (diseño original) .....	67
ecuación 58. Cálculo de r/d (diseño original).....	67
ecuación 59. Interpolación lineal.....	67
ecuación 60. Cálculo de Kt (diseño original) .....	67
ecuación 61. Cálculo de sensibilidad a la muesca para flexión y torsión (diseño original) ..	68
ecuación 62. Cálculo de Kf para flexión y torsión (diseño original) .....	68
ecuación 63. Cálculo de límite de resistencia a la fatiga (diseño original) .....	68
ecuación 64. Reestructuración de esfuerzo alternante.....	68
ecuación 65. Reestructuración de esfuerzo medio.....	68
ecuación 66. Cálculo de esfuerzo alternante (diseño original).....	68
ecuación 67. Cálculo de esfuerzo medio (diseño original).....	68
ecuación 68. Cálculo de factor de seguridad por fatiga (diseño original) .....	68
ecuación 69. Cálculo de resistencia del material por ciclos .....	69
ecuación 70. Cálculo del exponente b (diseño original).....	69
ecuación 71. Cálculo del factor a (diseño original) .....	69
ecuación 72. Cálculo del ciclo de vida (diseño original).....	69
ecuación 73. Cálculo del Momento torsor (rediseño).....	93
ecuación 74. Cálculo de resistencia a la fatiga momentánea (rediseño) .....	93
ecuación 75. Cálculo del factor ka (rediseño) .....	93
ecuación 76. Cálculo de dimensión efectiva (rediseño) .....	94
ecuación 77. Cálculo del kb (rediseño) .....	94
ecuación 78. Cálculo de límite de resistencia a la fatiga (rediseño).....	94
ecuación 79. Cálculo de D/d (rediseño).....	94
ecuación 80. Cálculo de r/d (rediseño) .....	94
ecuación 81. Cálculo de sensibilidad a la muesca para flexión y torsión (rediseño) .....	94
ecuación 82. Cálculo de Kf para flexión y torsión (rediseño) .....	94
ecuación 83. Cálculo de esfuerzo alternante (rediseño) .....	95
ecuación 84. Cálculo de esfuerzo medio (rediseño).....	95
ecuación 85. Cálculo del factor de seguridad por fatiga (rediseño) .....	95



## **1. CAPÍTULO I. INTRODUCCION**

### **1.1. Problema**

#### **1.1.1. Antecedentes**

En la actualidad, la industria automotriz cuenta con una gran variedad de autopartes plásticas en la fabricación de sus componentes vehiculares, según Lucas Ramos en [1] el vehículo cuenta con un 14% de elementos mecánicos elaborados por una matriz polimérica, entre los materiales más destacados se encuentran el ABS, PC, PET, Nylon y PLA [2], los cuales indican Martínez y otros en [3] son utilizados como material base para la creación de nuevos polímeros, mejorando así sus propiedades mecánicas.

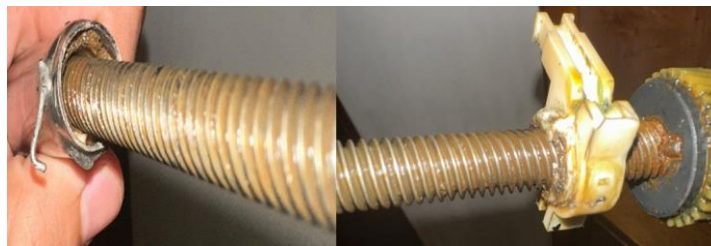
Según un estudio de mercado realizado por la empresa ICEX [4], menciona que el sector automotriz desempeña un papel fundamental en la economía ecuatoriana, abarcando una amplia gama de actividades que van desde el diseño y la producción de automóviles hasta la venta de piezas y repuestos. En términos de empleo, este sector genera un total de 155.943 puestos de trabajo en el país. Destacan especialmente el campo del mantenimiento y reparación de vehículos, que emplea a 87.000 personas, seguido de la venta de autopartes con 33.143 empleos, este sector emplea aproximadamente al 1,8% de la población económicamente activa, evidenciando su importancia en la economía nacional. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) [5], se observa que, en Ecuador solo un 1,36% de las industrias relacionadas con el sector automotriz, se dedican a la fabricación de piezas y autopartes para automotores.

En el Ecuador, las empresas que cuentan con flota vehicular de maquinaria pesada presentan impedimentos porque los fabricantes de piezas automotrices no suelen comercializar varias autopartes por separado, por lo que las empresas optan por cambiar todo el conjunto, desechando una gran cantidad de elementos en buen estado [6], estos desechos en gran variedad ocasionan un impacto ambiental negativo, pues según la Msc. Sanmartín y otros en [7] indican que en el Ecuador el 2.2% de desechos industriales son originados por chatarra.

Un componente automotriz que no cuenta con repuestos individuales es el actuador de aceleración, el que presenta rotura frecuente en el husillo de bloqueo. Esto causa que las empresas obtén por realizar adaptaciones provisionales hasta que se pueda implementar un

mantenimiento correctivo del actuador, por tal motivo se puede llegar a ocasionar un daño en la maquinaria por el uso de una adaptación de control manual [8], pues según Wroblaski en [8] “se ha demostrado que el uso de actuadores de aceleración reduce el consumo de combustible, los niveles de ruido y el desgaste del motor mediante la optimización de las RPM”.

Según un estudio de mercado realizado por la empresa El Oficial [9], que utilizó encuestas como método de investigación, se encontró que las excavadoras se posicionan en el segundo lugar entre las maquinarias más utilizadas en Ecuador, representando aproximadamente el 15% del total de maquinarias, dentro del grupo de excavadoras se incluyen las miniexcavadoras, algunas de las miniexcavadoras cuentan con el actuador eléctrico serie ET12-084. Según Håkan Persson en [10] menciona que este actuador debe funcionar alrededor de 50,000 horas de trabajo que equivale aproximadamente 8 años de funcionamiento, sin embargo un estudio de campo realizado de manera autónoma, demuestra que entre las 4,000 y 7,000 horas el sistema operativo automático entra en fallo, por lo tanto, al realizar una inspección visual del mecanismo se evidencia que la falla del actuador se presenta en el husillo de bloqueo produciendo una rotura como se observa en la fig. 1.



**Fig. 1.** Rotura en el husillo de bloqueo del actuador de aceleración.

El remplazo por daño del actuador de aceleración presenta varios problemas, entre los principales es que el fabricante no comercializa el husillo de bloqueo por separado, esto causa que se tenga que adquirir el módulo completo que llega a tener un costo de \$543.07 dólares [11], este valor aumenta alrededor de \$1000 dólares por los costos de importación e impuestos. El actuador de aceleración tendrá un plazo de entrega de 190 días como indica [11], durante este tiempo de parada las empresas que ofrezcan servicios de alquiler de miniexcavadoras estarían perdiendo \$25 dólares la hora por día laboral [12], el valor de pérdida hasta adquirir el nuevo módulo de aceleración y realizar el debido mantenimiento correctivo equivale aproximadamente \$4000 dólares por cada miniexcavadora parada, lo que supondría en pérdidas económicas muy elevadas generado por la fractura del husillo de bloqueo, por lo que

se plantea el desarrollo del presente proyecto de investigación donde se realizará el “rediseño y análisis del husillo de bloqueo del gobernador de aceleración de una miniexcavadora mediante sistema CAD-CAE”.

### **1.1.2. Importancia y alcances**

El proceso de cambio de la matriz productiva en Ecuador requiere la implementación de regulaciones que impulsen la producción local. Una medida clave en esta dirección es la exigencia emitida por la Cámara de industria Automotriz Ecuatoriana (CINAE) [13], la cual decreta que todos los vehículos ensamblados en el país cumplan con un mínimo del 19% de contenido local en autopartes ecuatorianas. La política en cuestión busca fortalecer la industria nacional y reducir la dependencia de importaciones en el sector automotriz. Por lo que las regulaciones vigentes benefician la creación de nuevos emprendimientos en la fabricación de autopartes al generar un mercado en crecimiento y promover la competitividad de la industria nacional. Según los datos recopilados en el Censo Nacional Económico del 2010 [5], se encontraron un total de 29,068 establecimientos económicos dedicados a actividades relacionadas con el comercio automotriz a nivel nacional, donde el 10% se dedica a la fabricación de piezas y accesorios para vehículos automotores, generando 11.5 millones de dólares, actualmente la Cámara de industria Automotriz Ecuatoriana (CINAE) [13] indica que hasta mayo de 2022, el sector de manufactura de autopartes ha generado más de 35 millones de dólares, por lo tanto, el sector de manufactura de autopartes ha experimentado un crecimiento económico significativo desde 2010 hasta mayo de 2022. destacándose especialmente los productos como neumáticos, baterías y sus componentes, así como transmisiones cardánicas y sus partes. El crecimiento del sector manufacturero ha generado en el país un aumento de plazas de trabajo. Según la Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo (ENEMDU) [14], en el año 2021, la mayor participación de la población enfocada en la industria manufacturera fue del 6%, en comparación con el 5.2% del año 2020.

En el ámbito automotriz orientado a la industria de la construcción, minería, agrícola y manufactura, que representa aproximadamente el 20.6% de las empresas en Ecuador según el INEC [15], las miniexcavadoras desempeñan un papel crucial en diversas tareas de excavación. No obstante, surgen dificultades al realizar el mantenimiento correctivo de las miniexcavadoras debido a la necesidad de importar autopartes para corregir las fallas. Uno de los principales desafíos en la importación de repuestos automotrices radica en la complejidad burocrática y

los trámites aduaneros, lo cual puede ocasionar retrasos y costos adicionales durante el proceso de adquisición. Según el Banco Central del Ecuador [16], el 37,9% de las importaciones en el país corresponden a repuestos automotrices, dado que las importaciones están vinculadas al crecimiento del sector automotriz. La estrategia de mercado de algunos fabricantes de autopartes consiste en vender conjuntos completos en lugar de piezas individuales para maximizar sus ventas y rentabilidad. Sin embargo, esta estrategia puede generar dificultades cuando se trata de encontrar autopartes individuales para componentes específicos, como el actuador de aceleración de una miniexcavadora.

Las tecnologías CAD-CAE mejoran el proceso de diseño y fabricación, incrementando la eficiencia, reduciendo costos y mejorando la calidad de las autopartes. El objetivo principal de este proyecto es determinar el modo de fallo del husillo de bloqueo del gobernador de aceleración, utilizando análisis de elementos finitos y cálculos matemáticos basados en las teorías de distorsión y esfuerzos cortantes para obtener el valor del factor de seguridad. Esto permitirá realizar un rediseño del husillo, asegurando que la nueva autoparte cumpla con las cargas exigidas por el actuador.

El rediseño del husillo de bloqueo ayuda a la reutilización del módulo de aceleración de una miniexcavadora. La reutilización contribuye a la sostenibilidad ambiental, al reducir la generación de residuos y la demanda de recursos. Al considerar el rediseño del husillo de bloqueo, resulta esencial tener en cuenta el material actualmente empleado, el polímero Acetal, el material en particular tiene una resistencia a la tracción de 65 MPA. Sin embargo, al considerar los esfuerzos del mecanismo, que se calculan utilizando la teoría de la distorsión y esfuerzos cortantes, se obtiene el valor de 75.23 MPA. Los resultados de los cálculos matemáticos indican que el material no es capaz de soportar los esfuerzos a los que el mecanismo está expuesto. Por consiguiente, se llevará a cabo una exploración de alternativas de materiales termoplásticos que ofrezcan propiedades mecánicas superiores y, al mismo tiempo, sean amigables con el medio ambiente.

El presente proyecto tiene beneficios directos tanto para los estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil que deseen explorar las aplicaciones de los sistemas CAD-CAE en el rediseño o mejora de autopartes enfocadas en la industria automotriz, como para las pequeñas y grandes empresas del país que cuenten con miniexcavadoras en su flota vehicular y utilicen el gobernador de aceleración ET12-084. Dichas empresas se

beneficiarán al tener acceso a técnicas de fabricación aditiva de autopartes, enfocadas para las maquinarias pesadas, la técnica de fabricación aditiva es ampliamente utilizada a nivel mundial debido a su impacto significativo en la reducción del tiempo de entrega y disminución de inactividad de la maquinaria. según un estudio realizado por [17], la técnica FDM permite la creación de piezas un 90% más rápido en comparación con las técnicas de fabricación tradicionales. Además, la manufactura aditiva también ofrece a las empresas la reducción de costos de producción, por lo que según un estudio de campo realizado de manera autónoma, las empresas que enfrentan pérdidas económicas alrededor de \$1000 dólares al momento de adquirir un nuevo actuador por importación pueden resolver el problema mediante la adquisición de autopartes fabricadas con técnicas FDM, como indica Gaio en [18] “una pieza obtenida por manufactura aditiva tiene al menos un costo del 50% de una pieza original importada”. Heineken es un claro ejemplo de empresas que utiliza técnicas de manufactura aditiva, y según Gaio [18], Heineken ha logrado un ahorro del 90% en el costo de piezas de repuesto, evitando pérdidas económicas significativas.

### **1.1.3. Delimitaciones**

El proyecto de investigación se llevará a cabo durante el periodo académico 62, que inicia en el mes de mayo del año 2023. Cumplirá con todos los requisitos establecidos por la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil para la presentación de proyecto técnico como opción de trabajo de titulación en la carrera de Ingeniería Automotriz.

## **1.2. Objetivos Generales y Específicos**

### **1.2.1 Objetivo General**

- A. Rediseñar y analizar el husillo de bloqueo para la reutilización del gobernador de aceleración de una miniexcavadora mediante aplicaciones CAD – CAE.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- A) Determinar el modo de fallo del husillo de bloqueo del gobernador de aceleración de una miniexcavadora, mediante análisis de elementos finitos.
- B) Rediseñar el husillo de bloqueo del gobernador de aceleración de una miniexcavadora considerando longitud y espesor admisibles por el mecanismo, a través de sistemas CAD – CAE.
- C) Establecer con métodos analíticos la mejor propuesta de rediseño, basado en el análisis de esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad de diseño, que se producen en el husillo de bloqueo del gobernador de aceleración de una miniexcavadora



## 2 CAPÍTULO II. MARCO TEORICO

### 2.1 Maquinaria pesada: Excavadoras y miniexcavadoras

Las excavadoras en un tipo de maquinaria propulsado por neumáticos u orugas en donde gracias a su conformación estructural, es capaz de realizar una rotación de 360 grados. Esta maquinaria cuenta con una cuchara metálica unida a la maquinaria por medio de balancines y plumas, este tipo de maquinaria tiene como función la de excavar, cargar, descargar, elevar y girar el producto, con el cual se está trabajando [19].



**Fig. 2.** Miniexcavadora [20].

Existen varios tipos de excavadoras, entre las que se encuentran las miniexcavadoras. Como su nombre indica, estas presentan dimensiones notablemente más pequeñas que las excavadoras estándar. Este tipo de maquinaria se diseñó para ejecutar las mismas funciones que una excavadora convencional, pero en espacios reducidos donde una excavadora de tamaño completo no sería viable. La ventaja de su reducido tamaño radica en su facilidad de transporte y su coste más económico. Las miniexcavadoras son ampliamente utilizadas en tareas de excavación y remoción de suelo, así como en otras labores donde su empleo agiliza y facilita las operaciones. [19].

Otras labores que realizan las miniexcavadoras van a depender de los implementos que le agreguen, esto hace que este tipo de maquinaria llame la atención de muchas compañías profesionales por su flexibilidad de realizar muchas labores con diferentes complementos. Estas labores e implementos se observan en la TABLA I.

TABLA I

TABLA DE LABORES E IMPLEMENTOS DE UNA MINIEXCAVADORA [21]

Labor	Implementos
Cargar o mover tierra	Cucharas, horquillas, hojas, compactadores
Perforación	Perforadores, martillos hidráulicos, martillos, ahoyadores
Manipulación de objetos	Pinzas, pulpos y cizallas
Jardinería	Segadoras, trasplantador de árboles, desbrozadoras y corta setos

### 2.1.1 Actuadores

Los actuadores son dispositivos mecánicos o electromecánicos que convierten una señal de entrada en una acción física. Su función es generar movimiento, fuerza o algún tipo de cambio en un sistema o mecanismo en respuesta a una señal de control. Los actuadores son esenciales en una amplia gama de aplicaciones, desde la industria y la robótica hasta la automatización y la electrónica de consumo.

#### 2.1.1.1 Tipos de Actuadores.

Como se observa en la Fig. 3 los actuadores se clasifican en varias categorías según su principio de funcionamiento y aplicación.

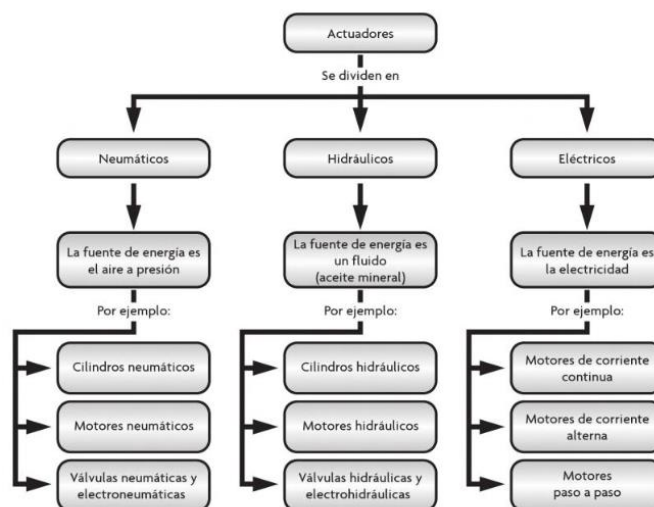


Fig. 3. Tipos de actuadores [22].

## Aplicaciones

Los actuadores desempeñan un papel esencial en una amplia gama de aplicaciones en diferentes campos. En la industria, son fundamentales para el control de procesos automatizados, así como para gestionar maquinaria y sistemas de producción de manera eficiente. En el ámbito de la robótica, estos dispositivos posibilitan el movimiento y la precisión en la manipulación de brazos y extremidades robóticas, ampliando las capacidades de la automatización. En la electrónica, su utilidad radica en la activación de interruptores, botones y mecanismos de enfoque presentes en cámaras y dispositivos electrónicos cotidianos. Además, en la industria automotriz, son responsables de operar funciones vitales como las ventanas, espejos, sistemas de dirección y frenado, contribuyendo a la seguridad y comodidad de los vehículos. En el campo aeroespacial, controlan con precisión las superficies móviles en aviones y satélites, asegurando su funcionamiento adecuado en entornos desafiantes. Por último, en el ámbito médico, los actuadores son esenciales en la creación de equipos médicos y dispositivos de prótesis que mejoran la calidad de vida de las personas.

### Actuadores eléctricos.

Los ingenieros estadounidenses utilizaron husillos de bolas para construir la primera generación de actuadores lineales eléctricos por la década de 1960 como se observa en la Fig.3., estos fueron desarrollados para que se puedan utilizar como equipos para automatizar procesos, proporcionar control en equipos, facilitar trabajos difíciles, tediosos o manuales.



**Fig. 4.** Evolución de los actuadores eléctricos [12].

Estos actuadores son utilizados en aplicaciones industriales como son los vehículos agrícolas y de construcción, estos actuadores es la forma más sencilla de pasar de un movimiento manual a un movimiento motorizado, la electricidad es la fuente de este, por ende,

es la más fácil y disponible, la alimentación es de corriente alterna (CA) y corriente continua (CC).

Algunas ventajas de estos actuadores como menciona [23] es de una mejor capacidad de control, complejidad reducida, menos consumo energético, mantenimiento reducido o nulo, menor tiempo de inactividad y montaje de la máquina, con esto se con los actuadores lineales eléctricos se buscan mejorar y reducir, es decir:

***Mejorar:***

- Eficiencia
- Fiabilidad
- Productividad
- Rendimiento
- Controlabilidad

***Reducir:***

- Complejidad
- Ingeniería
- Componentes
- Costos generales
- Tiempos de instalación

***Aplicaciones del actuador eléctrico.***

Las aplicaciones del actuador son muy diversas entre ellas están:

- Dispositivo de elevación
- Montacargas
- Cabinas de conductores
- Cosechadoras y dispositivos agrícolas
- Trenes
- Tranvías
- Autobuses y otros transportes públicos

- Elevadores de escaleras
- Elevadores de pacientes y silla de rueda

#### *Actuador eléctrico serie ET12-084*

El actuador eléctrico ET12-084, tal como se muestra en la Fig. 5, ha sido diseñado especialmente para aplicaciones industriales, destacándose por su robusta carcasa de aluminio que proporciona una eficaz protección contra polvo y corrosión. Entre sus características más destacadas se incluye un revestimiento anticorrosión aplicado en su carcasa, lo que garantiza una durabilidad excepcional con requisitos mínimos de mantenimiento. Además, ofrece opciones electrónicas integradas, brindando características de alta gama a un precio altamente competitivo. Asimismo, el actuador viene equipado con orificios de montaje incorporados, simplificando su instalación y adaptación en diversas configuraciones.



**Fig. 5.** Actuador eléctrico serie ET12-084 [12].

La miniexcavadora E26 modelo ACRA16283 utiliza un actuador eléctrico serie ET12-084 para regular el flujo de combustible al motor a través de la bomba de inyección. Esta maquinaria tiene dos velocidades de operación y se caracteriza por su facilidad de mantenimiento gracias a los compartimentos que permiten un acceso a los elementos internos, agilizando así las labores de mantenimiento preventivo.

En la TABLA II, se encuentran las especificaciones mecánicas detalladas del husillo de bloqueo, dichas características son especialmente relevantes para comprender el

funcionamiento del mecanismo. Estos detalles son esenciales para tener en cuenta, dado que tienen un impacto directo en cómo el sistema opera y se comporta.

**TABLA II**  
**TABLA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ACTUADOR [23]**

<b>Especificaciones mecánicas</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Unidad</b>	
<b>Máx. Carga estática</b>	[N (lbf)]	90 (20)
<b>Max. Carga dinámica</b>	[N (lbf)]	45 (10)
<b>Velocidad sin carga/max, carga</b>	[mm/s (pulgadas/s)]	96/83 (3,7/3,3)
<b>Longitud de carrera</b>	[mm(pulgadas)]	50.8 (2)
<b>Longitud retraída</b>	[mm(pulgadas)]	184,7 (7,27)
<b>Vida operativa</b>	[ciclos]	500 0 00
<b>Límite de temperatura de funcionamiento</b>	[°C (F)]	- 40 – 85 (- 40 – 185)
<b>Ciclos de trabajo</b>	[%]	50
<b>Torque de restricción</b>	[Nm (lbf-in)]	0
<b>Peso</b>	[kg (lbf)]	2.5

## 2.2 Materiales utilizados en la industria automotriz.

La industria automotriz emplea una amplia gama de materiales estratégicamente seleccionados para fabricar vehículos con alto rendimiento y seguridad. Entre los materiales más comunes se encuentra el acero, utilizado por su durabilidad en chasis y estructuras. El aluminio se destaca por su ligereza y resistencia a la corrosión, ideal para componentes que buscan eficiencia de combustible. Además, los plásticos reforzados, como la fibra de vidrio y de carbono, encuentran su lugar en paneles de carrocería gracias a su equilibrio entre ligereza y resistencia. Los componentes del motor encuentran su forma en el hierro y aluminio fundidos, mientras que el caucho se utiliza para juntas y sellos. La combinación de estos materiales, junto con otros como cobre, titanio y materiales compuestos, define la apariencia, el rendimiento y la seguridad de los vehículos modernos en constante evolución.

### 2.2.1 Tipos de materiales

En la industria automotriz se utilizan una amplia variedad de materiales para cumplir con los requisitos específicos de rendimiento, seguridad y eficiencia. Los aceros de alta resistencia se emplean en la estructura para brindar solidez y absorción de impactos, mientras que los materiales compuestos, como la fibra de carbono, se utilizan en partes que requieren una gran rigidez y bajo peso. Los plásticos se aplican en componentes interiores y exteriores debido a su versatilidad y capacidad de moldeo. Entre los materiales más destacados que se han empleado en esta matriz polimérica, se encuentran: [2]

1. ABS
2. Acetal
3. PET
4. PLA

#### 2.2.1.1 Acetal (POM)

El acetal es del grupo de los plásticos en la cual proporciona alta resistencia mecánica y rigidez, tiene mayor facilidad de mecanizado además de una poseer una mejor estabilidad dimensional, se caracteriza por su bajo coeficiente de fricción y mejores propiedades de desgaste en ambientes húmedos, el acetal tiene como propiedad de absorber cantidades mínimas de humedad con lo cual las propiedades mecánicas del acetal se mantienen constantes en diferentes ambientes.



**Fig. 6.** Rueda y corona dentada de acetal [24].

Este plástico es ideal para las partes mecánicas que tienen pequeña tolerancia además de aisladores eléctricos que requieren resistencia mecánica y rigidez, según [25] el acetal tiene las siguientes características y usos:

***Características:***

- Facilitar el mecanizado de la pieza
- Baja absorción de humedad
- Alta resistencia mecánica y rigidez

***Usos:***

- Engranajes
- Componentes eléctricos
- Rodillos
- Componentes de industria de manufactura

### **2.2.1.2 Ácido poliláctico (PLA)**

El ácido poliláctico o mayormente conocido como PLA es un tipo de polímero muy usado en la impresión 3D y que tiene como característica ser un polímero bioactivo y biodegradable, haciéndolo amistoso con el medio ambiente. El PLA está conformado por componentes primarios de ácido láctico. El ácido poliláctico se crea a partir de fuentes renovables, por ello el PLA ayuda a solucionar lo que es el problema mundial de la erradicación de los residuos sólidos, además, tiene como ventaja el no ser un producto derivado del petróleo, lo cual reduce la dependencia del ser humano a materias primas provenientes del combustible fósil. Actualmente el ácido poliláctico es el segundo bioplástico más producido y consumido en el mundo en términos de volumen [26].





**Fig. 7.** Mangueta de vehículo de formula Student impresa en PLA [27].

El PLA es fabricado con el ácido láctico y en la industria el ácido láctico se produce gracias a la fermentación bacteriana de carbohidratos que se encuentran cien por ciento controlados. Estos carbohidratos, como no se depende del petróleo y son amigables con el medio ambiente, llegan ser de almidón de maíz, raíces de mandioca o caña de azúcar logrando así que el proceso sea renovable y sostenible [26].

#### ***Ventajas del PLA***

- Cuenta con un proceso de fabricación sostenible y es de naturaleza biodegradable.
- Alcanza su punto de fusión a los 150-160 grados Celsius, lo cual lo hace un material termoplástico.
- Al ser un termoplástico se vuelve a calentar, enfriar y volver a calentar, para moldear una nueva pieza sin ninguna degradación.
- Es un material que se lo llega a reciclar sin problema de contaminación.
- Al momento de calentarse no emite toxinas dañinas para el ser humano.

#### ***Desventajas del PLA***

- Es un material inadecuado para aplicaciones donde se está sometido a altas temperaturas.
- Cuenta con problemas de permeabilidad a largo plazo debido a que es un material biodegradable.

- Es un material frágil, el cual no va a contar con una gran dureza y resistencia, por lo cual no debe estar sometido a grandes esfuerzos.

### **2.2.1.3 Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)**

El ABS es un plástico creado por la polimerización consecuyente de tres monómeros nombrados con anterioridad [28]. El ABS como está compuesto de tres monómeros cada una le brinda al material características diferentes, logrando así que al momento de formar el terpolímero denominado ABS, el material sea muy cotizado y usado a nivel mundial [29, p. 95]. Cada monómero le da al ABS las siguientes características como:

- Alto nivel de tenacidad, inclusive en frío proporcionado por el monómero butadieno
- Material con gran rigidez proporcionado por el monómero acrilonitrilo y estireno
- Gran estabilidad térmica proporcionado por el monómero acrilonitrilo
- Alta resistencia al ataque químico proporcionado por el monómero acrilonitrilo
- Resistencia al agrietamiento por tensión ambiental
- El costo del material es accesible
- Cuenta con una buena durabilidad proporcionado por el monómero acrilonitrilo
- Tiene bajo coeficiente de expansión térmica
- Gran facilidad al moldeo del material, para la fabricación de piezas
- Gran resistencia al impacto y a la fusión proporcionado por el monómero butadieno
- Es brillante gracias a las características que proporciona el estireno
- Tiene su punto de fusión a los 220-250 grados centígrados

De hecho, según la referencia [28] “la resistencia al impacto optimizada del ABS se logra controlando el tamaño, la distribución y la microestructura de las partículas de caucho”, ya que, según las investigaciones de las propiedades del material, si se aumenta caucho de butadieno y el peso molecular de la fase SAN antes de la injertación, se creará un ABS con mayor tenacidad.



**Fig. 8.** Parachoques fabricados de ABS [30].

El ABS también tiene sus desventajas, como lo es ser un material no renovable ya que, a diferencia del PLA, el ABS está hecha en base de petróleo, causando que el ABS no sea un material reciclable, ni degradable. El ABS a su vez es un material toxico a altas temperaturas, por lo cual emite olores y humos que llegan a ser dañinos para el ser humano, es muy recomendable trabajar con este material en lugares abiertos y con buena ventilación [31].

#### **2.2.1.4 Acrilonitrilo butadieno estireno recubierto con fibra de vidrio (ABS-GF)**

A diferencia del ABS sin ningún refuerzo, el ABS reforzado con fibra de vidrio ofrecen algunos beneficios como excelente rentabilidad, múltiples colores, fácil mecanizaron y unión, por lo general el ABS reforzado con fibra de vidrio tiene el 30% de recubrimiento en el ABS.



**Fig. 9.** Retrovisores fabricados de ABS-GF [32].

Las aplicaciones comunes del ABS-GF son:

- Construcción.
- Automotriz.
- Industria aeronáutica y náutica.

Las ventajas del ABS-GF según la empresa “Plásticos Bello” [33] son los siguientes:

- Baja deformación y encogimiento.
- Rígido.
- Buena aplicación en el área de construcción.
- Altas propiedades terminas.

### ***Propiedades mecánicas del ABS-GF***

En la TABLA III se observan algunas de las propiedades mecánicas del ABS-GF las cuales son importantes para realizar la simulación, en donde se verificará si el material es el ideal para la función necesaria.

**TABLA III**  
**PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ABS-GF [33]**

	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Resistencia a la tracción</b>	MPA	78
<b>Módulo de flexión</b>	GPA	5.63

**Nota:** Propiedades mecánicas proporcionadas por el fabricante Plásticos Bello.

#### **2.2.1.5 PLA reforzado con Fibra de Carbono (PLA-CF)**

En el mundo de la impresión 3D para seguir innovando en materiales muy accesibles, muchas veces se combinan materiales para la mejora en sus propiedades mecánicas, físicas, químicas, etc., este es el caso del material conocido como PLA con fibra de carbono como se muestra en la Fig. 5., en donde según el fabricante de este filamento, el porcentaje de carbono varía entre el 15% y 10%, esta fibra de carbono es sintética, por lo que para obtener una fibra de carbono se deberá reunir una gran cantidad de átomos de carbono para formar este compuesto, la fibra de carbono mejora las propiedades mecánicas del PLA, pues aumenta su rigidez pero a consecuencia disminuye la flexibilidad del PLA, por lo que este tipo de material

podrá ser utilizado para productos como carcasas, hélices, herramientas, del cual no se necesita que tengan flexibilidad, si no una buena rigidez [34].



**Fig. 10.** Aplicaciones de materiales plásticos con fibra de carbono [35].

#### 2.2.1.6 Polietileno Tereftalato de Glicol (PETG)

El material PETG consiste en una placa de copoliéster sin color transparente los cuales combinan propiedades de termoformado y mecanización con excelentes resistencias al impacto, el material se resiste a la exposición al fuego, genera poco humo si se encuentra en combustión.



**Fig. 11.** Pieza funcional fabricada en PETG [36].

### ***Propiedades mecánicas del PETG.***

El PETG (tereftalato de polietileno glicol modificado) ofrece una combinación única de propiedades mecánicas altamente deseables en diversas aplicaciones. Su notable tenacidad y resistencia al impacto lo convierten en un material ideal para componentes que enfrentan condiciones de carga dinámica. Además, su flexibilidad y capacidad de deformación antes de la rotura lo hacen altamente adaptable y resistente a la fractura. Estas propiedades, combinadas con su excelente resistencia química y capacidad de impresión en 3D, hacen que el PETG sea una elección popular para una amplia gama de aplicaciones industriales.

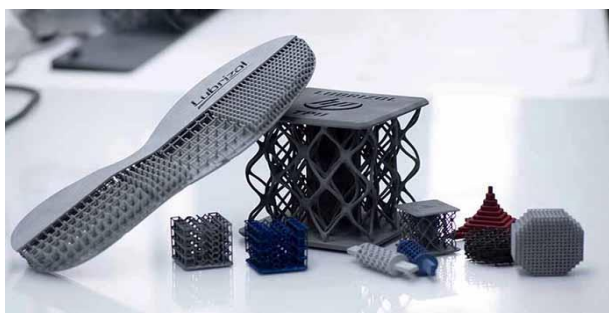
**TABLA IV**  
**PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PETG [37]**

	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Resistencia a la tracción</b>	MPA	55
<b>Módulo de flexión</b>	N/mm <sup>2</sup>	2300
<b>Alargamiento a la rotura</b>	%	40
<b>Modulo elástico</b>	N/mm <sup>2</sup>	2200

**Nota:** Propiedades mecánicas de Polimer Tecnic.

#### **2.2.1.7 Poliuretano Termoplástico (TPU)**

El poliuretano termoplástico (TPU) es un tipo de elastómero altamente versátil que ofrece propiedades únicas, permitiendo un alto rendimiento y flexibilidad durante su procesamiento. Se trata de un polímero ideal para diversas aplicaciones en mercados como calzado, alambres y cables, películas y láminas, compuestos, adhesivos y piezas moldeadas especializadas. Su uso se extiende por más de 60 años, brindando beneficios a diseñadores, fabricantes y usuarios finales.



**Fig. 12.** Piezas fabricadas en TPU [38].

La característica distintiva del TPU según [39] es su capacidad para adaptar su dureza según las necesidades. Es tan blando como el caucho o tan duro como los plásticos rígidos. Asimismo, su apariencia y tacto también son altamente versátiles, pudiendo ser transparente o coloreado, y ofreciendo diversas opciones de suavidad al tacto y adhesión. En esencia, el TPU representa una fusión única entre el caucho y los plásticos, lo que lo convierte en una opción excepcionalmente flexible para diversas aplicaciones industriales.

#### **2.2.1.8 Policarbonato (PC)**

El policarbonato (PC) es un tipo de plástico termoplástico amorfo conocido por su excepcional resistencia al impacto y su transparencia. Además, muestra buenas propiedades de aislamiento eléctrico y una resistencia química moderada.

Este material está disponible en una variedad de formas, como varillas y placas, y es ampliamente utilizado en la industria automotriz para fabricar paneles de instrumentos, bombas, válvulas y otros componentes como indica [40]. También tiene aplicaciones en diversos sectores para producir equipos de protección, dispositivos médicos, piezas mecánicas internas y más.



**Fig. 13.** Faro de vehículo fabricado en PC [41].

### **2.2.2 Selección de materiales**

La selección de materiales en ingeniería representa un proceso esencial y estratégico que influye directamente en el rendimiento, durabilidad y costo de los productos y sistemas. Esta decisión impacta en todas las etapas del ciclo de vida, desde el diseño y fabricación hasta el uso y eventual reciclaje. La elección adecuada de materiales considera factores como las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas, así como la disponibilidad, costos y

requisitos específicos del proyecto. La selección acertada puede traducirse en una mayor eficiencia operativa, reducción de peso, aumento de la vida útil y disminución de costos de mantenimiento. Además, la elección de materiales también tiene implicaciones ambientales, influyendo en la sostenibilidad del producto y la huella ecológica. En última instancia, la selección de materiales se erige como un pilar fundamental en la ingeniería moderna, donde la optimización de propiedades y características específicas de los materiales conduce a la creación de soluciones técnicas innovadoras y exitosas.

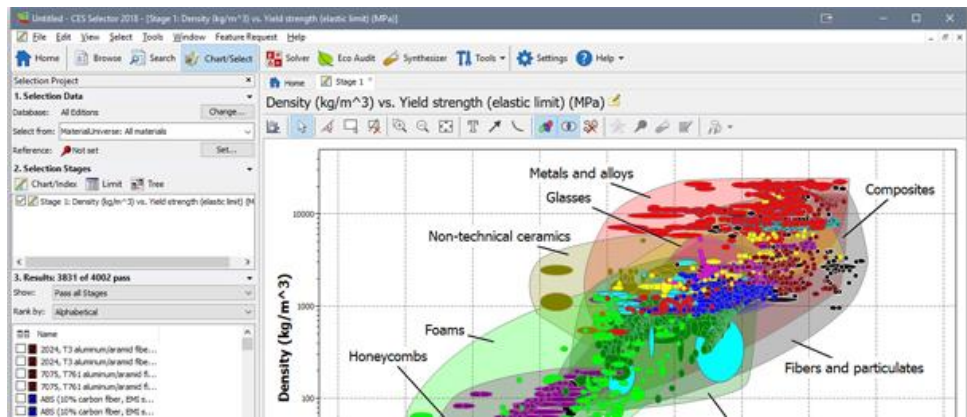
### **2.2.2.1 Métodos de selección de material**

Debido a la pluralidad de factores que influyen en la selección de materiales, aquellos encargados de la elección determinan cuáles propiedades resultan más relevantes para la aplicación específica y, en base a estas, efectúan la selección correspondiente. Por lo general, los métodos para la selección de materiales realizan una refinación más o menos extensa de estos parámetros, los métodos más utilizados según [42], son el método gráfico en donde los mapas de materiales son de gran ayuda a la hora de comparar uno o más materiales entre sí, método tradicional el cual consiste en la experiencia del diseñador o del ingeniero encargado del cambio del material, este decide cual material es el más adecuado para su uso, el método con ayuda de bases de datos el cual en la web se encuentran disponibles una diversidad de bases de datos concernientes a materiales, las cuales han sido desarrolladas con fines de acceso público o están disponibles a través de proveedores de materiales. Dichas bases de datos son el producto de investigaciones en pruebas de materiales y su información es accesible para su consulta.

#### ***ANSYS Granta Selector***

Esta herramienta virtual ofrece una base de datos actualizada de materiales y procesos, manteniéndolos al día. Además, permite realizar análisis de resultados y comparar materiales mediante gráficos avanzados. Sus características notables incluyen la capacidad de buscar, representar y comparar datos de materiales, seleccionar materiales, encontrar sustituciones y equivalencias de propiedades, y realizar comparaciones detalladas entre diferentes tipos de materiales.





**Fig. 14.** Funciones del Granta Selector en la selección del material [43].

## 2.3 Diseño mecánico.

El diseño, en su esencia más amplia, representa el proceso creativo y estructurado mediante el cual se conciben soluciones para diversos desafíos y necesidades. Ya sea en el ámbito industrial, gráfico, arquitectónico o tecnológico, el diseño implica la combinación de la visión artística y la funcionalidad práctica para idear productos, sistemas o entornos que satisfagan requerimientos específicos. A través de la planificación meticulosa, la exploración de conceptos, la iteración y la atención a los detalles, los diseñadores transforman ideas en realidades tangibles, mejorando la vida cotidiana y contribuyendo al progreso en distintas disciplinas.

### 2.3.1 Teoría De Diseño

Las teorías de diseño no solo ofrecen un enfoque estructurado para la creación de soluciones técnicas, sino que también ayudan a los ingenieros a sortear desafíos complejos y afrontar incertidumbres inherentes al proceso de diseño. Estas teorías engloban una amplia gama de enfoques, desde métodos clásicos respaldados por décadas de experiencia y resultados empíricos, hasta enfoques más modernos que aprovechan la modelación computacional y la simulación. Al proporcionar un marco conceptual sólido, las teorías de diseño facilitan la identificación temprana de posibles fallas o limitaciones en el diseño, lo que conduce a iteraciones más efectivas y, en última instancia, a productos finales de mayor calidad y confiabilidad. Estas teorías también permiten un análisis sistemático de las variables que influyen en el diseño, desde propiedades de materiales hasta restricciones económicas y ambientales. Al considerar una variedad de factores interconectados, los ingenieros toman

decisiones informadas sobre cómo lograr un equilibrio entre diferentes aspectos, como resistencia, seguridad, costo y sostenibilidad. Además, las teorías de diseño fomentan la exploración de enfoques innovadores y creativos al proporcionar un marco que guía la búsqueda de soluciones fuera de los límites convencionales.

### 2.3.1.1 Teoría De Distorsión

La teoría de la distorsión, también conocida como la teoría de Von Mises, es un concepto fundamental en la mecánica de materiales y la ingeniería estructural. Esta teoría centra el estudio del comportamiento de materiales bajo cargas mecánicas, especialmente cuando se enfrentan a esfuerzos cíclicos o repetitivos. A diferencia de las teorías basadas en el esfuerzo máximo, la teoría de la distorsión considera la acumulación de distorsiones plásticas como el factor crítico para predecir la falla en materiales dúctiles. Esta teoría ha demostrado ser valiosa en el diseño y la evaluación de componentes sometidos a cargas variables, como estructuras y componentes mecánicos, permitiendo una comprensión más completa y precisa de la resistencia y la vida útil de los materiales (1): [44]

$$\sigma_{VonMises} = \left\{ \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

**Donde:**

$\sigma$  = Esfuerzo normal

$\sigma_{VonMises}$  = Esfuerzo de Von Mises

El factor de seguridad de Von Mises, basado en la teoría de la distorsión de Von Mises, desempeña un papel esencial en ingeniería. Al evaluar la relación entre la resistencia de los materiales y las cargas aplicadas, este factor indica la capacidad de las estructuras para resistir tensiones sin sufrir deformación plástica o fallas. Se utiliza tanto en el diseño como en la toma de decisiones, considerando incertidumbres y variaciones en materiales y cargas. Su aplicación proporciona seguridad y optimiza la vida útil de los componentes, contribuyendo significativamente a la integridad y confiabilidad de sistemas en diversas disciplinas de la ingeniería. La ecuación del factor de seguridad está dada en relación con el límite de fluencia del material y a las tensiones aplicadas (2).

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_{VonMises}} \quad (2)$$

**Donde:**

$S_y$ = Resistencia a la fluencia del material

$FS$ = Factor de seguridad por esfuerzo de Von Mises

$\sigma_{VonMises}$ = Esfuerzo de Von Mises

### 2.3.1.2 Teoría De Esfuerzo Cortante

El criterio de esfuerzos cortantes es conocido como criterio de flexibilidad de Tresca, esta se basa en la teoría de cortadura máxima la cual predice que el fallo de un material dará lugar cuando la tensión de cortadura máxima alcance el límite de fluencia que provoca el material en una prueba de tensión simple, está dado en (3): [45]

$$\tau_{max} \geq \frac{S_y}{2} \quad (3)$$

**Donde:**

$S_y$ = Resistencia a la fluencia del material

$\tau_{max}$ = Tensión máxima cortante

La tensión máxima absoluta ( $\tau_{max}$ ) es mayor que las tensiones  $\sigma_{1-2}$ ,  $\sigma_{2-3}$ ,  $\sigma_{1-3}$  en los cuales están expresadas en (4-6):

$$\sigma_{1-2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (4)$$

$$\sigma_{2-3} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \quad (5)$$

$$\sigma_{1-3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (6)$$

En donde,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  son las tensiones principales en orden descendente, el factor de seguridad se expresa por la siguiente forma en (7) :

$$FS = \frac{S_y}{(2 * \tau_{max})} \quad (7)$$

**Donde:**

$S_y$ = Resistencia a la fluencia del material

$t_{max}$ = Tensión máxima cortante

$F_s$ = Factor de seguridad por corte

**2.3.2 Fatiga en materiales**

La fatiga de materiales juega un papel crítico en la ingeniería, ya que aborda la degradación y fractura de materiales sometidos a cargas cíclicas, un desafío fundamental en el diseño de componentes estructurales y mecánicos. En este contexto, la teoría de Goodman surge como un enfoque importante para evaluar la resistencia a la fatiga. Esta teoría considera la influencia combinada de las tensiones medias y alternantes en el límite de resistencia a la fatiga de un material. Además de la teoría de Goodman, otros factores esenciales entran en juego, como la concentración de tensiones en geometrías irregulares, la calidad superficial del material y la posible presencia de corrosión. La comprensión de estos elementos y su consideración en el diseño y análisis de componentes son esenciales para garantizar la durabilidad y seguridad de las estructuras y máquinas sometidas a cargas cíclicas en entornos reales.

**2.3.2.1 Teoría de Goodman**

Esta teoría es también conocida como línea de Goodman, está basada en la teoría de Soderberg en la que establece que la pieza se está analizando va a resistir siempre y cuando se cumplan ciertas condiciones operativas, según los valores de tensión media y tensión alternante se obtendrán los valores de fatiga de la pieza analizada, la teoría Goodman utiliza la última resistencia a la tensión a diferencia de Soderberg, la ecuación que defina la teoría de Goodman esta expresada en (8): [46]

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = 1 \quad (8)$$

En donde  $S_{ut}$  es la resistencia ultima a la tensión, para que la pieza no sufra alguna falla esta debe cumplir la siguiente condición según (9):

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} \leq 1 \quad (9)$$

El coeficiente de seguridad esta expresada en (10):

$$n_s = \frac{1}{\frac{\sigma_m}{S_{ut}} + \frac{\sigma_a}{S_e}} \quad (10)$$

**Donde:**

$\sigma_m$ = Esfuerzo medio

$\sigma_a$ = Esfuerzo alternante

$S_{ut}$ = Resistencia ultima a la tracción del material

$S_e$ = Limite de resistencia a la fatiga

$n_s$ = Factor de seguridad por fatiga

### 2.3.2.2 Resistencia a la fatiga

En la actualidad, es común realizar ensayos de fatiga para determinar los límites de resistencia, aunque este procedimiento resulta largo y laborioso. Por lo general, se prefieren los ensayos de esfuerzo en lugar de los ensayos de deformación para evaluar dichos límites de resistencia. Sin embargo, para el diseño preliminar, la creación de prototipos y algunos análisis de falla, es necesario contar con un método más rápido que permita estimar los límites de resistencia de manera eficiente, se estima con las fórmulas dadas en (11).

$$S_e' = \left\{ \begin{array}{ll} 0.5 S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ Kpsi (1400 Mpa)} \\ 100 \text{ Kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ Kpsi} \\ 700 \text{ Mpa} & S_{ut} > 1400 \text{ Mpa} \end{array} \right\} \quad (11)$$

### 2.3.2.3 Factores que intervienen en el límite de resistencia a la fatiga

Estos factores influyen en la respuesta y capacidad de los materiales para resistir cargas cíclicas repetidas a lo largo del tiempo. La calidad intrínseca del material, los procesos de manufactura, el diseño de la pieza, las dimensiones, las cargas aplicadas, las condiciones térmicas, ambientales y los números de ciclos son consideraciones cruciales que afectan la resistencia a la fatiga. La comprensión y análisis de estos factores son esenciales para la predicción precisa de la durabilidad y vida útil de componentes y estructuras sujetos a tensiones fluctuantes. Mediante la consideración de estos factores, se busca garantizar que los materiales y las estructuras sean capaces de resistir cargas cíclicas repetidas sin experimentar fallas prematuras,

contribuyendo a un diseño robusto y confiable en diversas aplicaciones, según [47] todos estos factores se representan de la siguiente manera en (12):

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e K_f S'_e \quad (12)$$

**Donde:**

$k_a$ = factor de modificación de la condición superficial

$k_b$ = factor de modificación del tamaño

$k_c$ = factor de modificación de la carga

$k_d$ = factor de modificación de la temperatura

$k_e$ = factor de confiabilidad

$K_f$ = factor de modificación de efectos varios

$S'_e$ = límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso.

#### ***Factor de modificación de la superficie ( $k_a$ )***

El Factor de Superficie o “ $k_a$ ” es un concepto relevante en el análisis de fatiga que considera la influencia de la condición superficial de un componente en su resistencia a la fatiga. Este factor ajusta la resistencia del material teniendo en cuenta la rugosidad superficial y otros defectos que podrían propiciar la formación y propagación de grietas durante los ciclos repetidos de carga. Al multiplicar este factor por el esfuerzo aplicado, se toman en consideración los efectos de la calidad superficial en la vida a fatiga esperada del material. En esencia, el factor de superficie permite incorporar cómo la condición de la superficie afectando la resistencia y durabilidad de un componente frente a cargas cíclicas repetidas (13).

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (13)$$

La variable “ $S_{ut}$ ” es la resistencia máxima a la tensión del material, el factor “ $a$ ” y exponente “ $b$ ” se observan en el ANEXO 1.

#### ***Factor de modificación del tamaño ( $k_b$ )***

El Factor de tamaño o  $k_b$  es un término utilizado en el análisis de fatiga para considerar el efecto del tamaño de la muestra o del componente en la resistencia a la fatiga. Este factor ajusta la resistencia del material en función de su tamaño, ya que componentes de diferentes

dimensiones tienen diferentes sensibilidades a las tensiones cíclicas repetidas, el tamaño de la muestra o componente influye en cómo se distribuyen las tensiones y deformaciones durante los ciclos de carga, lo que a su vez afecta la formación y propagación de grietas.

En la ecuación de Goodman o en otros métodos de análisis de fatiga, el factor de tamaño ( $k_b$ ), se multiplica por el esfuerzo aplicado para reflejar cómo el tamaño del componente afecta su vida útil ante cargas cíclicas repetidas como se muestra en (14).

$$k_b = \left\{ \begin{array}{ll} \left( \frac{d}{0.3} \right)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ \left( \frac{d}{7.62} \right)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{array} \right\} \quad (14)$$

Para carga axial no interviene este parámetro por ende es igual a 1, para una sección redonda sólida o huecas no rotatorias se toma en cuenta la dimensión efectiva ( $d_e$ ) la cual está dada en (15).

$$d_e = 0.370d \quad (15)$$

**Donde:**

**d**= diámetro inferior

### ***Factor de modificación de la carga ( $k_c$ )***

Cuando se realizan ensayos de fatiga con carga de flexión rotatoria, axial (empujar y jalar) y de torsión, los límites de resistencia a la fatiga varían con la resistencia a la tensión última ( $S_{ut}$ ). Es decir, los límites de resistencia a la fatiga para diferentes tipos de carga son diferentes y están influenciados por la resistencia a la tensión última del material. Esto significa que los materiales tienen diferentes niveles de resistencia a la fatiga dependiendo del tipo de carga al que estén sometidos y de su resistencia a la tensión última, los valores de este parámetro están expresados en (16).

$$k_c = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{flexion} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsion} \end{array} \right\} \quad (16)$$

### ***Factor de modificación de la temperatura ( $k_d$ )***

Cuando las temperaturas de operación son más bajas que la temperatura ambiente, existe una alta posibilidad de fractura frágil, por lo que es necesario investigar esta posibilidad en primer lugar. Por otro lado, cuando las temperaturas de operación son más altas que la temperatura ambiente, se debe dar prioridad a investigar el fenómeno de fluencia, ya que la resistencia a la fluencia disminuye rápidamente con la temperatura. Es importante considerar el flujo plástico que ocurren en materiales que operan a temperaturas elevadas bajo cualquier esfuerzo aplicado, este parámetro está expresado en (17).

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad (17)$$

Los valores de resistencia a la tensión a la temperatura de operación ( $S_T$ ) y la resistencia a la tensión a temperatura del ambiente ( $S_{RT}$ ) se muestran en el ANEXO 2.

#### ***Factor de confiabilidad ( $k_e$ )***

Según [47] un estudio realizado por Haugen y Wirching demostraron desviaciones estándar de la resistencia a la fatiga de menos del 8% por ende el factor de confiabilidad se expresa de la siguiente manera:

$$k_e = 1 - 0.08Z_a \quad (18)$$

Los valores de variación de transformación ( $Z_a$ ) y el factor de confiabilidad porcentuales se detallan en el ANEXO 3.

#### ***Factor de concentración de esfuerzo por fatiga ( $K_f$ )***

El factor “ $K_f$ ” se conoce comúnmente como el factor de concentración de esfuerzo por fatiga, y el subíndice “ $f$ ” se debe a esa asociación. Es útil considerar el factor “ $K_f$ ” como un factor de concentración de esfuerzo reducido en comparación con “ $K_t$ ”, debido a la disminución de la sensibilidad a la muesca. El factor resultante se define mediante la ecuación (19).

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad K_{fs} = 1 + q_s(K_{ts} - 1) \quad (19)$$

**Donde:**



$K_t$ = Factor de concentración de esfuerzos normales

$K_{ts}$ = Factor de concentración de esfuerzos cortantes

$q$ = Sensibilidad a la muesca normal

$q_s$ = Sensibilidad a la muesca cortante

El parámetro de la sensibilidad a la muesca la cual se representa con la “q”, está definido en (20) y el valor del parámetro “ $K_t$ ” y “ $K_{ts}$ ” se visualiza en el ANEXO 4 y 5, y el valor de  $\sqrt{a}$  en el ANEXO 6.

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} \quad o \quad q_s = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} \quad (20)$$

**Donde:**

$\sqrt{a}$ = Coeficiente de Neuber

$r$ = radio de la muesca

Las ecuaciones (21) y (22) expresan los factores que influyen para la obtención de los valores de esfuerzo alternante y medio en la cual se obtiene el factor de seguridad y de fatiga del mecanismo.

$$\sigma'_a = \left\{ \left[ (K_f)_{flexion} (\sigma_a)_{flexion} + (K_f)_{axial} \frac{(\sigma_a)_{axial}}{0.85} \right]^2 + 3 \left[ (K_{fs})_{torsion} (\tau_a)_{torsion} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (21)$$

$$\sigma'_m = \left\{ \left[ (K_f)_{flexion} (\sigma_m)_{flexion} + (K_f)_{axial} (\sigma_m)_{axial} \right]^2 + 3 \left[ (K_{fs})_{torsion} (\tau_m)_{torsion} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (22)$$

**Donde:**

$K_f$ = Factor de concentración de esfuerzo por fatiga

$K_{fs}$  = Factor de concentración de esfuerzo por fatiga (cortante)

$\sigma_a$ = Esfuerzo alternante

$\sigma_m$ = Esfuerzo medio

$\tau_a$ = Torsión alternante

### 2.3.2.4 Número de ciclos

El propósito de calcular el número de ciclos es desarrollar métodos de aproximación para el diagrama S-N en la región de altos ciclos, cuando la información disponible es limitada, como puede ser el caso de contar únicamente con los resultados de un ensayo a tensión simple. La experiencia ha demostrado que los datos de fatiga de altos ciclos pueden ser corregidos mediante una transformación logarítmica del esfuerzo y los ciclos hasta el fallo. La ecuación (23) se emplea para determinar la resistencia a la fatiga con  $10^3$ .

$$(S_f')_{10^3} = \sigma'_F (2.10^3)^b = f S_{ut} \quad (23)$$

**Donde:**

$\sigma'_F$ = Esfuerzo verdadero

$S_{ut}$ = Resistencia ultima a la tracción del material

$f$ = Fracción de la resistencia ultima a la tracción del material

La ecuación (23) se reescribe como se muestra en (24), los valores de “a” y “b” se calcula en (25) y (26), el valor de “z” se lo obtiene con la tabla presentada en el ANEXO 6.

$$S_f = aN^b \quad (24)$$

$$a = \frac{(f S_{ut})^2}{S_e} \quad (25)$$

$$b = \frac{1}{z} \log \left( \frac{S_m}{S_e} \right) \quad (26)$$

**Donde:**

$N$ = Numero de ciclos

$S_e$ = Limite de resistencia a la fatiga

$S_m$ = Resistencia del material en ciclos

$z$ = Factor

$a$ = Factor

$b$ = Exponente

$f$ = Fracción de resistencia ultima a la tracción

$S_{ut}$ = Resistencia ultima a la tracción

$S_f$  = Factor de seguridad por ciclaje

Despejando (24) se obtiene el valor de los números de ciclos que está sometido el material la cual está representado en (27).

$$N = \left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^{\frac{1}{b}} \quad (27)$$

**Donde:**

$\sigma_a$  = Esfuerzo alternante

$a$  = Factor

$b$  = exponente

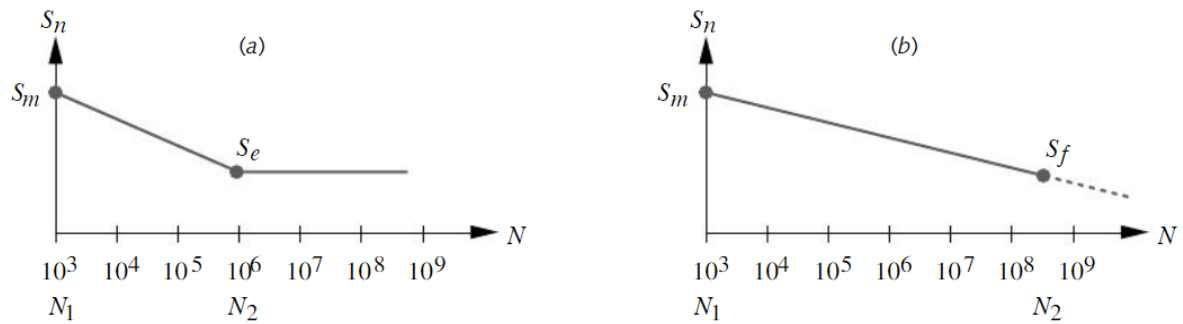
$N$  = Numero de ciclos

### 2.3.2.5 Creación de diagrama S/N estimadas.

En el campo de la ingeniería y la ciencia de materiales, un diagrama S-N es una herramienta utilizada para visualizar cómo cambia la vida útil a fatiga de un material o componente en función del nivel de esfuerzo aplicado. En el eje horizontal se representan los valores de esfuerzo cíclico, y en el eje vertical se muestra la cantidad de ciclos a la falla. Las estimaciones de la vida útil a fatiga se basan en pruebas experimentales o en modelos teóricos y se plasman en esta curva.

La generación de un diagrama S-N estimadas implica calcular o estimar la relación entre el esfuerzo aplicado y la vida útil esperada para un material o componente específico, lo que puede ser de gran utilidad para la planificación y el diseño en ingeniería, especialmente en situaciones donde la fatiga es un factor crítico en la durabilidad de los productos o estructuras, según [48] la ecuación para estimar la resistencia del material en ciclos ( $S_m$ ) se lo representa en (28), además si el material está configurado con puntos articulados su curvatura en el diagrama cambia como se observa en la Fig. 15

$$\text{Flexión} = S_m = 0.9S_{ut} \quad \text{Carga axial} = S_m = 0.75S_{ut} \quad (28)$$



**Fig. 15.** Curvas estimadas para (a) materiales con articulaciones y (b) materiales sin articulaciones [48].

## 2.4 Tecnología CAD/CAM/CAE

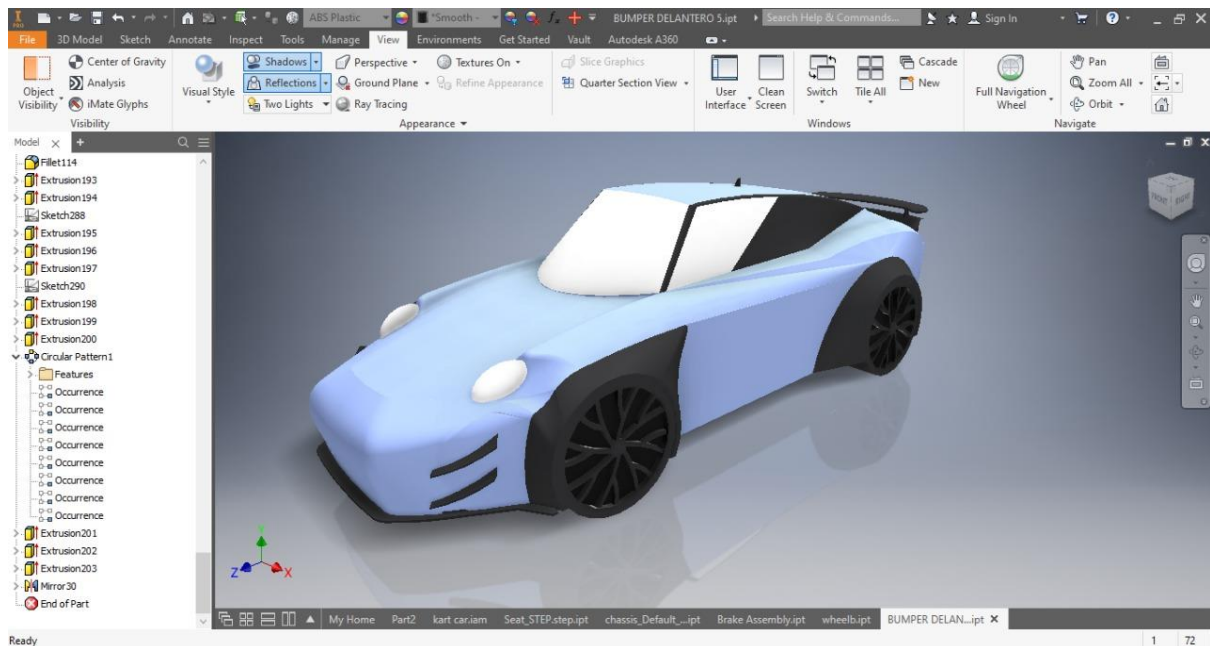
El uso de tecnologías CAD/CAM/CAE cuyos acrónimos significan Computer Aided Desing (CAD), Computer Aided Manufacturing (CAM) y Computer Aided Engineering (CAE), los cuales están enfocados al diseño permite la automatización y desarrollo de cálculos trigonométricos, permiten calcular velocidades de corte, cambio de pieza, cambio de geometría, etc., algunos softwares más usados que implementen tecnologías CAD/CAM son los siguientes: [49]

1. AutoCAD
2. NC Vision
3. Catia
4. NC Progremmer
5. Autospot
6. Inventor

### 2.4.1 Diseño Asistido por Computadora (CAD)

La tecnología CAD (Computer-Aided Design) es un término que se refiere al Diseño Asistido por Computadora. Se trata de un conjunto de herramientas y software utilizados para crear y modificar modelos digitales en dos o tres dimensiones de objetos físicos. Estos objetos pueden ser desde productos industriales y piezas mecánicas hasta edificios y elementos arquitectónicos, el CAD permite a los diseñadores y ingenieros crear representaciones precisas de sus ideas de manera digital, lo que facilita la visualización, modificación y análisis de los diseños antes de la producción real. Además, el CAD posibilita la creación de prototipos

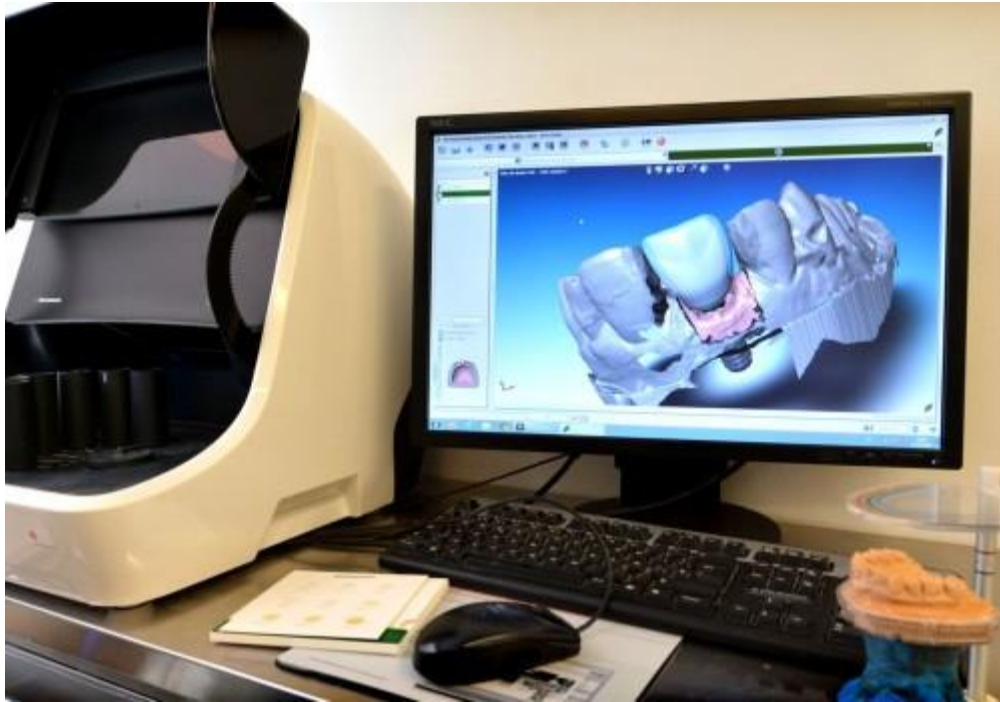
virtuales, la generación de planos técnicos y la comunicación efectiva entre equipos de diseño y producción (Ver Fig. 16).



**Fig. 16.** Aplicaciones de tecnologías CAD.

## 2.4.2 Tecnologías de Manufactura Asistida por Computadora (CAM)

Las tecnologías CAM (Manufactura Asistida por Computadora) se refieren al uso de software y sistemas informáticos para automatizar y mejorar procesos de fabricación en diversas industrias. Esto incluye el diseño y programación de máquinas CNC, impresión 3D y fabricación de moldes. Su objetivo es optimizar la eficiencia al reducir la intervención humana, generando trayectorias y códigos de programación basados en modelos CAD. Además, permiten la simulación y visualización previa de procesos de producción, mejorando la precisión y resultados en la industria manufacturera. (Ver Fig. 17)



**Fig. 17.** Aplicaciones de tecnologías CAM. [50]

#### **2.4.2.1 Fabricación Aditiva**

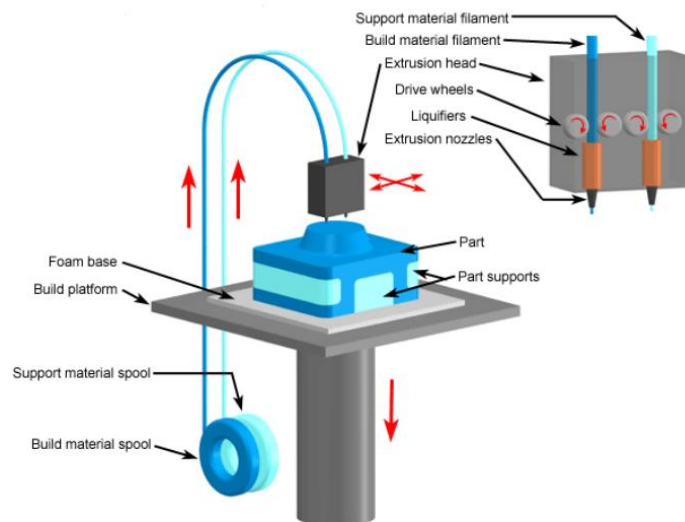
La técnica de fabricación aditiva es la adición de material, esta técnica permite realizar procesos de fabricación de formas y estructuras diseñadas previamente, se aprovecha en la creación de la pieza usando gran variedad de materiales con sus respectivas propiedades mecánicas, dinámicas y eléctricas, la fabricación aditiva permite la reparación de grandes conjuntos mecanismos en sectores industriales (aeroespacial, biomedicina, automotriz, arquitectura, etc.), la tecnología de FA (fabricación aditiva) parte en el modelo CAD, esto permite obtener gran variedad de ventajas como: [51]

1. Personalización del producto a bajo coste.
2. Posibilidad de reparación de piezas de alto valor sin necesidad de volver a fabricar.
3. Rapidez en su fabricación.
4. Rentabilidad en fabricación de piezas pequeñas

#### ***Impresión 3D***

La impresión 3D en la industria surgió por una necesidad de las empresas, principalmente de las que se encargan de fabricar repuestos de forma masiva, pues las industrias deben preservar la calidad antes que cantidad según las normativas y estándares que

son exigidos, por ello las industrias vieron difícil la fabricación de nuevos productos, ya que al estar sometido a grandes gastos de fabricación solo para el prediseño del prototipo decidían no arriesgar, es por este motivo que la tecnología fue mejorando a lo largo de los años, en donde se llegó a crear la manufactura por capas [52].



**Fig. 18.** Esquema de funcionamiento de una impresora 3D [52].

### 2.4.3 Ingeniería Asistida por Computadora (CAE)

La tecnología CAE permite el uso de software de análisis a partir del moldeo y simulación mediante tecnologías CAD/CAM, los posibles alcances mediante el uso de tecnologías CAE se detallan a continuación: [49]

1. Comportamiento a cargas mecánicas
2. Obtención de tensiones en varios puntos de la pieza
3. Obtención de deformación de la pieza
4. Comportamiento a vibraciones
5. Análisis cinematográfico de mecanismos
6. Simulación de comportamientos e identificar las posibles colisiones
7. Análisis dinámico

Los softwares de análisis basados en elementos finitos, tales como ANSYS Workbench, Altair Hypermesh, Freefem++, MEF++, RFEM, entre otros, constituyen herramientas tecnológicas esenciales en el campo del diseño y desarrollo. Además de su función en la

simulación, estas aplicaciones aportan una serie de ventajas sustanciales al proceso. Entre ellas, destacan el ahorro significativo de tiempo y recursos al permitir la evaluación de comportamientos complejos y condiciones diversas en un entorno virtual.

Estos programas no solo ofrecen la posibilidad de simular piezas, sino que también brindan estimaciones críticas sobre la funcionalidad de los componentes bajo consideración. Por medio de análisis detallados, es posible explorar cómo distintas fuerzas, tensiones y condiciones de carga afectan el desempeño de las piezas. Este proceso de modelado y simulación es crucial para la optimización del diseño, ya que proporciona información esencial para tomar decisiones fundamentadas sobre la configuración y material de las piezas.

En el contexto de la simulación, estos softwares operan mediante la utilización de referencias de las piezas, teniendo en cuenta la ubicación y el movimiento de los cuerpos. Cada punto de la trayectoria en el espacio tridimensional (x, y, z) es identificado y considerado en el análisis, lo que permite una simulación precisa y confiable de cómo las piezas se comportarían en situaciones reales.

#### **2.4.4 Ventajas de las tecnologías CAD, CAM, CAE**

El uso de estas tecnologías permiten alcanzar niveles altos de calidad y productividad en talleres o compañías ya que esto permite lograr rapidez, precisión y repetibilidad al momento del maquinado de piezas complejas, permite el rediseño de la pieza en donde se mejora su geometría, propiedades del material y mejora la obtención de datos que amplía el desempeño de la pieza, para el programador las ventajas que representa el uso de tecnologías CAD, CAM, CAE es el evitar realizar cálculos matemáticos complejos manuales optimizando el tiempo de diseño y fabricación de la pieza.

#### **2.4.5 Usos específicos de las tecnologías CAD, CAM, CAE**

A continuación, se presenta algunas características individuales de las tecnologías asistidas por computador en la tabla V:



**TABLA V**  
**CARACTERISTICAS DE LAS TECNOLOGIAS CAD/CAE/CAM [49]**

<b>CAD</b>	<b>CAE</b>	<b>CAM</b>
<b>Uso se software para el diseño del producto</b>	Uso de software para el diseño, simulación y procesado del producto	Uso de software en la fase de manufactura del producto
<b>Permite el rediseño del producto</b>	Permite la prueba, simulaciones y validaciones de diseños antes de su fabricación	Proporciona herramientas virtuales que ayudan a complementar la geometría del producto para su fabricación.
<b>Minimiza el tiempo de diseño</b>	Permite detectar errores en el diseño además de su respectiva corrección.	Genera código de diferentes tipos de programación de fabricación
<b>Permite diseñar el producto con dimensiones precisas</b>	Facilidad de integración en la cadena de fabricación	Relación con tecnologías CAD para la manufactura asistida

### **3 CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO**

Para el desarrollo del presente proyecto se utiliza metodologías de investigación que garantizan un buen desenvolvimiento del proyecto a realizarse para ello, con la finalidad de determinar el modo de falla del husillo de bloqueo del actuador eléctrico, se lleva a cabo una investigación exploratoria donde se analizan catálogos, libros, y demás fuentes bibliográficas, para determinar las características, funcionamiento y materiales empleados en el actuador eléctrico

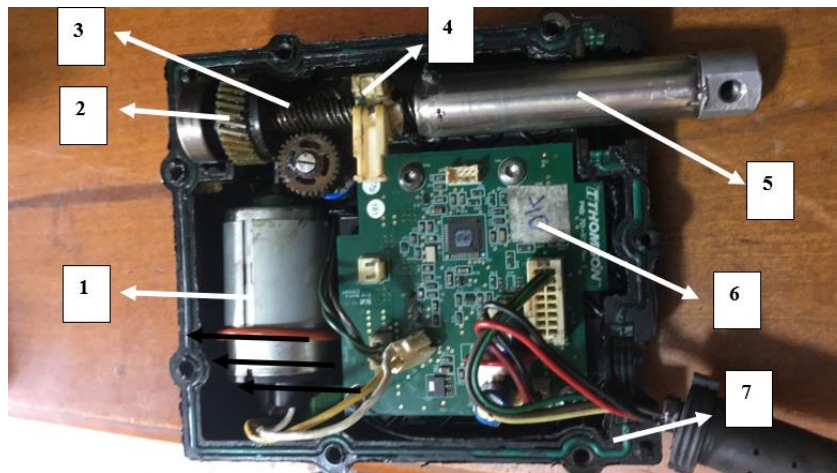
En el rediseño se establece la selección del material donde con la aplicación de una investigación exploratoria se evalúan distintos materiales que se aplican en el elemento a rediseñar; posterior se designa una investigación cuantitativa, para valorar dimensiones, esfuerzos, deformaciones y el factor de seguridad a través de tecnologías CAD- CAE; esto con el propósito de obtener un rediseño del elemento que cumpla con los requerimientos necesarios para un buen funcionamiento.

Para comprobar la viabilidad del diseño se implementa una investigación explicativa y cuantitativa, donde se valida el rediseño a través de métodos analíticos, mismos que nos permiten valorar las propiedades mecánicas, esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad, útiles para asegurar un correcto funcionamiento.

Con la finalidad de comprobar la viabilidad del diseño, se procede a utilizar una investigación aplicada para la fabricación del husillo a través de tecnologías CAM, una vez que se construye el elemento se implementa en el mecanismo real para evidenciar su funcionalidad.

#### **3.1 Identificación visual del mecanismo del actuador.**

En el ANEXO 8 se muestra que la miniexcavadora presenta códigos de falla durante un rango de 2000 a 6000 horas de operación, en el ANEXO 9 se detalla que los códigos presentados corresponden al fallo del actuador eléctrico, por tal motivo se extrae el actuador de la maquinaria y se desarma como se observa en la Fig. 19.



**Fig. 19.** Elementos del actuador de aceleración.

El actuador se compone de:

- 1) Motor eléctrico.
- 2) Engranaje Helicoidal.
- 3) Tornillo sin fin.
- 4) Husillo de bloqueo.
- 5) Actuador mecanismo.
- 6) Tarjeta eléctrica.
- 7) Carcasa

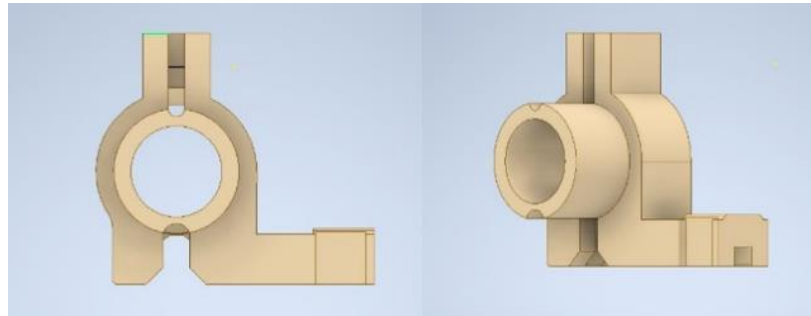
Se identifica que el movimiento del mecanismo se genera por un motor eléctrico mediante una relación de engranajes helicoidales, que a través del tornillo sin fin desplaza al elemento 4 y 5. Se observa en la Fig. 20, que el husillo de bloqueo presenta una fractura que no permite el correcto funcionamiento del actuador, por tal motivo la maquinaria presenta un fallo.



**Fig. 20.** Husillo de bloqueo fracturado.

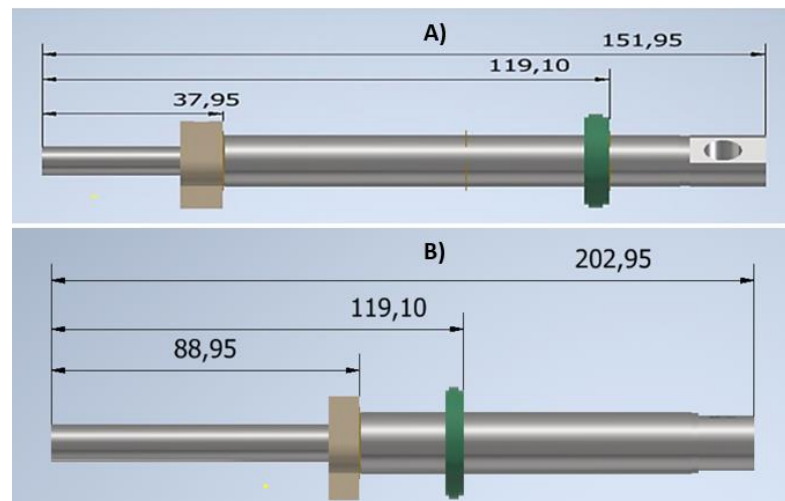
### 3.1.1 Modelado del mecanismo en 3D

Frente a la fractura en el husillo de bloqueo, se realiza un análisis mediante elementos finitos usando tecnologías de ingeniería asistida por computadora (CAE). Primero, se crea en el software Inventor un modelo tridimensional del mecanismo, destacando el husillo de bloqueo como se muestra en la Fig. 21.



**Fig. 21.** Modelado del husillo de bloqueo por Inventor.

Por lo tanto, se ensambla el modelado 3D del mecanismo en la posición inicial y final de trabajo. Los ensambles difieren en la ubicación tanto del husillo de bloqueo como del propio mecanismo, debido a un desplazamiento de 51 mm, tal como se ilustra en la Fig. 22.



**Fig. 22.** Esquema de las distancias recorridas del husillo en el mecanismo; A) Posición inicial; B) Posición final

### 3.1.2 Determinación de fuerzas que actúan en el mecanismo del actuador

Para empezar la simulación del mecanismo por elementos finitos, se identifican las fuerzas que actúan en el mecanismo del actuador, se conoce por el fabricante que la fuerza tangencial es de 90 N (ver ANEXO 10), mientras que, la fuerza radial ( $F_r$ ) y axial ( $F_a$ ) se la determina mediante cálculos de engranajes helicoidales, al utilizar (29) y (30) [53].

$$F_r = F_t \times \frac{\tan(\alpha_n)}{\cos(\beta)} \rightarrow \text{eje } y \quad (29)$$

$$F_a = F_t \times \tan(\beta) \rightarrow \text{eje } z \quad (30)$$

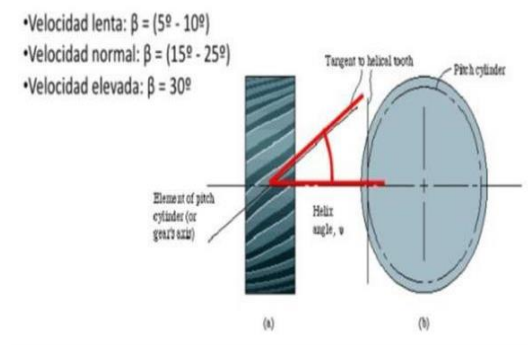
**Donde:**

$F_t$  = Fuerza tangencial

$\beta$  = Ángulo de la hélice

$\alpha$  = Ángulo de presión normal

Mediante [54], se obtiene que, a altas velocidades, el engranaje presenta un ángulo beta ( $\beta$ ) de 30 grados, como se muestra en la Fig. 23.



**Fig. 23.** Ángulo de la hélice para engranaje helicoidal [54].

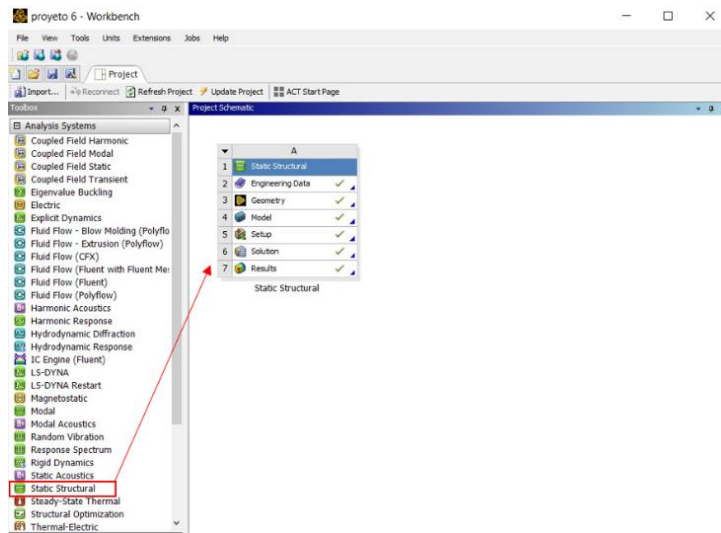
Se obtiene que la fuerza en Y es de 37.83 N (31). Mientras que, la fuerza en Z es de 51.96 N (32).

$$F_r = 90 \times \frac{\tan(20)}{\cos(30)} = 90 \times (0.42028) = 37.83N \rightarrow \text{eje } y \quad (31)$$

$$F_a = 90 \times \tan(30) = 90 \times \tan(30) = 51.96N \rightarrow \text{eje } z \quad (32)$$

### 3.1.3 Identificación del modo de fallo del mecanismo del actuador por análisis de elementos finitos.

Para identificar el modo de fallo, se realiza el análisis por elementos finitos en su posición inicial y final de trabajo del actuador. Se utiliza el software ANSYS Workbench, entre las opciones se selecciona el módulo de análisis estructural como se muestra en la Fig. 24.



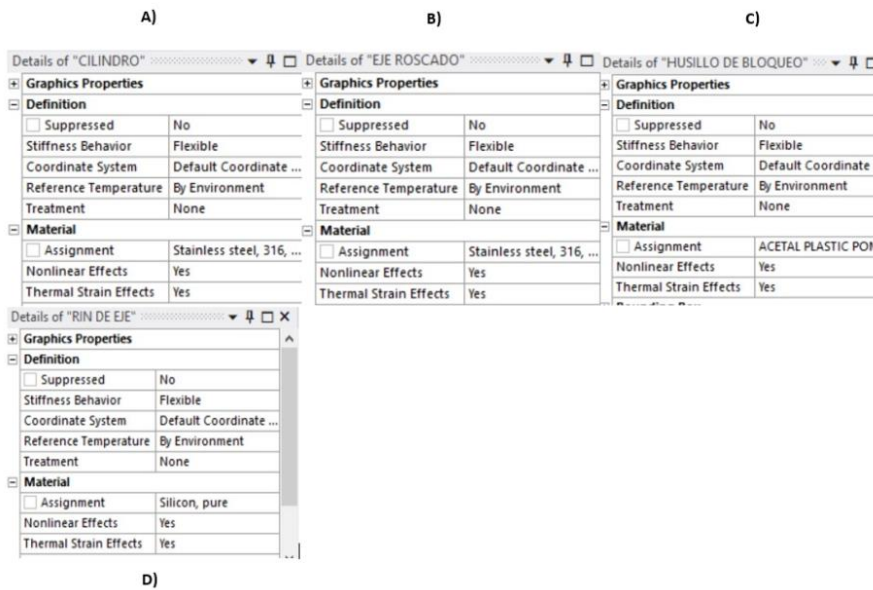
**Fig. 24.** Selección del módulo análisis estructural.

El primer paso consiste en agregar los materiales que se usan para la simulación en la biblioteca correspondiente, como se muestra en la Fig. 25. Donde en la Fig. 26, se colocan los materiales a su determinada autoparte del mecanismo.

The screenshot shows the 'Engineering Data Sources' window. It displays a table of material sources. The table has columns for 'Contents of Engineering Data', 'Source', and 'Description'. The materials listed are:

Contents of Engineering Data	Source	Description
ACETAL PLASTIC POM	C:\V	Polyamide (Nylon) (Type 6, Molding and Extrusion)
Plastic, PA6	Granta	Data compiled by the Granta Design team at ANSYS, incorporating various sources including JAHM and MagWeb. ANSYS Inc. provides no warranty for this data.
Silicon, pure	Granta	Silicon, pure silicon. Data compiled by the Granta Design team at ANSYS, incorporating various sources including JAHM and MagWeb. ANSYS Inc. provides no warranty for this data.
Stainless steel, 316, annealed	Granta	Stainless steel, austenitic, AISI 316, annealed, wrought. Data compiled by the Granta Design team at ANSYS, incorporating various sources including JAHM and MagWeb. ANSYS Inc. provides no warranty for this data.

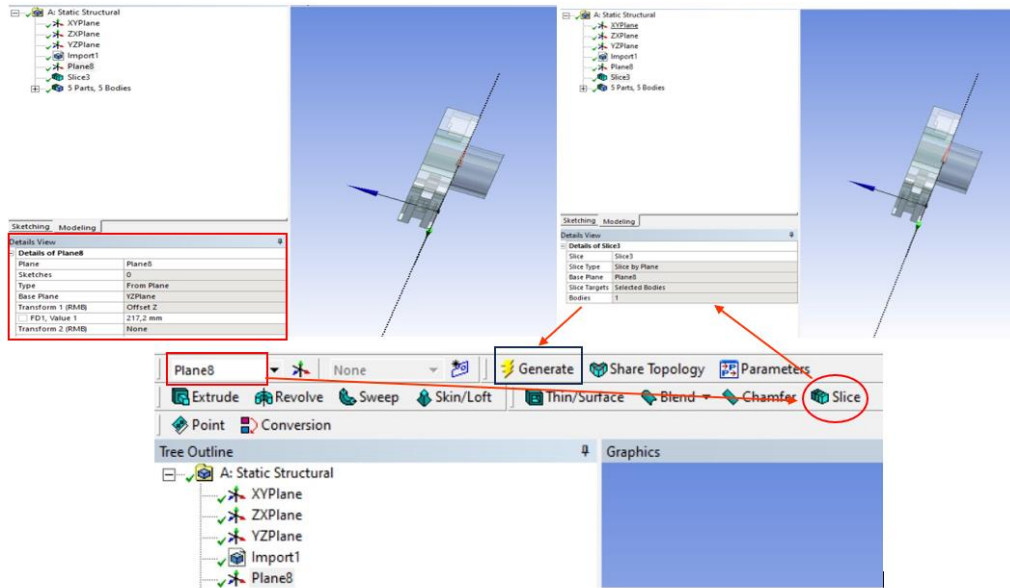
**Fig. 25.** Selección de materiales a utilizar para la simulación del mecanismo.



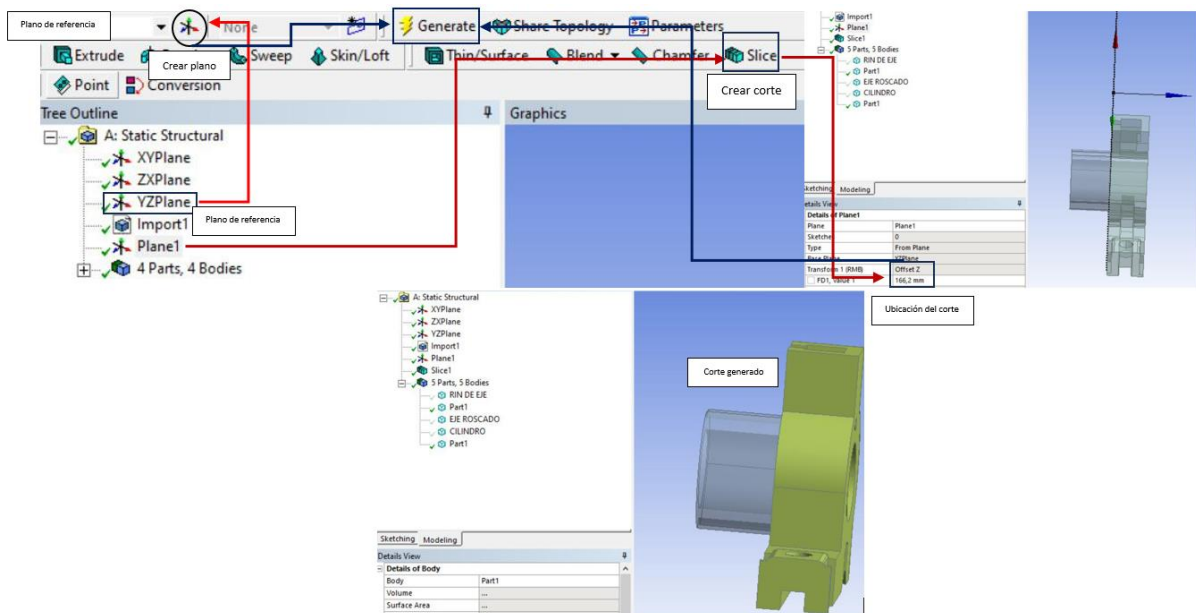
**Fig. 26.** Asignación de materiales en las piezas del mecanismo en su posición inicial; A) Cilindro; B) Eje roscado; C) Husillo de bloqueo; D) Rin del cilindro.

### 3.1.3.1 Simulación del mecanismo del actuador.

Se importa en ANSYS Workbench el archivo STEP del mecanismo en la posición inicial y final de trabajo, y se abre ANSYS Design Molder para realizar la separación de la parte roscada y plana del husillo de bloqueo, para obtener resultados lo más próximos a la realidad. Para ello, se crea un nuevo plano basado en el plano ZY y se realiza un corte a los 217.2 mm para la posición inicial y a los 166.2 mm para la posición final como se muestra en la Fig. 27. y Fig. 28.



**Fig. 27.** Generación de corte en el husillo de bloqueo por ANSYS Design Molder (posición inicial).



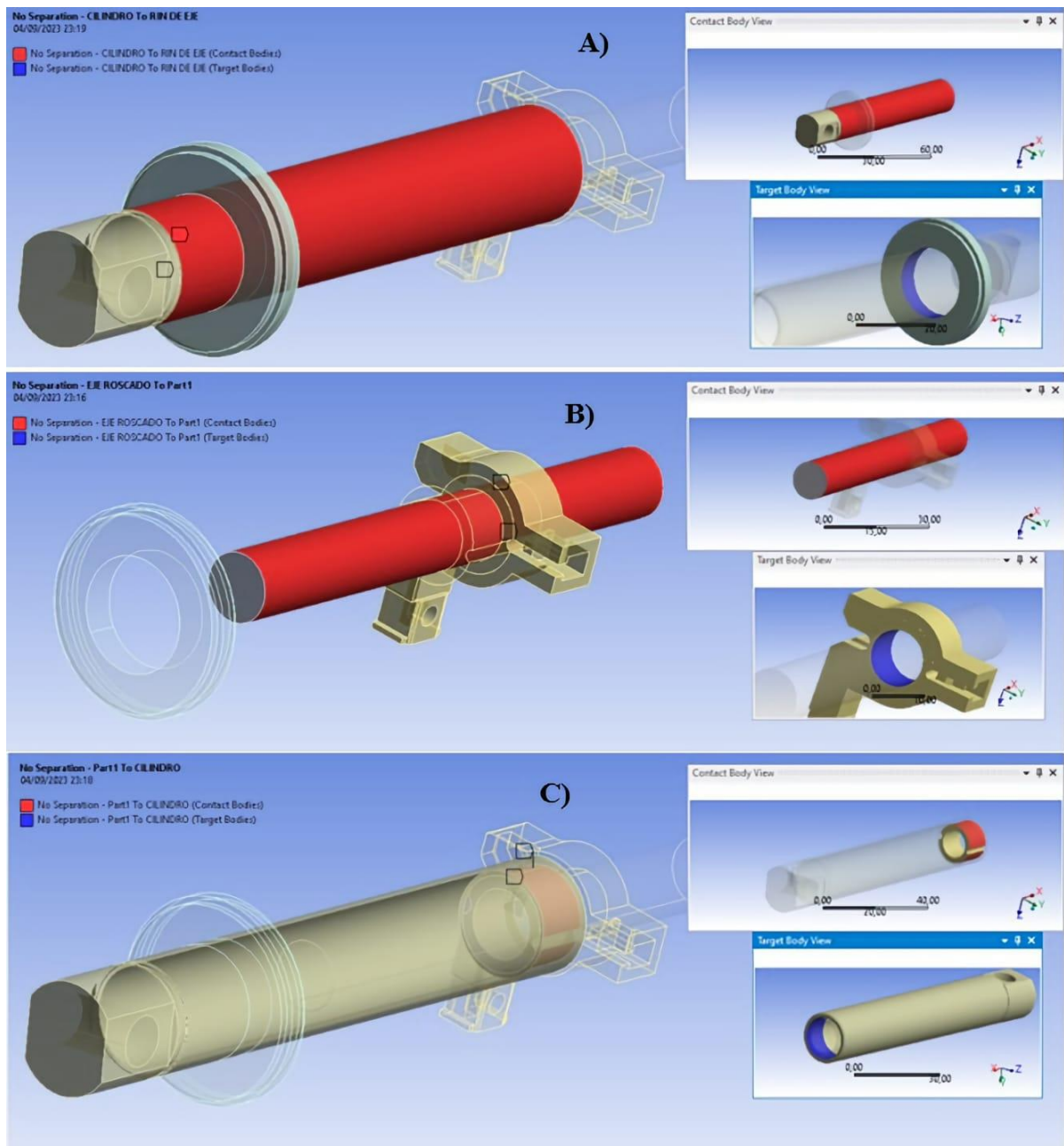
**Fig. 28.** Generación de corte en el husillo de bloqueo por ANSYS Design Molder (posición final).

### 3.1.3.2 Conexiones del mecanismo del actuador

Para un correcto análisis por elementos finitos, se agregan las conexiones presentes en el mecanismo del actuador, estas conexiones son de tipo "no separation" y se identifican por



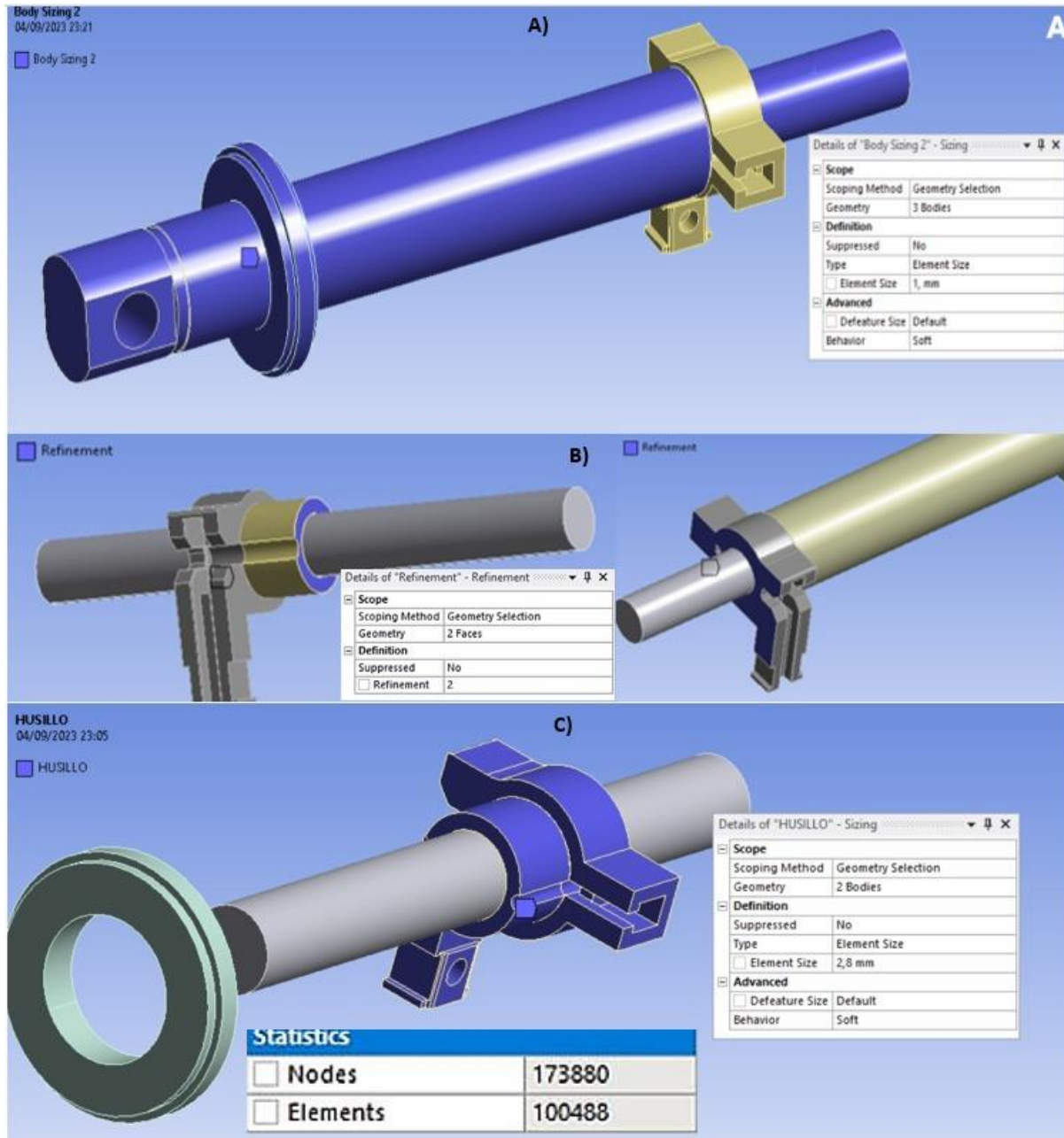
color rojo la autoparte conductora de la fuerza y por color azul la autoparte receptora. Se obtiene tres conexiones como se muestra en la Fig. 29.



**Fig. 29.** Identificación de Conexiones en el mecanismo del actuador de aceleración en su posición inicial; A) Cilindro a rin de eje; B) Eje roscado a husillo de bloqueo, C) Husillo de bloqueo a Cilindro.

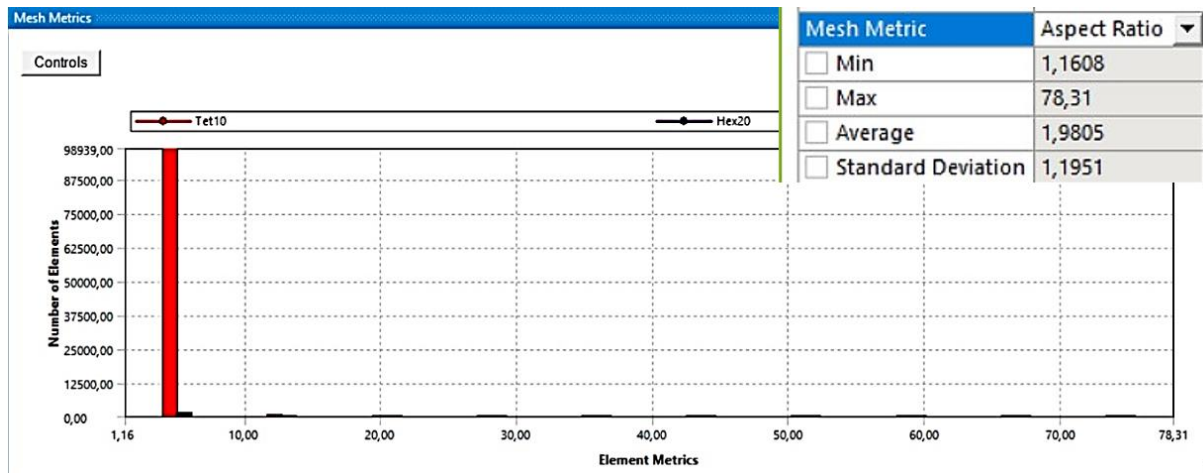
### 3.1.3.3 Creación del mallado del mecanismo del actuador

En la Fig. 30. se genera el mallado del mecanismo con una definición de 1 mm. Agregando un tamaño de elemento del husillo de 2.8 mm, además de un refinamiento de 2 mm en las caras externas del husillo. En el mallado se obtiene un total de 173880 nodos y 100488 elementos.

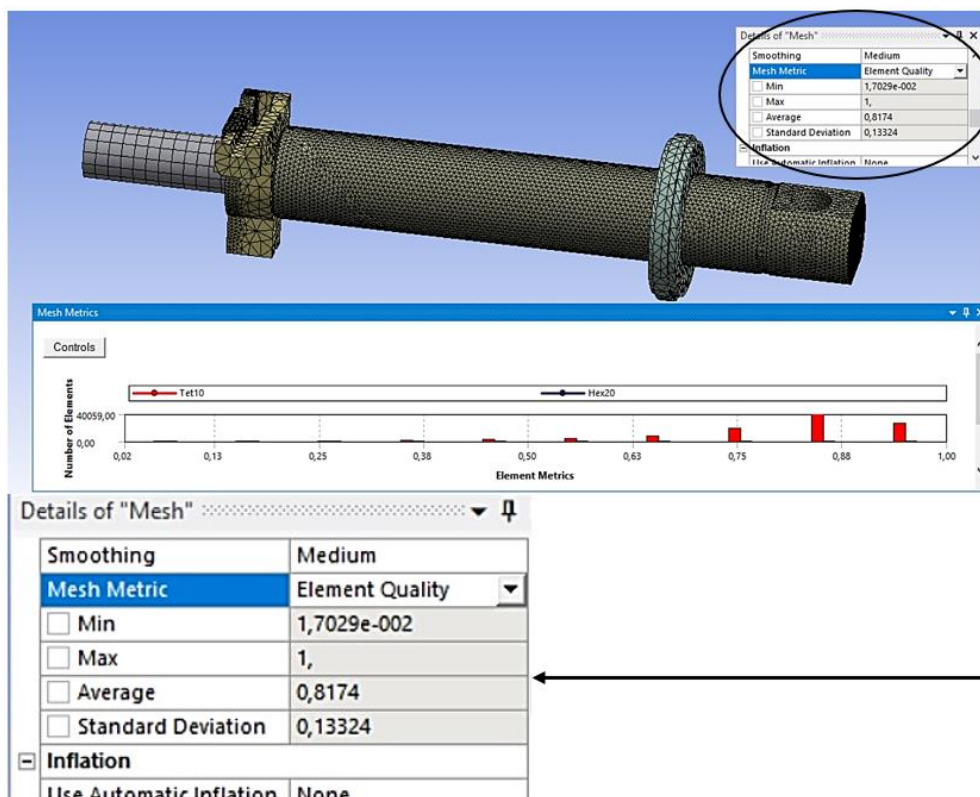


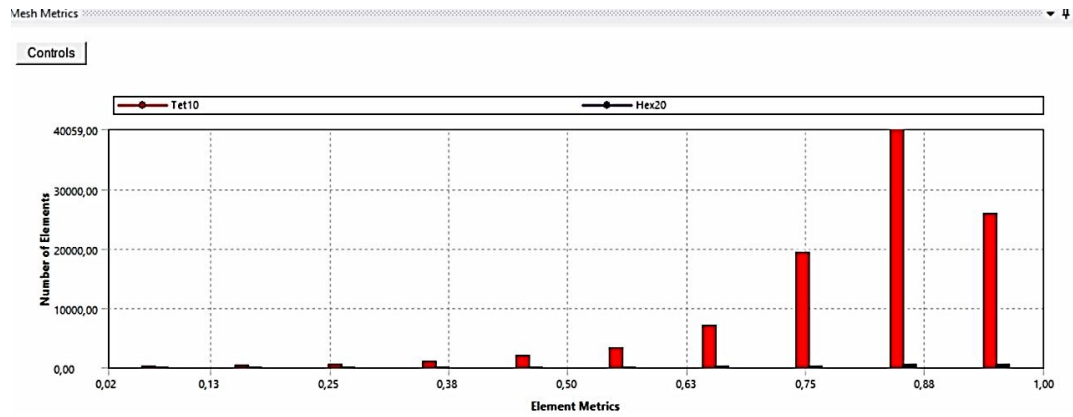
**Fig. 30.** Definición del mallado en el mecanismo del actuador; A) Mallado Body Sizing para el mecanismo; B) Mallado de refinamiento para el husillo de bloqueo; C) Numero de nodos y elementos.

Se ejecuta el mallado y se obtiene una calidad de mallado por aspecto de radio de 1.9805 y de calidad del elemento de 0.8174 como se muestra en la Fig. 31 y 32. El resultado de la calidad del mallado en simulaciones numéricas trasciende ser un detalle técnico, convirtiéndose en un elemento esencial para garantizar la exactitud y confiabilidad de los resultados obtenidos.



**Fig. 31.** Calidad del mallado en el mecanismo del actuador por aspecto de radio





**Fig. 32.** Calidad del mallado en el mecanismo del actuador por calidad del elemento

### *Caracterización del mallado.*

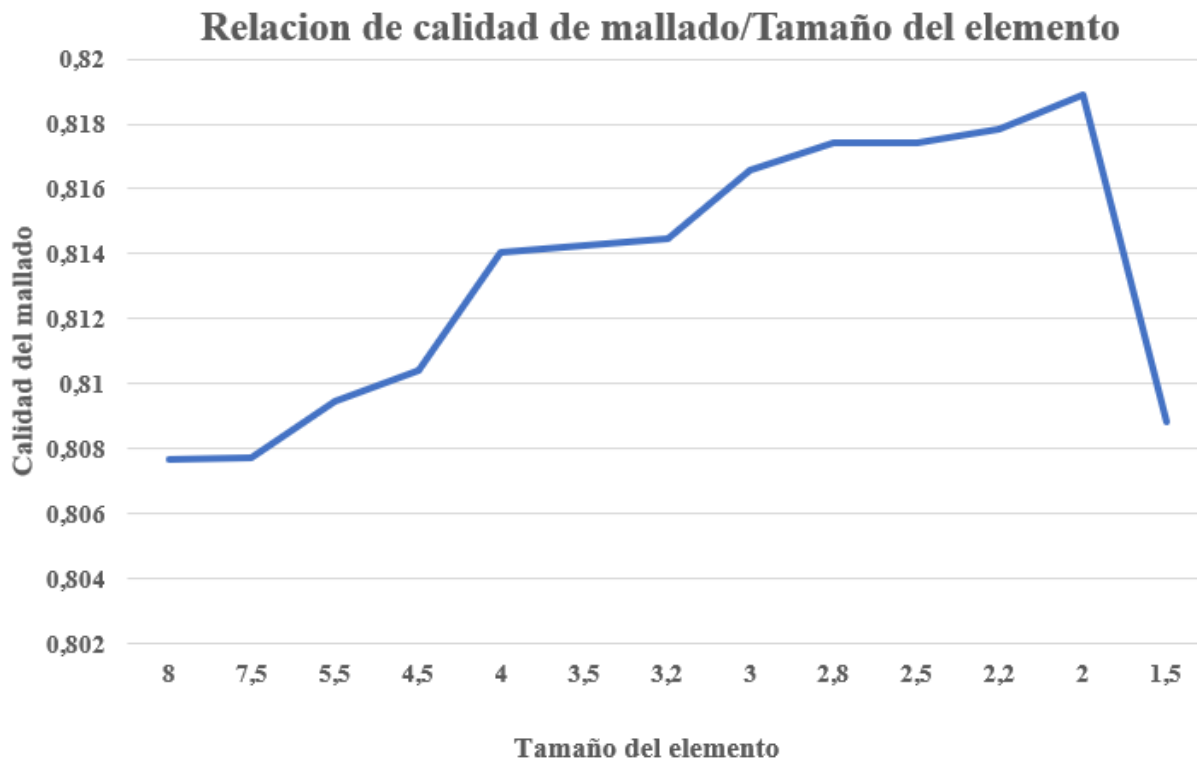
Se elabora la caracterización de la malla parametrizando el tamaño de los elementos con relación al número de elementos, calidad del mallado, aspect ratio, número de nodos, esfuerzos de Von Mises, cuyos resultados se presentan en la TABLA X. A su vez, con los datos se obtiene las curvas de convergencia o singularidad.

**TABLA VI**

### **CARACTERIZACION DEL MALLADO**

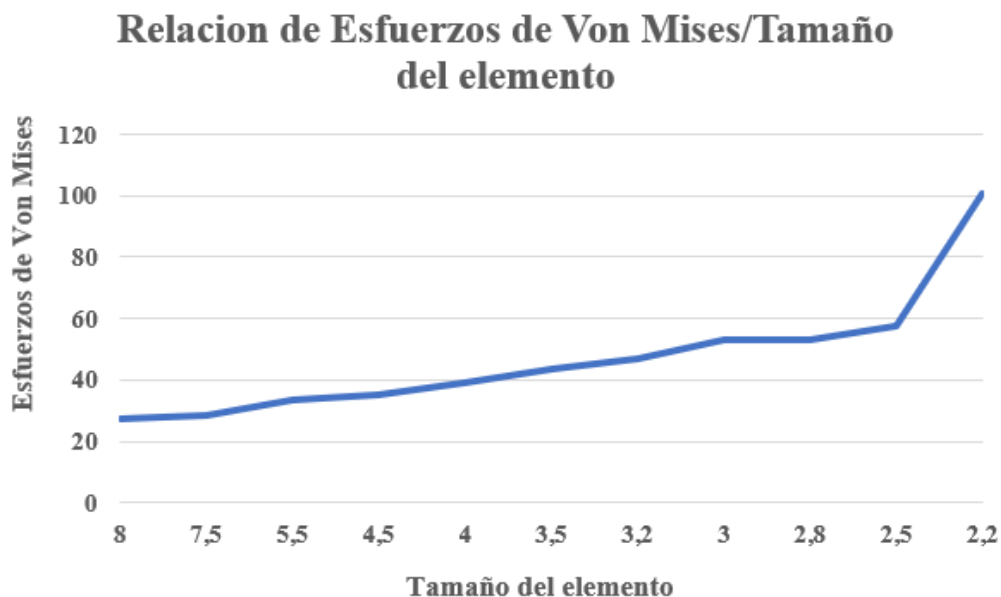
<b>Tamaño del elemento (mm)</b>	<b>Elemento #</b>	<b>Calidad del mallado</b>	<b>Aspect ratio</b>	<b>Nodos #</b>	<b>Von Mises (MPa)</b>
8	84186	0,80765	2,1449	149252	27,551
7,5	84731	0,80772	2,1355	150118	28,678
5,5	85647	0,80946	2,1216	151462	33,206
4,5	87863	0,8104	2,0765	154437	34,874
4	88784	0,81406	2,0633	156004	38,828
3,5	91125	0,81424	2,0423	159504	43,776
3,2	94080	0,81448	2,0265	164269	46,858
3	95266	0,8166	2,0161	165818	52,977
2,8	100488	0,8174	1,9805	173880	53,01
2,5	100488	0,8174	1,9835	173880	57,789
2,2	107392	0,81785	2,0233	184217	100,53
2	112319	0,81888	2,0257	191398	103,07
1,5	141552	0,80883	2,0449	235186	111,17
1	222127	0,79275	2,0513	352252	119,64

En las curvas de caracterización del mallado se observa que a partir de los tamaños de elementos que van desde 3 mm hasta 2.2 mm, la calidad del mallado se estabiliza y a partir de 2 mm la calidad del mallado decae en un rango de 0.819 a 0.809. (Ver Fig. 33)



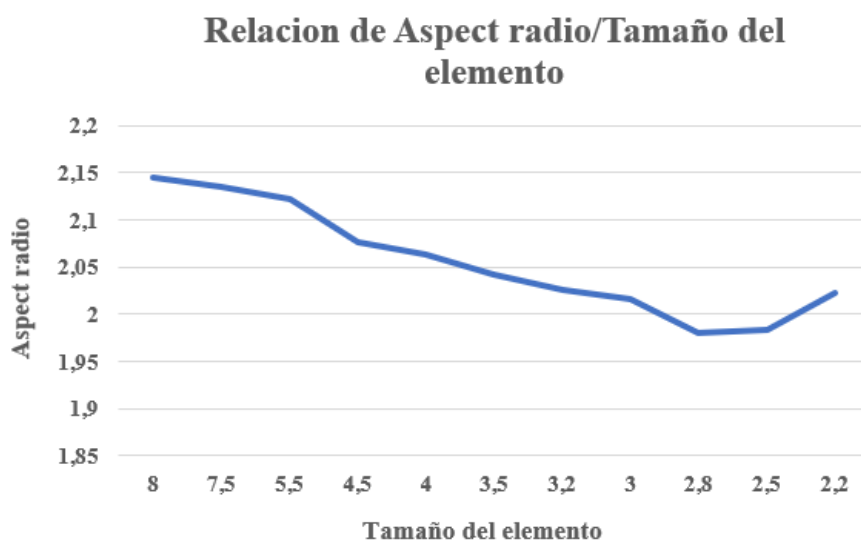
**Fig. 33.** Curvas de caracterización del mallado.

En la Fig. 34, se evidencia una convergencia con los valores del esfuerzo de Von Mises. Sin embargo, a partir de un tamaño de elemento de 2.5 mm, los esfuerzos de Von Mises aumentan significativamente.



**Fig. 34.** Curvas de caracterización del mallado.

Para la selección del tamaño de los elementos en el mallado, es de suma importancia que la relación entre las dimensiones de los elementos finitos utilizados en el modelo del mecanismo, conocida como "aspect ratio", se aproxime lo máximo posible a 1. En el análisis de elementos finitos, se busca mantener un aspect ratio cercano a 1 para prevenir distorsiones de la geometría y garantizar resultados precisos, al analizar la curva del aspect ratio, se observa que el valor más cercano a 1 corresponde a un tamaño de elemento de 2.8 mm. Por lo tanto, se opta por un valor de 2.8 mm para el mallado. (Ver Fig.35)

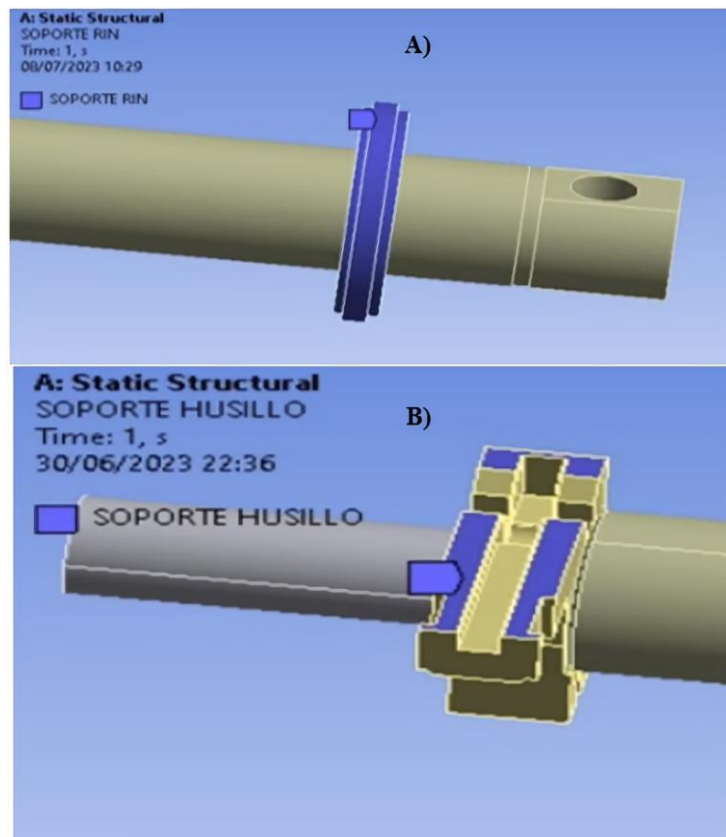


**Fig. 35.** Curvas de caracterización del mallado.



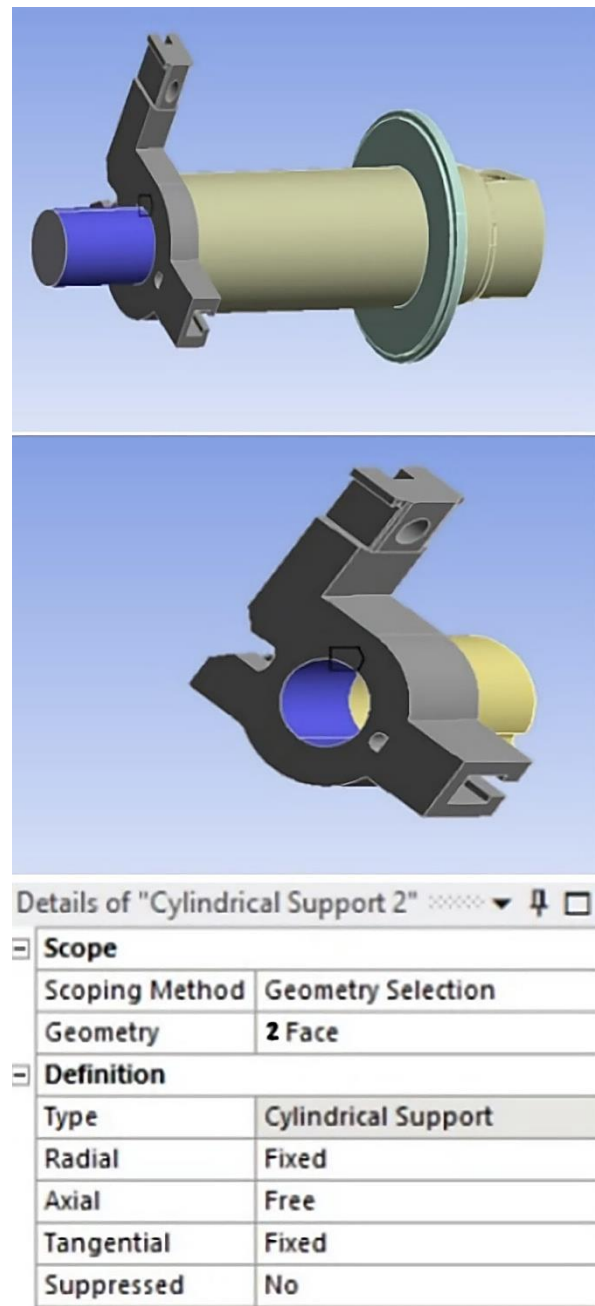
### 3.1.3.4 Asignación de fuerzas y soportes que actúan en el mecanismo del actuador

Se agrega las fuerzas y los soportes correspondientes que actúan en el mecanismo del actuador de aceleración tanto para la posición inicial y final de trabajo. Para empezar, se añade un soporte fijo en el rin del eje y en las caras externas del husillo de bloqueo como se muestra en la Fig. 36.



**Fig. 36.** Asignación de los soportes fijos en el mecanismo a simular (posición inicial); A) Soporte fijo en el rin del cilindro; B) soporte fijo en el husillo de bloqueo

Se implementa un soporte cilíndrico al tornillo sin fin y a la parte roscada del husillo para la restricción correcta del movimiento en el análisis como se visualiza en la Fig. 37.



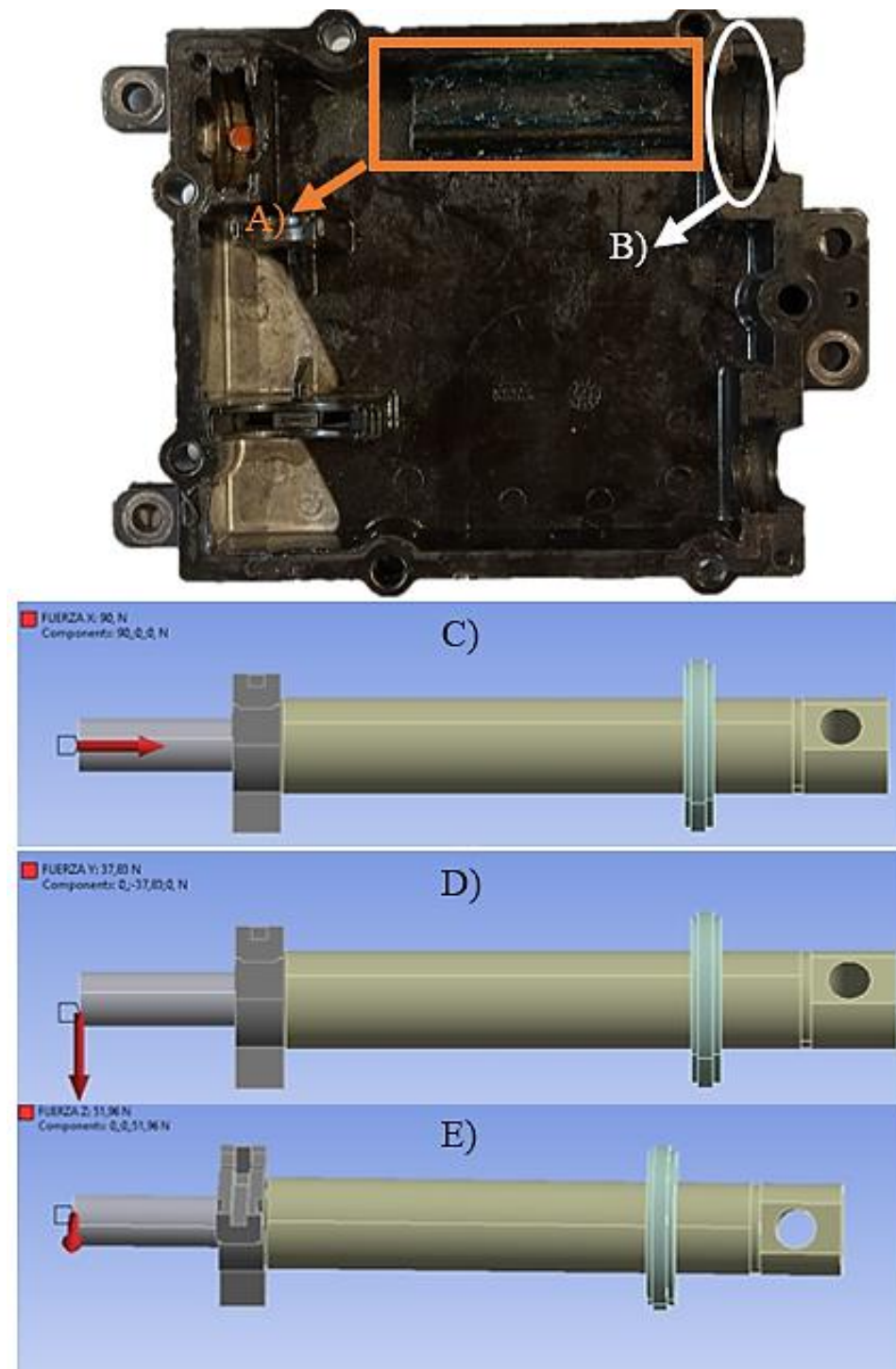
**Fig. 37.** Asignación del soporte cilíndrico al eje roscado y husillo de bloqueo zona roscada

Se colocan las fuerzas que actúan en el mecanismo del actuador tanto en las posiciones inicial y final de trabajo, estas fuerzas son de 90 N en el eje X, -37.83 N en el eje Y, 51.96 N en el eje Z, como se muestra la Fig. 38.

Es importante destacar que las tres fuerzas que actúan en el mecanismo no varían. Esto implica que, aunque exista un cambio en la posición y dimensiones del mecanismo, las fuerzas



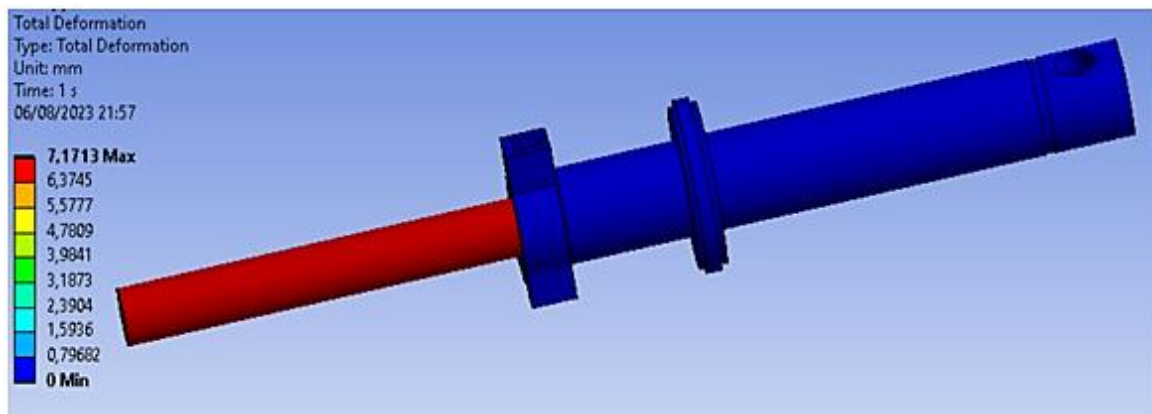
aplicadas se mantienen constantes. Los datos analizan cómo afecta el desplazamiento del mecanismo en la posición final a los esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad.



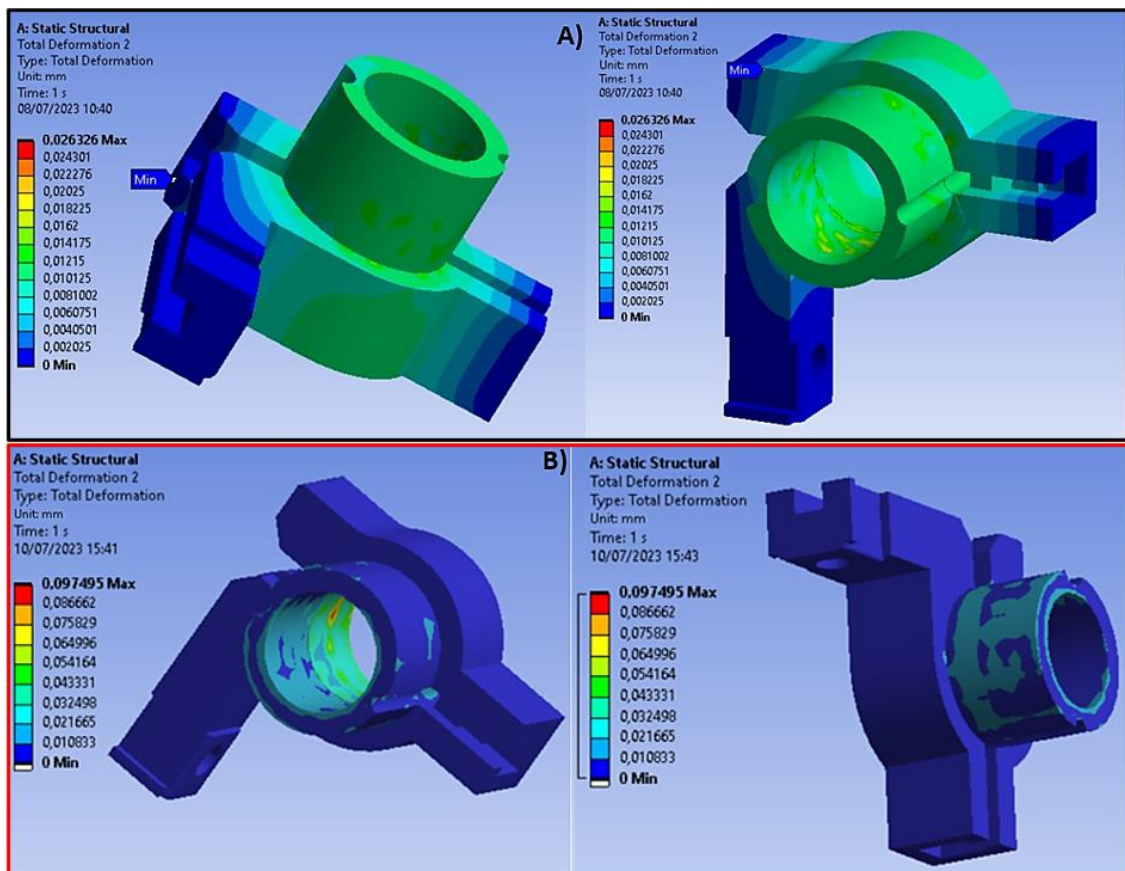
**Fig. 38.** Asignación de las fuerzas del mecanismo en su posición inicial; A) Guía de sujeción del husillo; B) Guía de posición y sujeción del rin; C) eje X; D) eje Y; E) eje Z.

### 3.1.3.5 Análisis de deformación del mecanismo del actuador

Se realiza la simulación para obtener resultados de deformación total, esfuerzo de Von Mises y esfuerzo cortante, con el objetivo de determinar el factor de seguridad, la deformación máxima en el actuador es de 7.17 mm y del husillo de bloqueo es de 0.02633 mm en su posición inicial y de 0.097 mm en su posición final (ver Fig. 39 y 40.).



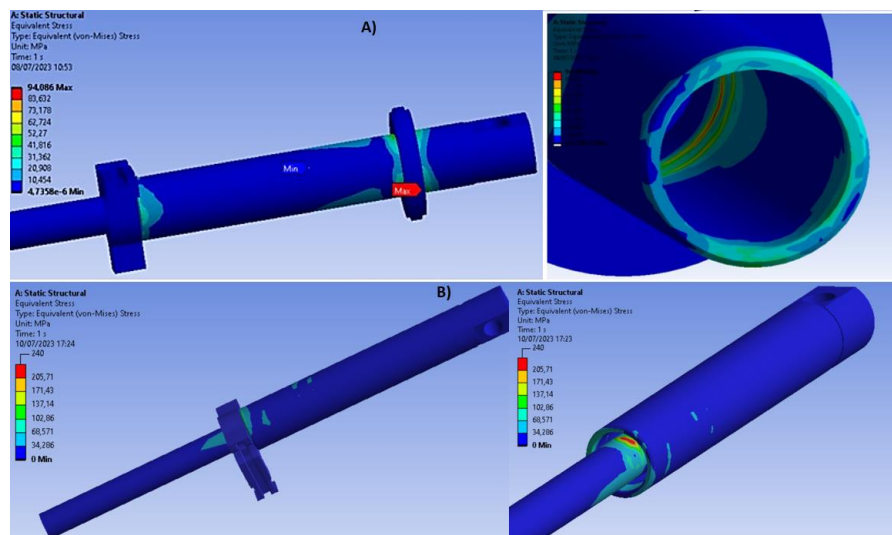
**Fig. 39.** Análisis de deformación del mecanismo del actuador.



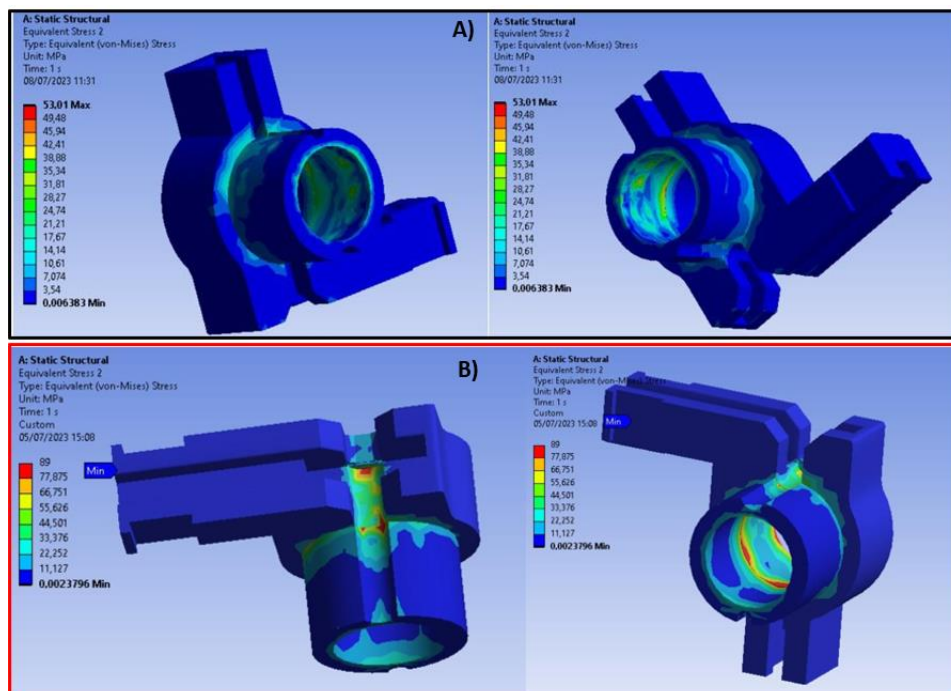
**Fig. 40.** Análisis de deformación del husillo de bloqueo del mecanismo; A) Posición inicial; B) Posición final.

### 3.1.3.6 Análisis de esfuerzos de Von Mises del mecanismo del actuador

Los esfuerzos de Von Mises presentes en el mecanismo en su posición inicial son de 94.086 MPa y en su posición final de 240 MPa como se ilustra en la Fig. 41. Mientras que, los esfuerzos del husillo de bloqueo son de 53.01 MPa en inicial y de 89 MPa en final como se muestra en la Fig. 42.



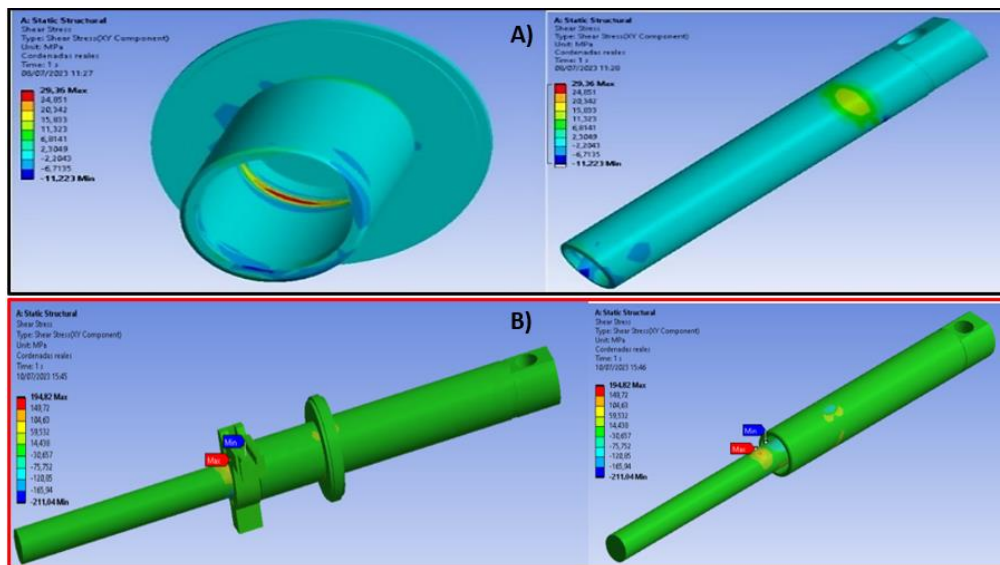
**Fig. 41.** Análisis de esfuerzo de Von Mises en el mecanismo del actuador; A) Posición inicial; B) Posición Final.



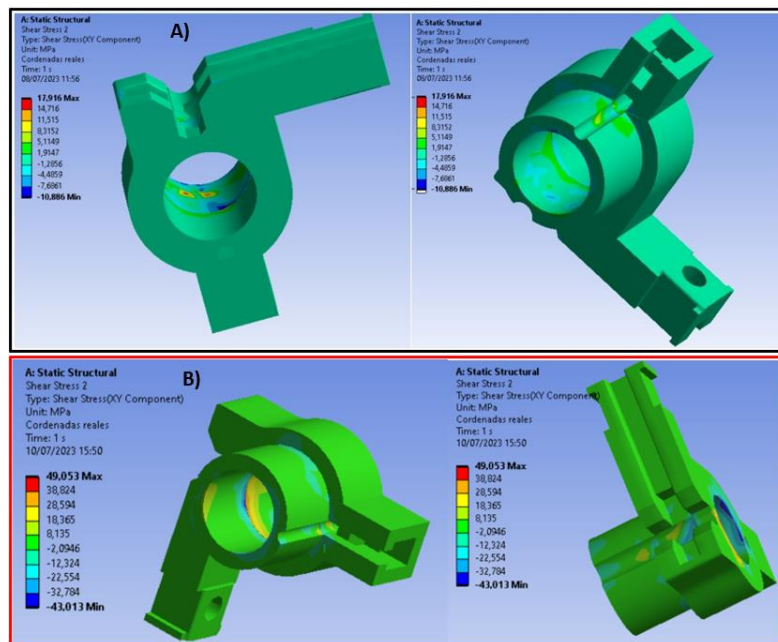
**Fig. 42.** Análisis de esfuerzo de Von Mises en el husillo de bloqueo del mecanismo; A) Posición inicial; B) Posición final.

### 3.1.3.7 Análisis de esfuerzos cortantes del mecanismo del actuador

Se analiza los esfuerzos cortantes del mecanismo, se obtiene en la posición inicial un valor máximo de 29.36 MPa y en su posición final de 194.82 MPa. En la Fig. 44., se presenta un valor máximo de 17.92 MPa en el husillo de bloqueo (posición inicial), y en la posición final un valor máximo de 49.05 MPa.



**Fig. 43.** Análisis de esfuerzo cortante en el mecanismo en su posición inicial; A) Posición inicial; B) Posición final.

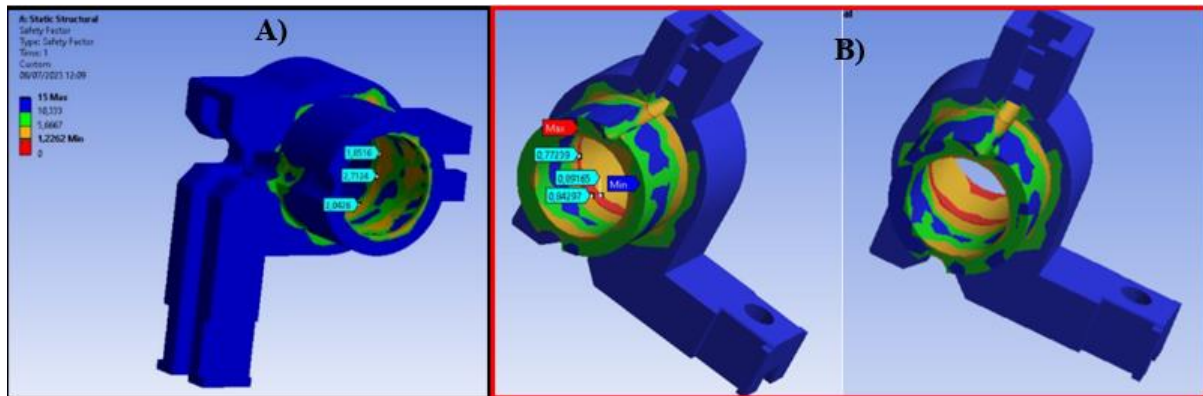


**Fig. 44.** Análisis de esfuerzo cortante en el husillo de bloqueo del mecanismo; A) posición inicial; B) posición final.



### 3.1.3.8 Análisis del factor de seguridad del mecanismo del actuador

Se observa el factor de seguridad del husillo de bloqueo, donde en su posición inicial se obtiene un valor de 1.226. Mientras que, cuando el husillo de bloqueo se encuentra en su posición final de operación, se muestra un valor de 0.74 en la Fig. 45.



**Fig. 45.** Análisis del factor de seguridad del husillo de bloqueo del actuador; A) Posición inicial; B) Posición final.

### 3.1.3.9 Análisis por simulación de fatiga del actuador

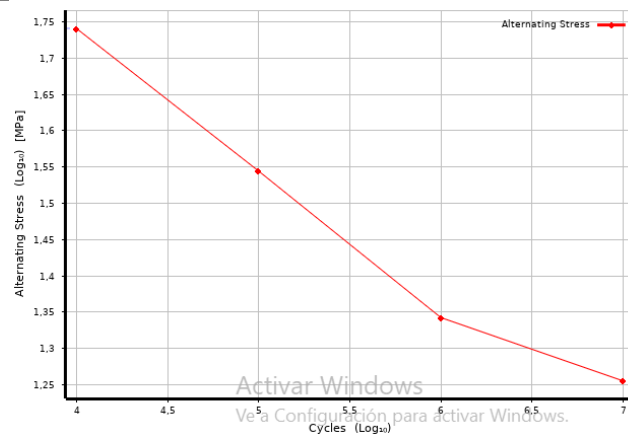
El factor de seguridad es un concepto clave en ingeniería que evalúa la relación entre la capacidad máxima de carga de un componente o estructura y la carga real aplicada. Si el factor de seguridad es menor a 1, indica que resulta en un fallo o fractura de la pieza que está sometida al análisis. Conocer el factor de seguridad brinda múltiples beneficios, como asegurar la integridad y durabilidad de las estructuras, reducir riesgos de fallos y accidentes, optimizar el uso de materiales, mejorar la eficiencia de diseño, por tal motivo al obtener valores menores a 1 en el factor de seguridad en el husillo, se procede a realizar un análisis de fatiga para conocer los puntos de fluencia.

#### *Curva de Wohler (Acetal)*

Para conocer el tiempo de vida útil del husillo de bloqueo, se investiga la curva de Wohler o S-N del ACETAL [55], esta curva con los datos mostrados en la TABLA VII, se la ingresa en ANSYS Workbench como se observa en la Fig. 46, para obtener el tiempo de vida y factor de seguridad del husillo de bloqueo por fatiga.

**TABLA VII**  
**DATOS DE LA CURVA S-N DEL ACETAL**

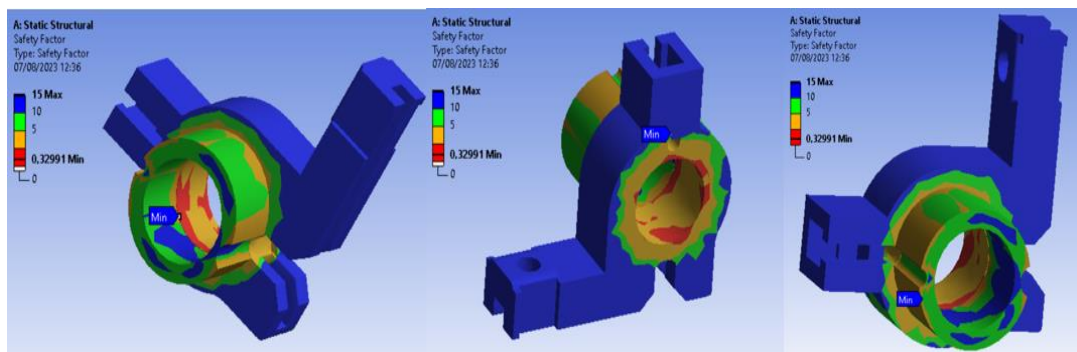
Ciclos	Resistencia en MPA
1 ciclo	65 MPA
1e+4 ciclos	55 MPA
1e+5 ciclos	35 MPA
1e+6 ciclos	23 MPA
1e+7 ciclos	18 MPA



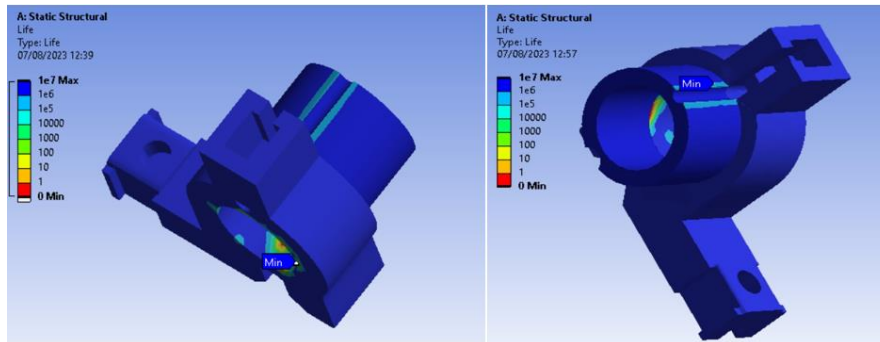
**Fig. 43.** Curva S-N del Acetal

### *Análisis del factor de seguridad y tiempo de vida del husillo de bloqueo*

Se utiliza la teoría de Goodman para el análisis y se consigue un factor de seguridad de 0.329 como se muestra en la Fig. 47. Por lo que, en la Fig. 48. se visualiza los ciclos de vida del husillo de bloqueo.



**Fig. 47.** Análisis del factor de seguridad por fatiga del husillo de bloqueo

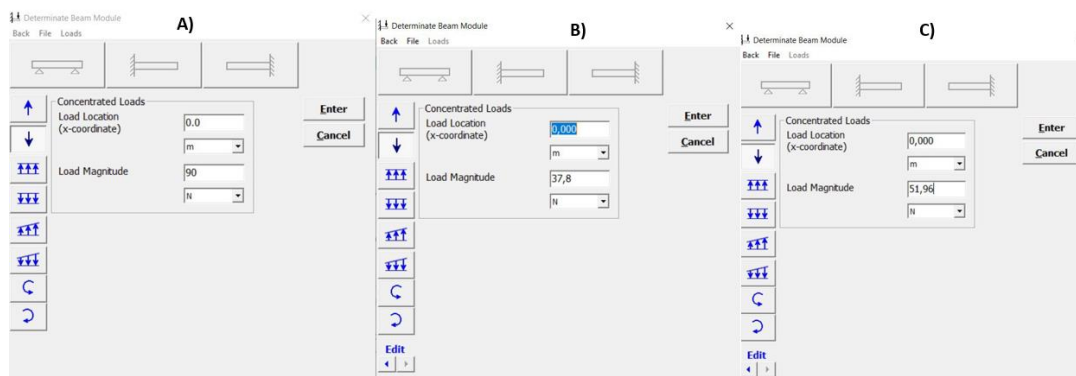


**Fig. 48.** Análisis del ciclo de vida del husillo de bloqueo

Se visualiza que la grieta inicia desde los 0 a 10 ciclos de funcionamiento, entre los 10 a 100 ciclos la grieta empieza a propagarse sin control, mientras que entre los 100 a 1000 ciclos de trabajo, se produce el daño permanente que ocasiona la fractura del husillo de bloqueo. Por tal motivo, se realiza la validación del análisis obtenido por medio de métodos analíticos.

### 3.1.4 Análisis por métodos analíticos del mecanismo del actuador

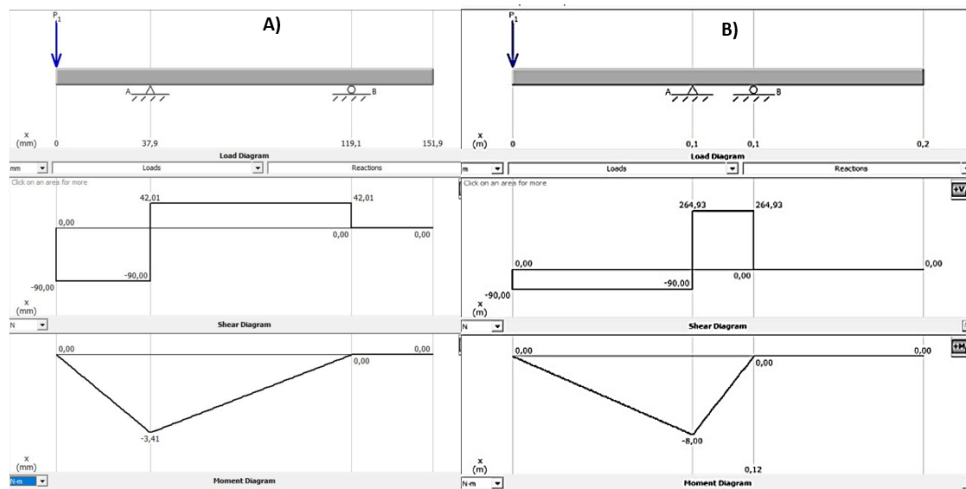
Se calcula los esfuerzos de Von Mises y los esfuerzos cortantes mediante métodos analítico. Para ello, se obtienen los diagramas del momento flector y esfuerzos cortantes por cada eje del mecanismo con la ayuda del software MD SOLID, donde se ingresa las fuerzas que actúan en el mecanismo como se ilustra en la Fig. 49.



**Fig. 49.** Asignación de fuerzas del mecanismo en MD SOLID; A) Fuerza en X; B) Fuerza en Y; C) Fuerza en Z.

Se muestran los diagramas de los distintos ejes donde se analizan solo los esfuerzos que actúan en la parte crítica del mecanismo que es el husillo de bloqueo, en la Fig. 50. se visualiza los diagramas del eje X en sus dos posiciones. Los resultados obtenidos muestran que el

esfuerzo cortante en el eje X posición inicial es de  $-47.99\text{ N}$  (33) y en la final de  $174.93\text{ N}$  (34), mientras que, el momento flector es de  $-3.41\text{ Nm}$  y  $-8\text{ Nm}$ , respectivamente.

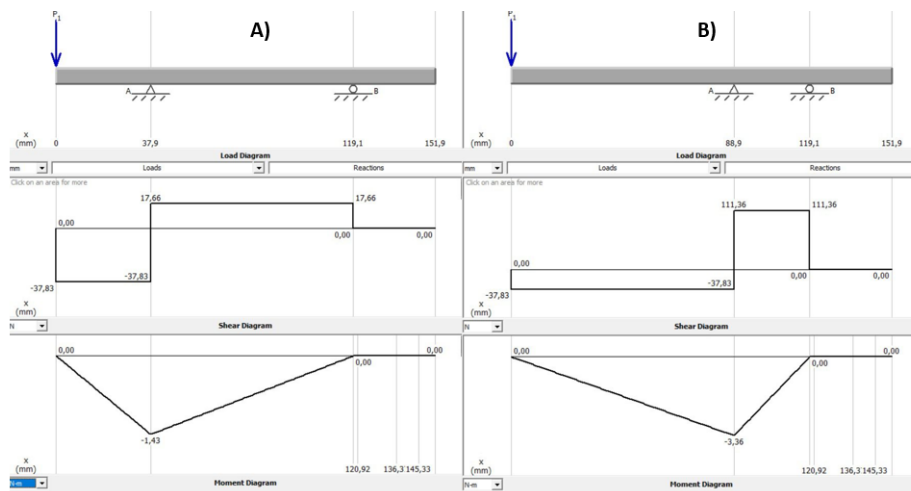


**Fig. 50.** Diagrama de momento flector y esfuerzo cortante del mecanismo del eje X; A) Posición inicial; B) Posición final.

$$\tau_x = -90\text{ N} + 42.01\text{ N} = -47.99\text{ N} \rightarrow \text{posición inicial} \quad (33)$$

$$\tau_x = -90\text{ N} + 264.93\text{ N} = 174.93\text{ N} \rightarrow \text{posición final} \quad (34)$$

Los resultados de esfuerzos cortantes en el eje Y son de  $-20.17\text{ N}$  (35) en su posición inicial y de  $73.53\text{ N}$  (36) en la final. Los de momento flector son de  $-1.43\text{ Nm}$  y de  $-3.36$  respectivamente como se ilustra en la Fig. 51.



**Fig. 51.** Diagrama de momento flector y esfuerzo cortante del mecanismo del eje Y; A) Posición inicial; B) Posición final.



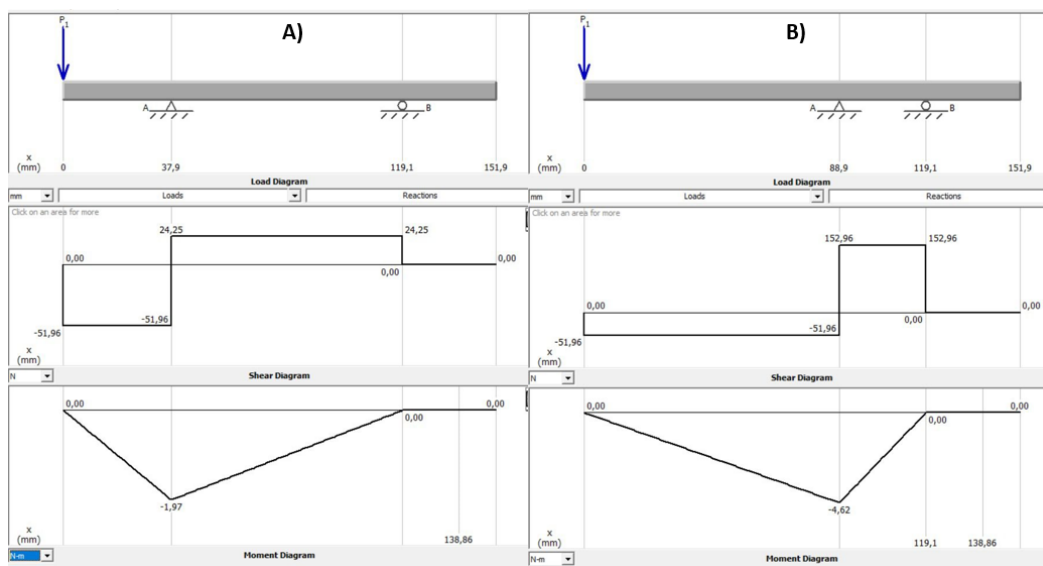
$$\tau_y = -37.83N + 17.66N = -20.17N \rightarrow \text{posición inicial} \quad (35)$$

$$\tau_y = -37.83N + 111.36N = 73.53N \rightarrow \text{posición final} \quad (36)$$

En el eje Z se consigue en la posición inicial un valor de momento flector de  $-1.97 \text{ Nm}$  y de esfuerzo cortante de  $-27.71 \text{ N}$  (37). Por otra parte, en la posición final, se muestra un momento flector de  $-4.62 \text{ Nm}$  y un esfuerzo cortante de  $101 \text{ N}$  (38). (Ver Fig. 52)

$$\tau_z = -51.96N + 24.25N = -27.71N \rightarrow \text{posición inicial} \quad (37)$$

$$\tau_z = -51.96N + 152.96N = 101N \rightarrow \text{posición final} \quad (38)$$



**Fig. 52.** Diagrama de momento flector y esfuerzo cortante del mecanismo del eje Z; A) Posición inicial; B) Posición final.

Se aplica el método del pitagoras para determinar el momento flector y esfuerzo cortante resultante del mecanismo en su posición inicial, tal como se muestra en (39). En este caso, se obtiene un esfuerzo cortante total de  $58.97 \text{ N}$  (40) y el momento flector total de  $4.18 \text{ Nm}$  (41).

$$\sqrt{(x)^2 + (y)^2 + (z)^2} \quad (39)$$

$$\tau_c = \sqrt{(-47.99)^2 + (-20.17)^2 + (-27.71)^2} = 58.97 \text{ N} \quad (40)$$

$$M = \sqrt{(-3.41)^2 + (-1.43)^2 + (-1.97)^2} = 4.18 \text{ Nm} \quad (41)$$

Por otra parte, cuando el mecanismo se encuentra en posición final, el esfuerzo cortante total es de 214.96 N (42) y el momento flector total es de 9.83 Nm (43).

$$\tau_c = \sqrt{(174.93)^2 + (73.53)^2 + (101)^2} = 214.96 \text{ N} \quad (42)$$

$$M = \sqrt{(-8)^2 + (-3.36)^2 + (-4.62)^2} = 9.83 \text{ Nm} \quad (43)$$

Se determina el esfuerzo de Von Mises usando (44), donde “d” es el diámetro interno del husillo de bloqueo de 11 mm y da un resultado de 31.99 MPa (45) en posición inicial y de 75.23 MPa (46) en la final.

$$\sigma_{VonMises} = \frac{M \times 32}{\pi \times d^3} \quad (44)$$

$$\sigma_{VonMises} = \frac{4.18 \text{ Nm} \times 32}{\pi \times 0.011^3} = 31.99 \text{ Mpa} \quad (45)$$

$$\sigma_{VonMises} = \frac{9.83 \text{ Nm} \times 32}{\pi \times 0.011^3} = 75.23 \text{ Mpa} \quad (46)$$

**Donde:**

**M**= Momento flector

**d**= Diámetro menor

Al conocer la resistencia a la tracción del polímero acetal, material del husillo de bloqueo, que es de 65 MPa, se determina que no habrá fractura en la autoparte en su posición inicial, ya que el factor de seguridad, indicado en (47), es de 2.03. Sin embargo, en su posición final el factor de seguridad es de 0.864 (48), presentando una cedencia del material.

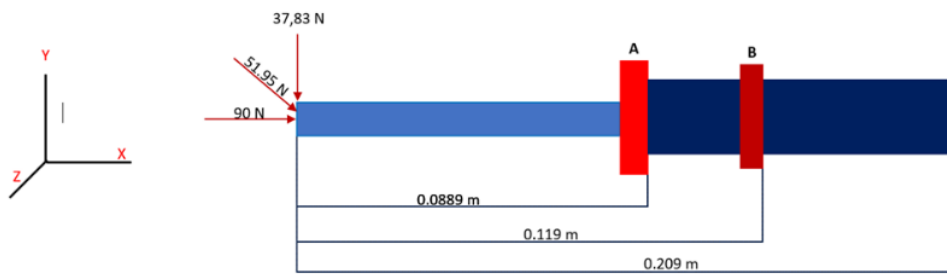
$$Fs = \frac{65 \text{ Mpa}}{31.99 \text{ Mpa}} = 2.03 \quad (47)$$

$$Fs = \frac{65 \text{ Mpa}}{75.23 \text{ Mpa}} = 0.864 \quad (48)$$

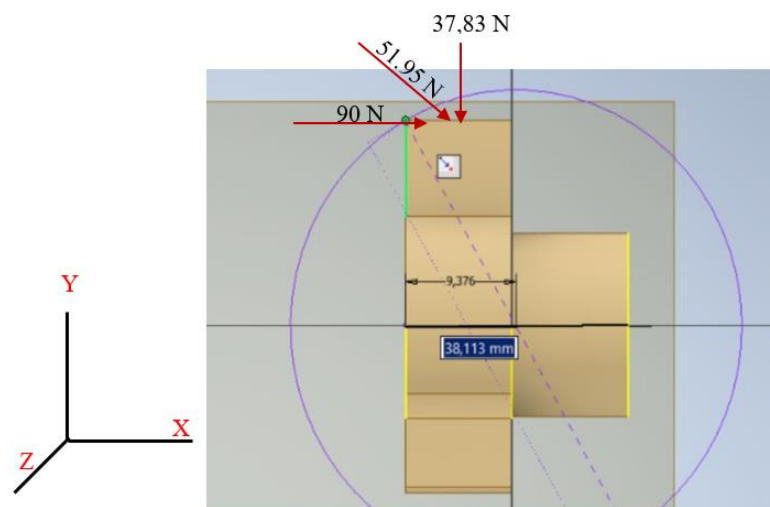
### 3.1.4.1 Análisis de fatiga del mecanismo del actuador de aceleración.

Para el análisis por fatiga de manera analítica, primero se requiere el esquema de fuerzas que impactan en el mecanismo del actuador, como se muestra en la Fig. 53. Como se conoce el punto crítico del mecanismo, en la Fig. 54., se ilustra el esquema de fuerzas y el diámetro

total del husillo de bloqueo de 38.113 mm, información relevante para conocer los momentos y esfuerzos que actúan en la autoparte.



**Fig. 53.** Esquema de fuerzas del mecanismo del actuador en su posición de trabajo final.



**Fig. 54.** Diámetro total del husillo de bloqueo.

Para determinar el momento torsor, se utiliza (49), donde “r” es de 0.019 m (50). El resultado del momento torsor es de 0.99 Nm (51).

$$T_m = F_z * r \quad (49)$$

$$r = \frac{38.113}{2} = 19.057 \text{ mm} \rightarrow 0.019 \text{ m} \quad (50)$$

$$T_m = 51.95 * 0.019 = 0.99 \text{ Nm} \quad (51)$$

**Donde:**

$F_z$ = Fuerza en z

$r$ = Radio

El cálculo del momento flector para análisis de fatiga se realiza mediante (52), El momento flector es de 8.677 Nm como se visualiza en (53).

$$M_f = \sqrt{(M_{fx})^2 + (M_{fy})^2} \quad (52)$$

$$M_f = \sqrt{(8)^2 + (3.36)^2} = 8.677 \text{ Nm} \quad (53)$$

**Donde:**

$M_{fx}$  = Momento flector por fatiga en el eje x

$M_{fy}$  = Momento flector por fatiga en el eje y

Se calcula la resistencia a la fatiga momentánea, donde "Sut" es la resistencia del material acetal (65 MPa/10 Ksi) y se obtiene un valor en (54) de 32.5 MPa.

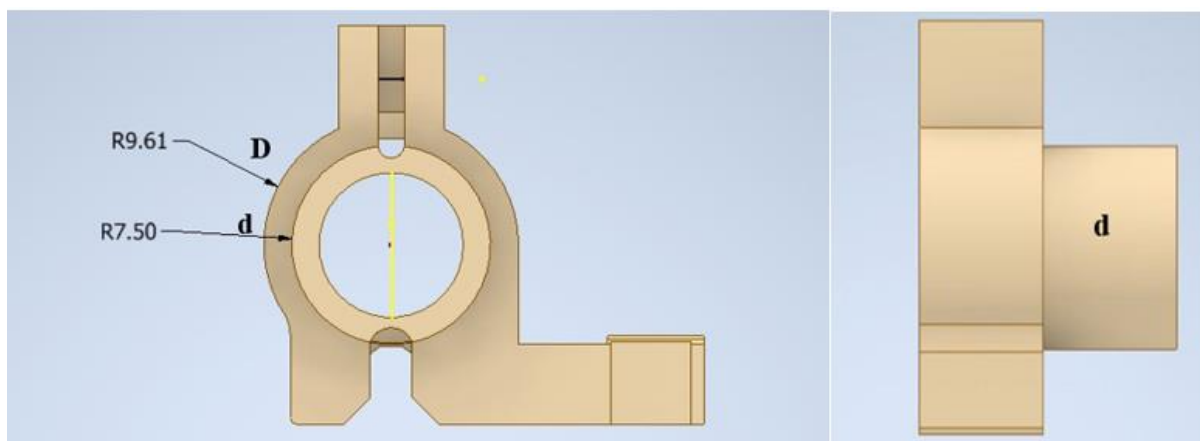
$$S_e' = 0.5(65) = 32.5 \text{ MPa} \quad (54)$$

Después se obtiene el coeficiente de modificación de la condición superficial, como no se conoce el proceso de fabricación del husillo de bloqueo, el factor "k<sub>a</sub>" será igual a 1. Para conseguir el factor de modificación del tamaño o "k<sub>b</sub>", se obtiene primero el "d<sub>e</sub>" y da un valor de 5.55 mm (55), con este valor se encuentra "k<sub>b</sub>" que es de 1.032 (56).

$$d_e = 0.370(15) = 5.55 \text{ mm} \quad (55)$$

$$k_b = 1.24 * 5.55^{-0.107} = 1.032 \quad (56)$$

El valor del "k<sub>c</sub>" es igual a 1, por motivo de que en el mecanismo se aplican los tres tipos de carga. Mismo caso sucede con el factor de temperatura que es de 1. La confiabilidad para resolver la fatiga del mecanismo es de 99%. Por lo tanto, el ANEXO 3 indica que el "k<sub>e</sub>" es de 0.814. A continuación, se determina en el husillo de bloqueo el D/d y r/d con lo mostrado en la Fig. 55. el valor de D/d es de 1.267 (57) y un r/d de 0 (58), al no contar con muesca el diseño original del husillo de bloqueo como se muestra en la misma figura.



**Fig. 55.** Diámetros exteriores y vista lateral del husillo de bloqueo.

$$\frac{D}{d} = \frac{19.22}{15} = 1.267 \quad (57)$$

$$\frac{r}{d} = \frac{0}{15} = 0 \quad (58)$$

Después de conocer (57) y (58), se interpola con los valores de la tabla VII y (59). El resultado de “ $K_t$ ” es de 2.77 (60) y el “ $K_{ts}$ ” es de 2.3. (Ver ANEXO 4 y 5)

**TABLA VIII**

**INTERPOLACION DEL FACTOR  $K_t$**

<b>D/d (X)</b>	<b><math>K_t</math> (Y)</b>
1.1 ( $x_0$ )	2.6 ( $y_0$ )
1.27 (x)	Y
1.5 ( $x_1$ )	3 ( $y_1$ )

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} (x - x_0) \quad (59)$$

$$K_t = 2.6 + \frac{3 - 2.6}{1.5 - 1.1} (1.27 - 1.1) = 2.77 \quad (60)$$

El valor de “q” es de 1 para flexión y torsión como se muestra en (61). Por lo tanto, se obtiene que el valor de “ $K_f$ ” es 2.77 y de “ $K_{fs}$ ” es 2.3 como se muestra en (62).

$$q = \frac{1}{1 + \frac{0.5}{\sqrt{0}}} = 1 \qquad q_s = \frac{1}{1 + \frac{0.5}{\sqrt{0}}} = 1 \qquad (61)$$

$$K_f = 1 + 1(2.77 - 1) = 2.77 \qquad K_{fs} = 1 + 1(2.3 - 1) = 2.3 \qquad (62)$$

Como se evidencia en (63), se determina que el límite de resistencia a la fatiga es de 27.308 MPa.

$$Se = 1.032 * 1 * 1 * 0.814 * 0.5(65) = 27.308 \text{ MPa} \qquad (63)$$

Se calcula el esfuerzo alternante y medio reestructurando (21) y (22) para utilizar (64) y (65). Por consiguiente, el esfuerzo alternante es 72.529 MPa (66) y el esfuerzo medio es de 5.952 MPa (67).

$$\sigma_a = \frac{32 * k_f * M_f}{\pi * d^3} \qquad (64)$$

$$\sigma_m = \frac{\sqrt{3} * 16 * k_{fs} * T_m}{\pi * d^3} \qquad (65)$$

$$\sigma_a = \frac{32 * 2.77 * 8.677}{\pi * 15^3} = 72.539 \text{ MPa} \qquad (66)$$

$$\sigma_m = \frac{\sqrt{3} * 16 * 2.3 * 0.99}{\pi * 15^3} = 5.952 \text{ MPa} \qquad (67)$$

**Donde:**

$k_f$  = Factor de modificación de efectos varios normal

$k_{fs}$  = Factor de modificación de efectos varios cortantes

$M_f$  = Momento flector por fatiga

$T_m$  = Momento torsor

Identificando todas las variables, se procede al cálculo del factor de seguridad por fatiga, el cual arroja un resultado de 0.364, como se indica (68).

$$nf = \frac{1}{\frac{72.539}{27.308} + \frac{5.952}{65}} = 0.364 \qquad (68)$$

Al existir fatiga, se calcula los ciclos de vida del husillo de bloqueo, primero se calcula “ $S_m$ ” que da 58.5 MPa (69), luego “ $b$ ” con un valor de -0.11 en (70) y “ $a$ ” que es 125.32 (71).

$$S_m = 0.9 * 65 = 58.5 \text{ MPa} \quad (69)$$

$$b = \frac{1}{3} * \log \frac{58.5}{27.308} = -0.11 \quad (70)$$

$$a = \frac{58.5^2}{27.308} = 125.32 \quad (71)$$

Se obtiene de forma analítica que a los 142.23 ciclos el husillo de bloqueo presenta fractura por fatiga como se visualiza en (72).

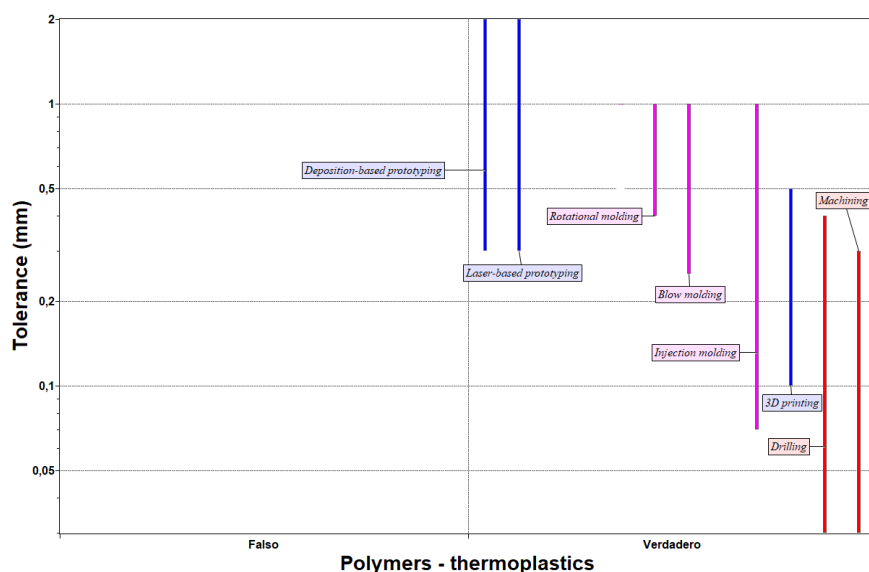
$$N = \frac{72.539^{\frac{1}{-0.11}}}{125.32} = 142.229 \text{ Ciclos} \quad (72)$$

Al determinar el modo de fallo de la autoparte por medio de tecnologías CAD y CAE. Durante el funcionamiento, el husillo de bloqueo experimenta fuerzas significativas que dan lugar a la deformación gradual del material a lo largo del tiempo. Esta deformación, conocida como cedencia, se manifiesta después de 100 a 1000 ciclos de funcionamiento. El resultado de la cedencia es la disminución de la efectividad del actuador y, en última instancia, el deterioro del rendimiento y la funcionalidad de la maquinaria.

### 3.2 Rediseño del husillo de bloqueo.

#### 3.2.1 Selección del material

Para el rediseño del husillo, se selecciona el material adecuado, por lo que se utiliza el software Granta, se establece el parámetro de selección de la técnica de manufactura aditiva idónea para la fabricación de termoplásticos. Un parámetro decisivo es la tolerancia de fabricación, porque se caracteriza por su nivel mínimo de margen de error en la fabricación de las piezas. El objetivo es lograr que las dimensiones de la pieza a fabricar sean idénticas a las del diseño original. Por esta razón, se lleva a cabo un análisis de los procesos que son compatibles tanto con los termoplásticos como con la geometría del husillo, como se observa en la Fig. 56. La técnica de menor tolerancia compatible es la impresión 3D con valor de 0.1 a 0.05 mm.



**Fig. 56.** Grafica comparativa de las técnicas de manufactura aditiva con los parametros de tolerancia y materiales termoplasticos.

Se lleva a cabo una investigación de los materiales que son utilizados en las técnicas de impresión 3D. Se selecciona 10 materiales para impresión 3D y en la tabla IX se detallan los fabricantes y modelos de los filamentos que se comercializan, además de los parámetros a analizar de cada material.

**TABLA IX**

**MODELO, FABRICANTE Y PARAMETROS PROPUESTOS**

Material	Fabricante	Parámetros
ABS Pro	FormFutura [56]	
PLA PREMIUN	FormFutura [57]	➤ Densidad
TPU – PYTHON FLEX	FormFutura [58]	➤ Precio
PLA+	Esun [59]	➤ Temperatura de extrusión,
PLA + 10% Carbon Fiber	Bambu Lab [60]	➤ Temperatura máxima de trabajo
POM (Acetal)	Tarfuse [61]	
PC (Policarbonato) + 20% Carbon Fiber	3DXTech [62]	➤ Resistencia a la tracción
PP + 30% Glass Fiber	3DXTech [63]	
PETG + 20% Carbon Fiber	3DXTech [64]	
PETG CF	Nanovia [65]	



### 3.2.1.1 Selección del material por densidad

En la Fig. 57. se visualiza los valores de densidad correspondientes a los diferentes materiales seleccionados. Este parámetro ejerce influencia sobre el peso que la pieza adquiere al fabricarse con el nuevo material. Por ende, se garantiza que el material seleccionado no añada peso adicional al actuador.

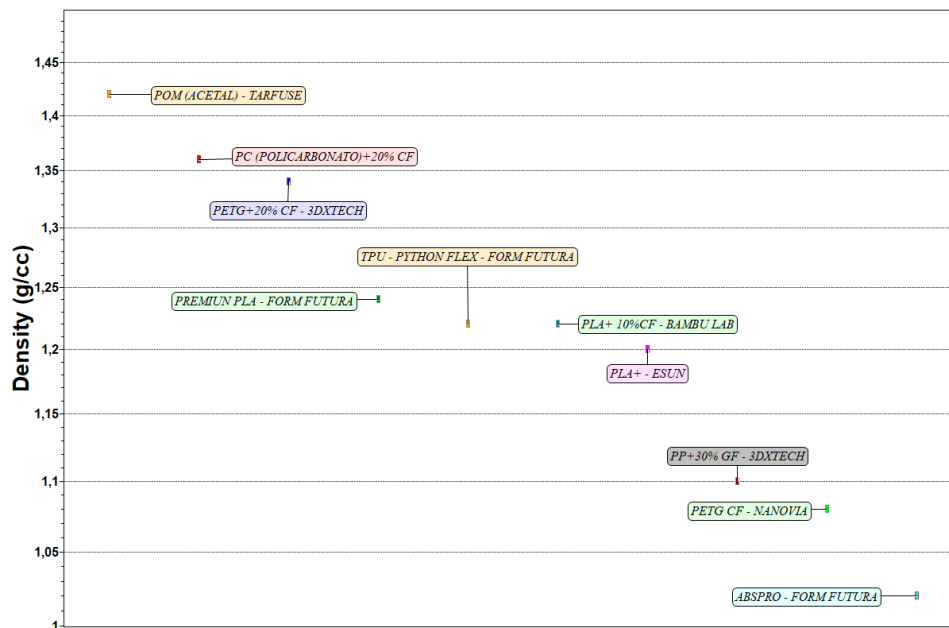


Fig. 57. Grafica comparativa de la densidad de los materiales termoplásticos.

### 3.2.1.2 Selección de material por temperatura de trabajo.

La temperatura de trabajo es uno de los factores críticos a considerar durante la selección de materiales termoplásticos, ya que señala el punto de inicio de la fusión del material. En el actuador eléctrico, su máxima temperatura de operación se sitúa en 125°C. En la Fig. 58. se presentan visualmente 10 materiales los cuales solo 6 cumplen con esta condición, entre los cuales son:

- ABS PRO
- Premium PLA
- PLA +
- Acetal (POM)
- PLA + 10% CF
- Policarbonato (PC).

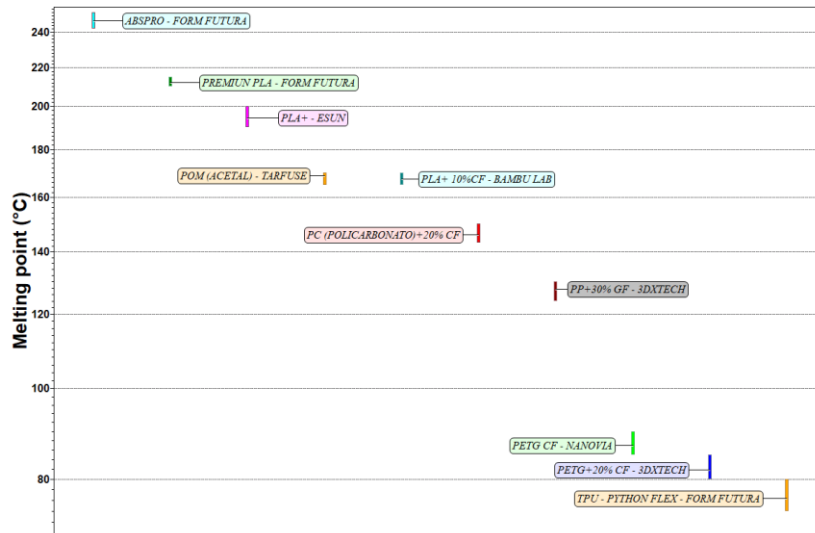


Fig. 58. Gráfica comparativa de la temperatura de trabajo de los materiales termoplásticos.

### 3.2.1.3 Selección del material por precio

Cada fabricante presenta una gama diversa de precios para sus materiales, los cuales se ajustan según el peso del producto. Los rollos de filamento suelen oscilar entre un mínimo de 500 gramos y un máximo de 2 kilogramos. El precio varía según la demanda y las necesidades del material. En la Fig. 59. se visualiza cómo el PLA Premium del fabricante FormFutura ofrece una amplia variedad de precios en función del peso, en comparación con otros materiales.

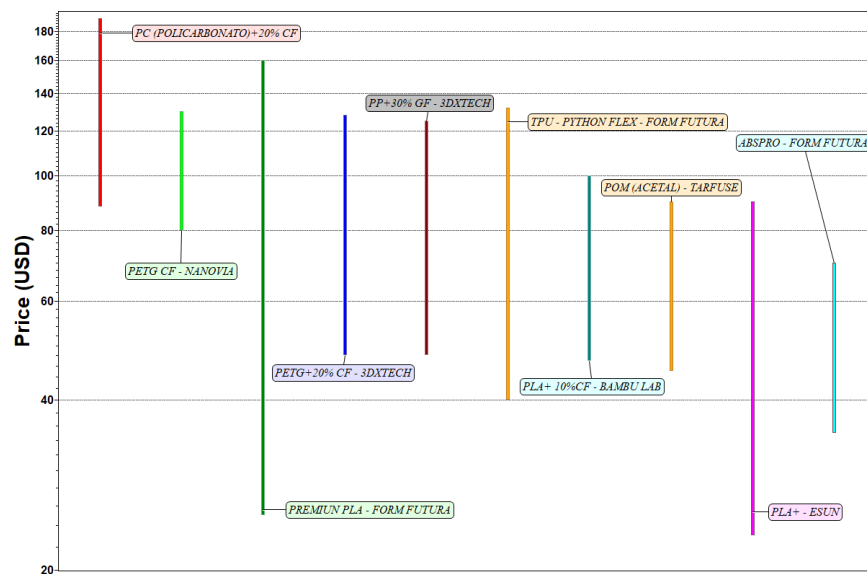


Fig. 59. Gráfica comparativa del precio de los materiales termoplásticos.

### 3.2.1.4 Selección del material por temperatura de extrusión

Es importante considerar este factor, imprimir a temperaturas superiores a las recomendadas para los materiales desencadenan consecuencias negativas. Estas incluyen una calidad de impresión deficiente, deformaciones en el objeto impreso, bloqueos en el extrusor e incluso daños en la impresora. Es fundamental tener en mente las especificaciones brindadas por el fabricante de la impresora, por ejemplo, la impresora Ender 3 Pro, el fabricante menciona [69] que la temperatura máxima de extrusión es de 260°C. En la Fig. 60 se muestra visualmente siete de los diez materiales que cumplen con esta condición.

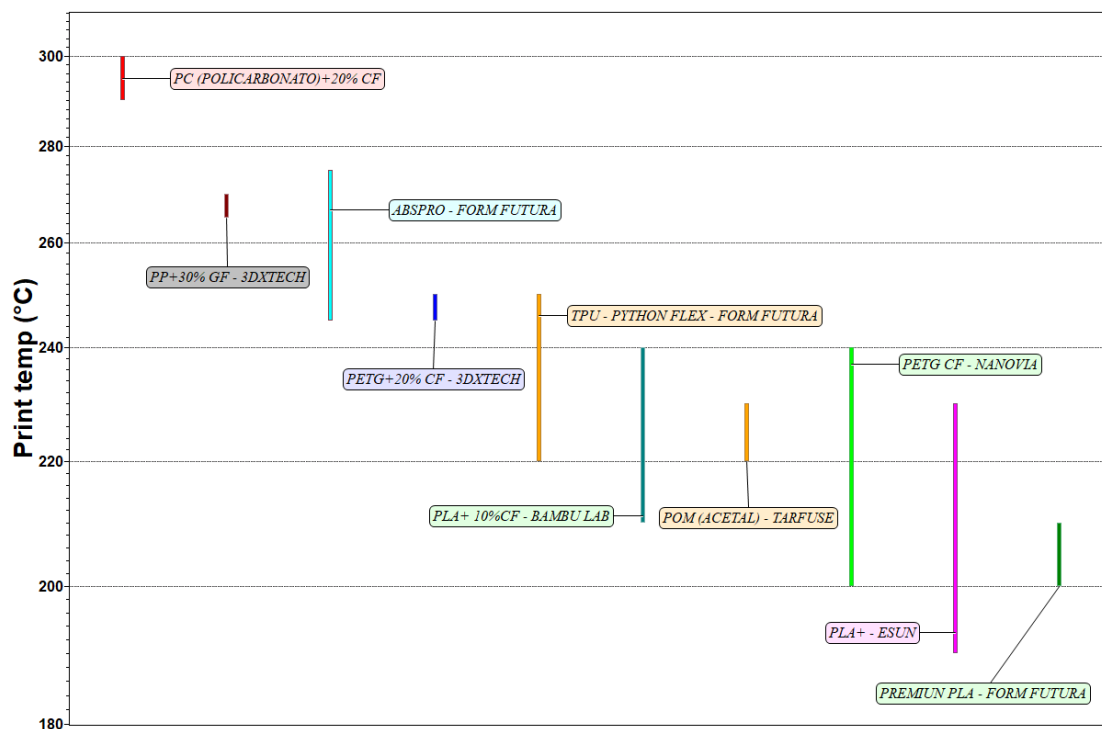
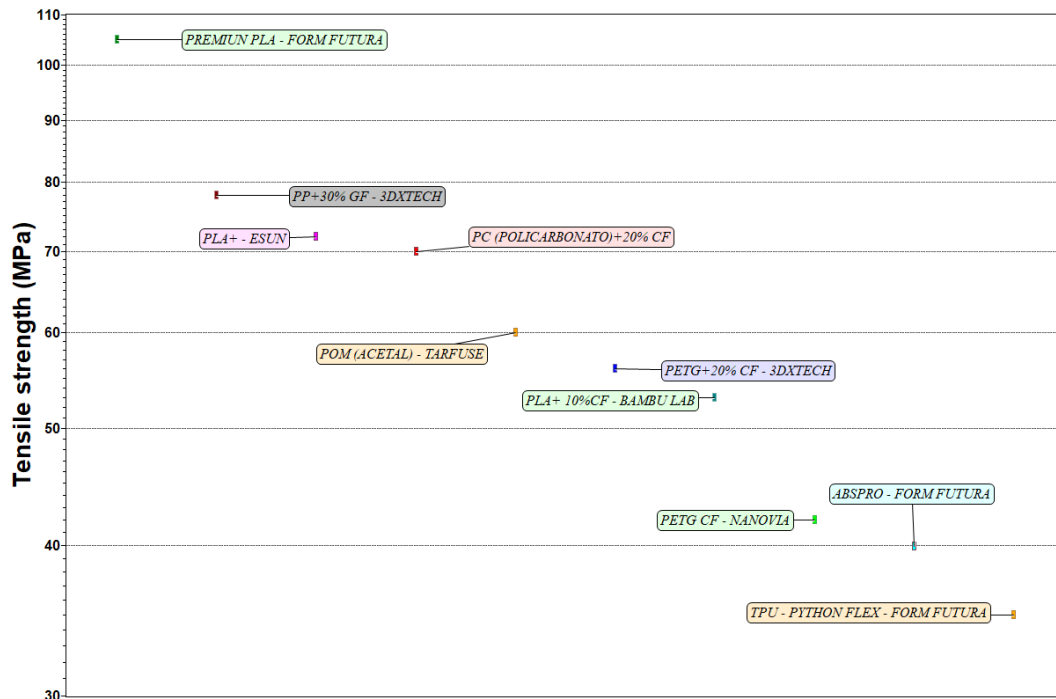


Fig. 60. Grafica comparativa de la temperatura de extrusión de los materiales termoplásticos.

### 3.2.1.5 Selección del material por la resistencia a la tracción.

Este parámetro adquiere una importancia significativa, por motivo de mantener una conexión directa con el factor de seguridad del mecanismo del husillo. Resulta esencial que el material seleccionado exhiba un valor de factor de seguridad superior a 1. En la Fig. 61, se proporciona una representación visual de los materiales que superan al Acetal en términos de resistencia a la tracción. Entre estos materiales, el PLA Premium destaca por su resistencia a la tracción más elevada, con un valor de 105 MPa.

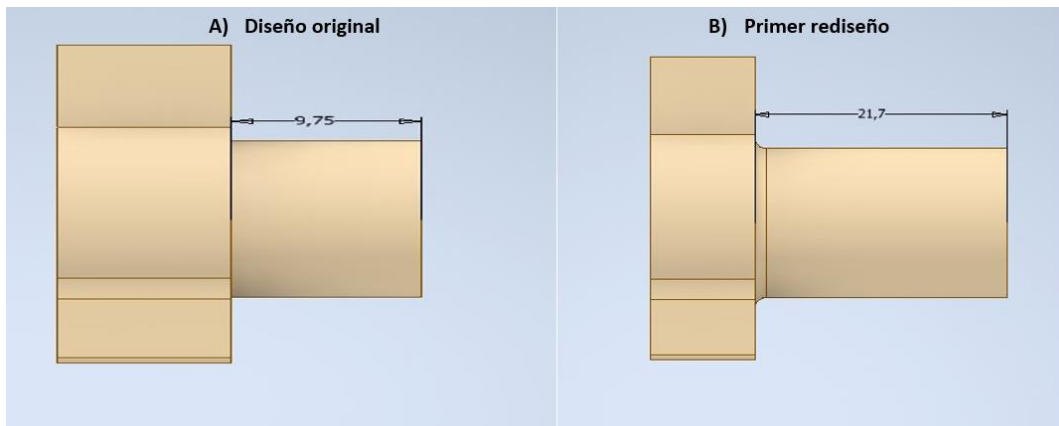


**Fig. 61.** Grafica comparativa de la resistencia a la tracción de los materiales termoplásticos.

### 3.2.2 Modelado de los rediseños del husillo de bloqueo.

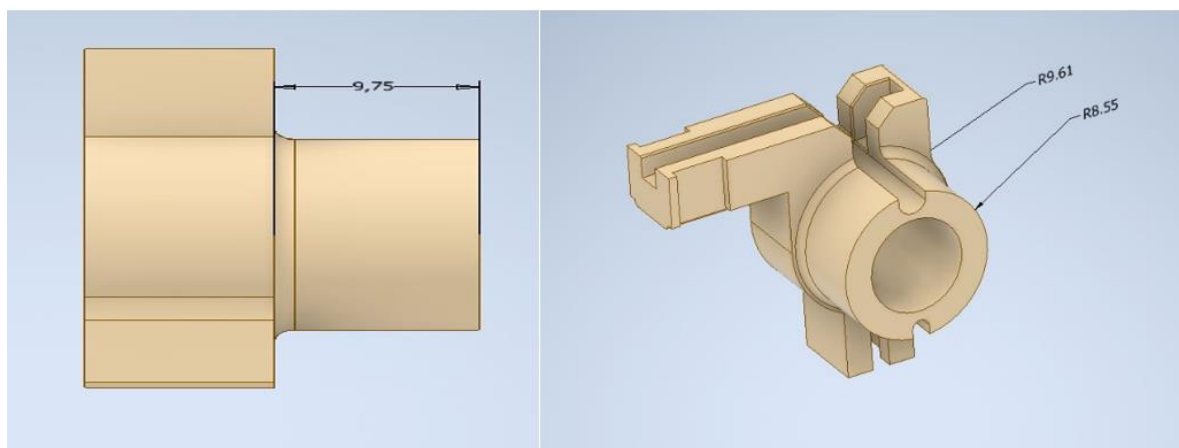
Se lleva a cabo tres rediseños para determinar el husillo de bloqueo más adecuado para desempeñar la correcta función del actuador de aceleración. Cada uno de estos rediseños se somete al modelado y simulación. Las propuestas de rediseño se basan en [66], donde el diseño de un elemento se ven afectados por factores externos al elemento que está siendo diseñado, lo que implica que cualquier modificación en el husillo requiere una cuidadosa evaluación del impacto que ese cambio tiene en los demás elementos. Por otro lado, se mantiene dentro de las dimensiones admisibles en el mecanismo, por consiguiente, en el diseño por resistencia se obtiene una mejor distribución de fuerzas que se genera en la unión con el vástago, además para una mayor rigidez en el diseño, se engrosa el husillo para aumentar la sujeción vástago del actuador, así como indica [67]. Para una mayor confiabilidad, estabilidad y sujeción efectiva y segura del elemento se unifica estos parámetros para que el elemento final tenga una mejor resistencia a las fuerzas generadas en el mecanismo.

El primer prototipo fue un rediseño por resistencia lo que implica al alargamiento del husillo de bloqueo en el diámetro que se conecta al cilindro del actuador. Su longitud aumenta de 9.75 mm a 21.7 mm, y también se incorpora un empalme de 1 mm para reducir las tensiones en el husillo de bloqueo (Ver Fig. 62).



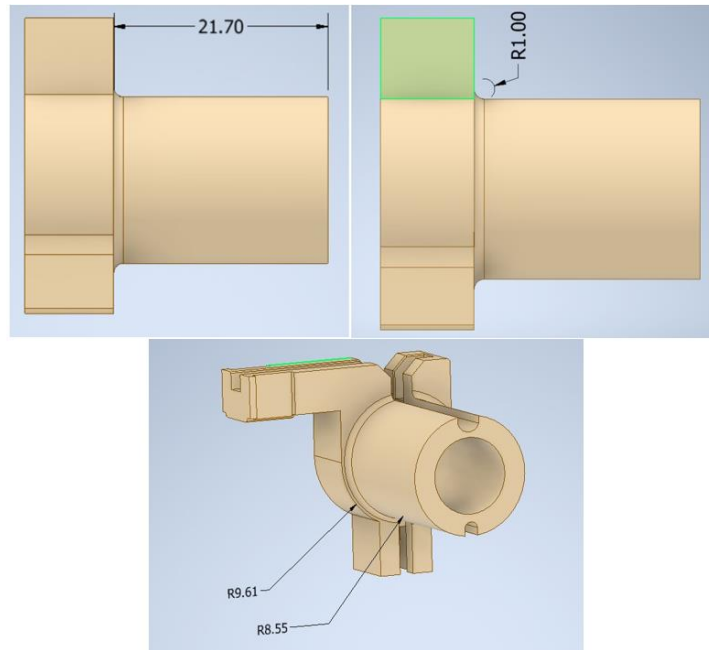
**Fig. 62.** Dimensión del primer prototipo de rediseño del husillo de bloqueo del mecanismo del actuador.

El segundo prototipo fue un rediseño por rigidez, se modifica la anchura del diámetro que se conecta al cilindro del actuador, donde se incrementa el diámetro de 15 mm a 17.1 mm. Además, se añade un empalme de 1 mm (Ver Fig. 63).



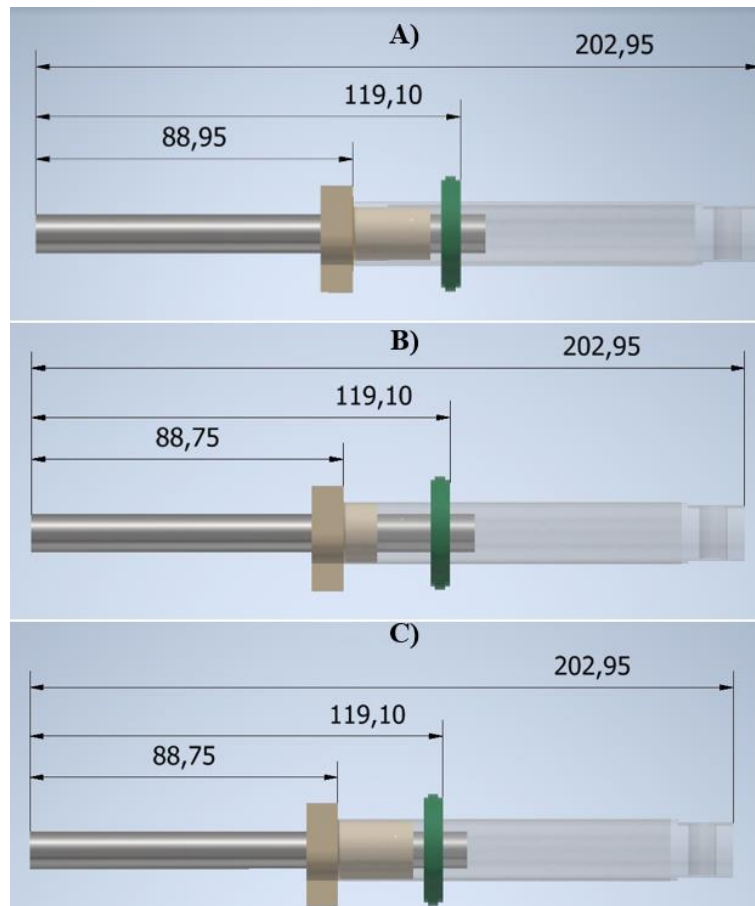
**Fig. 63.** Dimensión del segundo prototipo de rediseño del husillo de bloqueo del mecanismo del actuador.

El tercer prototipo modelado fue un rediseño por resistencia – rigidez, donde se aumenta la confiabilidad del buen funcionamiento del husillo. El diámetro del husillo de bloqueo que se conecta al cilindro del actuador se alarga de 9.75 mm a 21.7 mm y se ensancha de 15 mm a 17.1 mm. Este rediseño también incluye el empalme de 1 mm presente en los otros rediseños modelados como se muestra en la Fig. 64.



**Fig. 64.** Dimensión del tercer prototipo de rediseño del husillo de bloqueo del mecanismo del actuador.

En la Fig. 65. Se observa el modelado de los tres prototipos de rediseños del husillo de bloqueo con las medidas respectivas de la posición final del mecanismo, para de esta manera importar el archivo en formato STEP y agregar la geometría en el software ANSYS Workbench para la respectiva simulación.



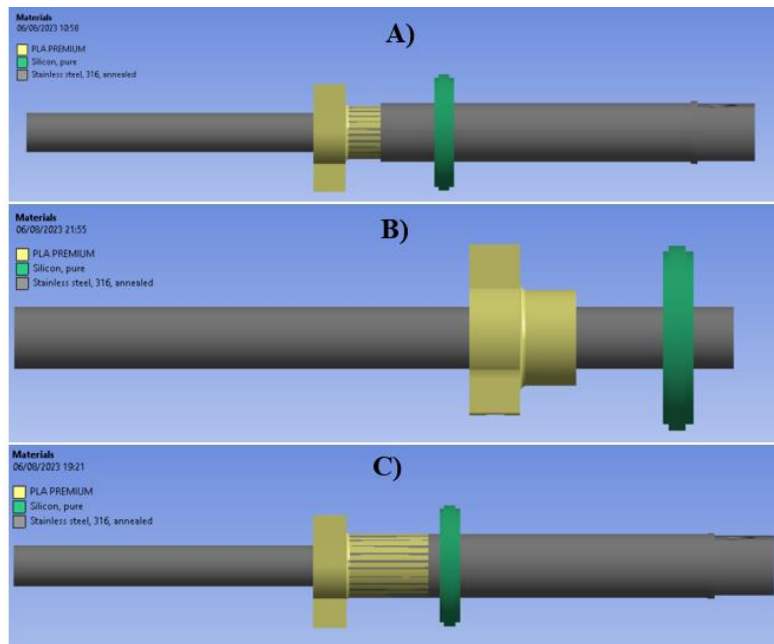
**Fig. 65.** Esquema de rediseños del husillo de bloqueo del mecanismo del actuador; A) Rediseño por resistencia; B) Rediseño por rigidez; C) Rediseño por resistencia y rigidez.

### 3.3 Validación de datos por simulación y métodos analíticos.

La simulación por elementos finitos se basa en modelos matemáticos y suposiciones, y la validación posterior garantiza su correspondencia precisa con el comportamiento del sistema real. Al comparar los resultados de la simulación con datos reales obtenidos de métodos analíticos, se evalúa la precisión y fiabilidad de la simulación. Además, la validación identifica deficiencias en el modelo de simulación y permite ajustes de parámetros. Esta validación es crucial para decisiones informadas y confiables, especialmente en la industria automotriz, donde las simulaciones por elementos finitos se emplean para predecir comportamientos en sistemas complejos y costosos, aumentando la confianza y reduciendo riesgos de fallos costosos o inseguros.

### 3.3.1 Asignación de materiales al mecanismo del actuador

Al incorporar la geometría en el software ANSYS Workbench, se agrega los materiales a las diferentes piezas del mecanismo, según corresponda. En la Fig. 66 el acero estructural sigue siendo el material para el tornillo sin fin y cilindro actuador, la silicona pura del rin de actuador y el husillo bloqueo pasa a tener del material Acetal a PLA PREMIUM de FormFutura, este proceso se repite en cada uno de los rediseños.



**Fig. 66.** Asignación de materiales a las autopartes del mecanismo del actuador (Rediseños); A) Rediseño por resistencia; B) Rediseño por rigidez; C) Rediseño por resistencia y rigidez.

#### 3.3.1.1 Asignación del mallado en el mecanismo del actuador

Las conexiones para realizar la simulación de los tres rediseños siguen siendo “no separation” y las observadas en la simulación del diseño original. Por lo que, se realiza el mallado de las simulaciones para los tres rediseños como se ilustra en la Fig. 67, 68 y 69. En la TABLA X, se visualiza la cantidad de elementos, nodos y calidad de mallado por calidad de elemento (Ce) y aspecto de radio de cada rediseño que se generan en la simulación.



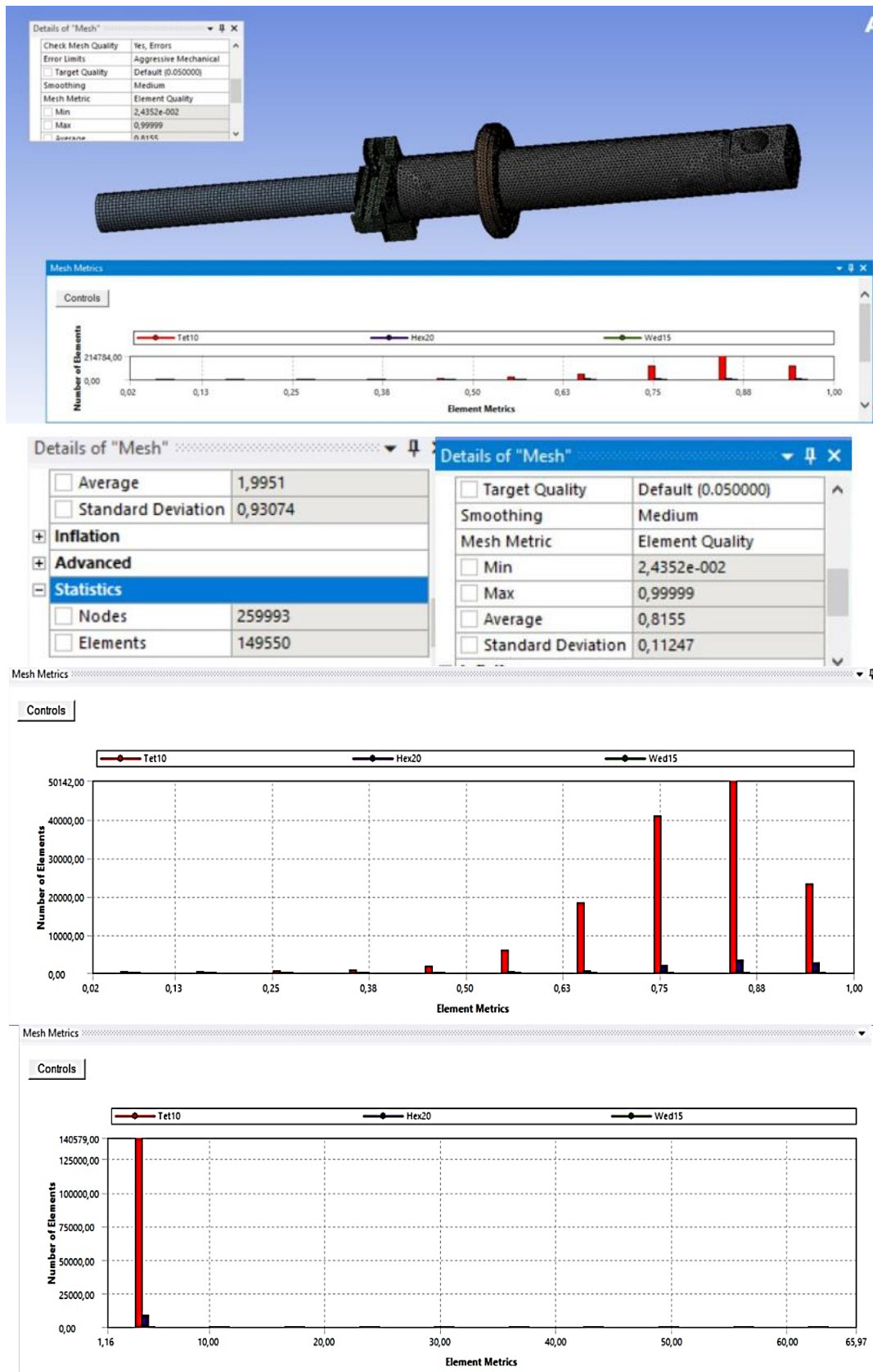


Fig. 67. Mallado en el mecanismo del actuador (Rediseño por resistencia).

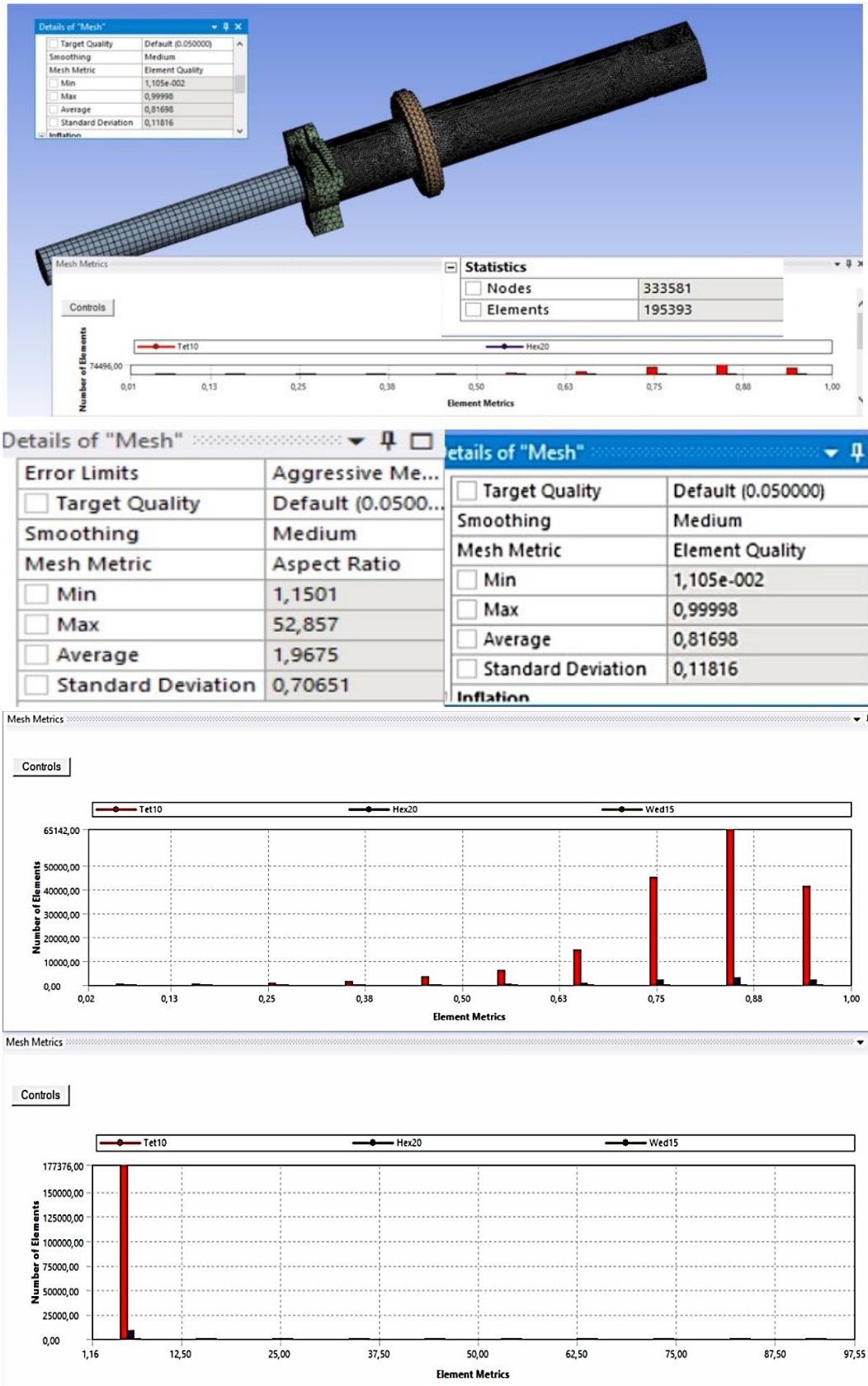


Fig. 68. Mallado en el mecanismo del actuador (Rediseño por rigidez).

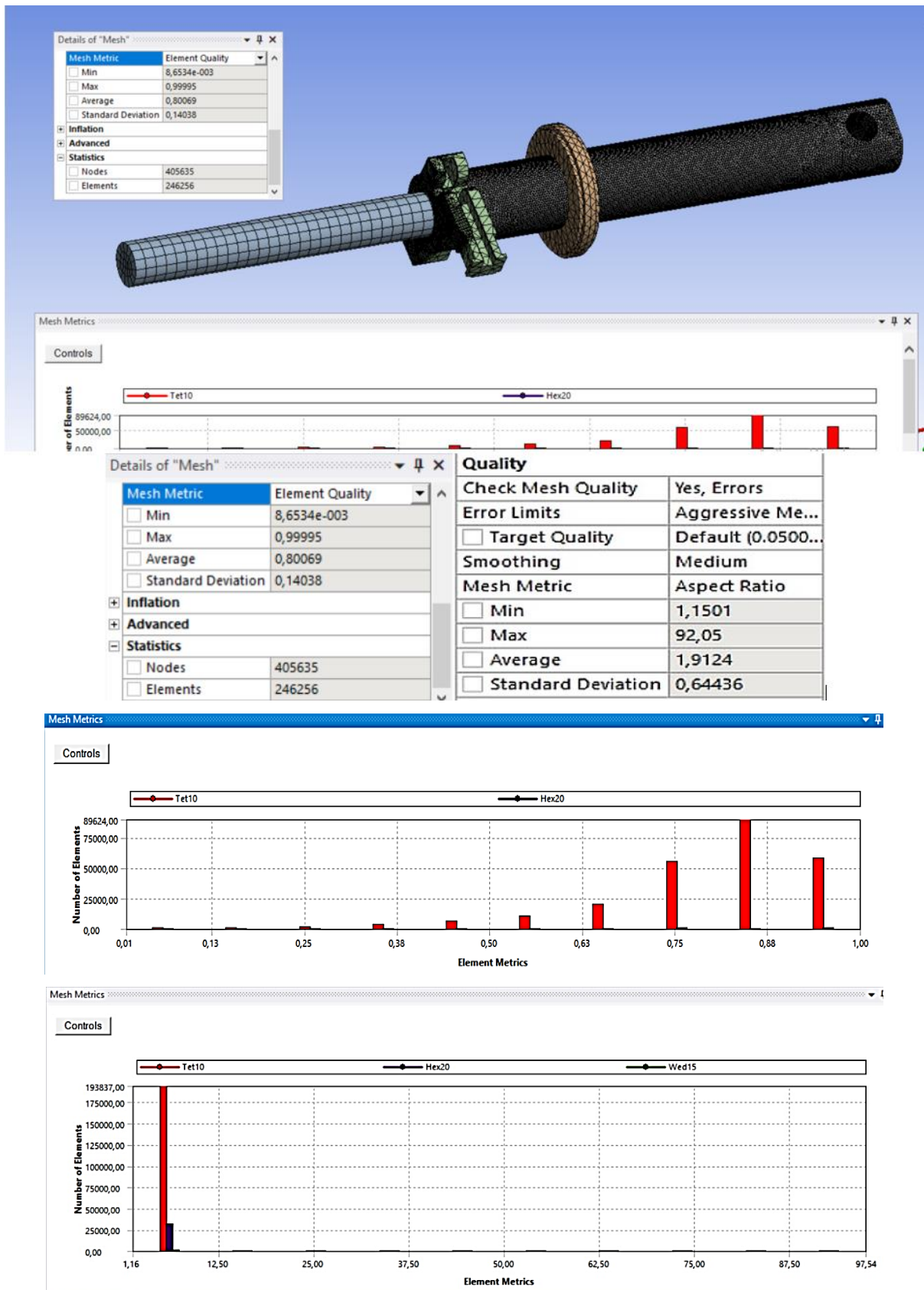


Fig. 69. Mallado en el mecanismo del actuador (Rediseño por resistencia - rigidez).

**TABLA X**  
**PARÁMETROS DEL MALLADO DEL MECANISMO DEL ACTUADOR**  
**(REDISEÑOS)**

<b>Rediseños</b>	<b>Cantidad de nodos</b>	<b>Cantidad de elementos</b>	<b>Calidad del mallado (Ce)</b>	<b>Aspecto de radio</b>
Rediseño 1	259993	149950	0.8155	1.9951
Rediseño 2	333581	195393	0.81698	1.9675
Rediseño 3	405635	246256	0.80069	1.9124

*Caracterización de la malla.*

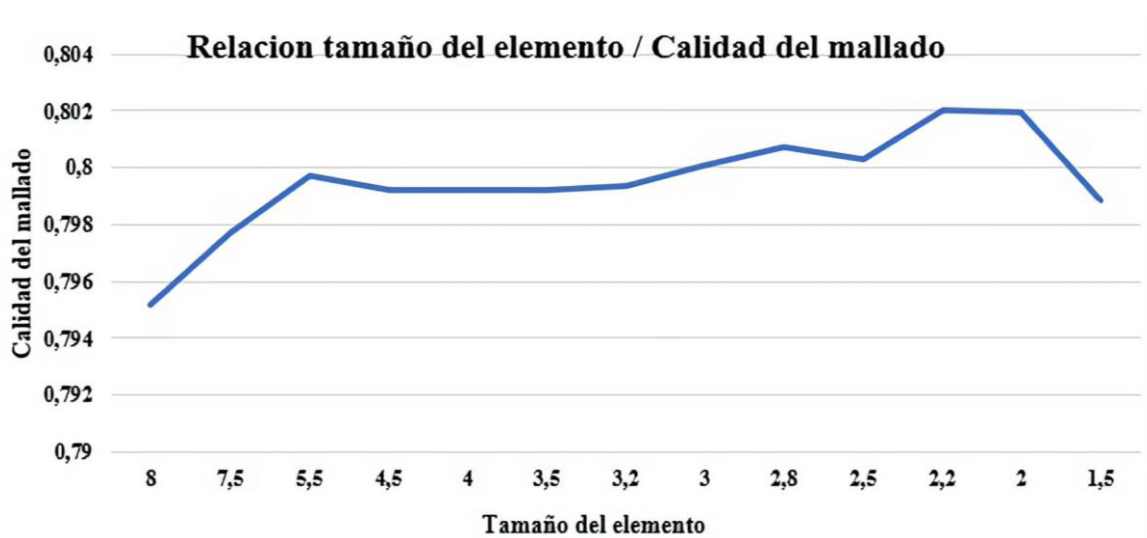
Se elabora la caracterización de la malla parametrizando el tamaño de los elementos con relación al número de elementos, calidad del mallado, aspect radio, numero de nodos, esfuerzos de Von Mises y deformación del husillo, cuyos resultados se presentan en la TABLA XI, con los datos se obtiene las curvas de convergencia o singularidad.

**TABLA XI**  
**CARACTERIZACIÓN DEL MALLADO.**

<b>Tamaño del elemento (mm)</b>	<b>Elemento #</b>	<b>Calidad del mallado</b>	<b>Aspect radio</b>	<b>Nodos #</b>	<b>Von Mises (MPa)</b>	<b>Deformación (mm)</b>
8	212168	0,7952	2,0898	355730	15,546	0,01552
7,5	215301	0,79772	2,0687	362363	17,274	0,017983
5,5	232465	0,79972	2,0659	391103	20,106	0,017757
4,5	235465	0,7992	2,0633	389695	23,439	0,017049
4	236538	0,79922	2,0625	385862	24,533	0,016334
3,5	242928	0,79924	2,055	368880	26,49	0,014172
3,2	246415	0,79936	2,0512	368419	27,214	0,015466
3	254518	0,80009	2,0202	398771	27,609	0,01619
2,8	262298	0,80069	1,9124	426959	28,48	0,017472
2,5	262511	0,80027	2,0322	415722	52,7	0,033036

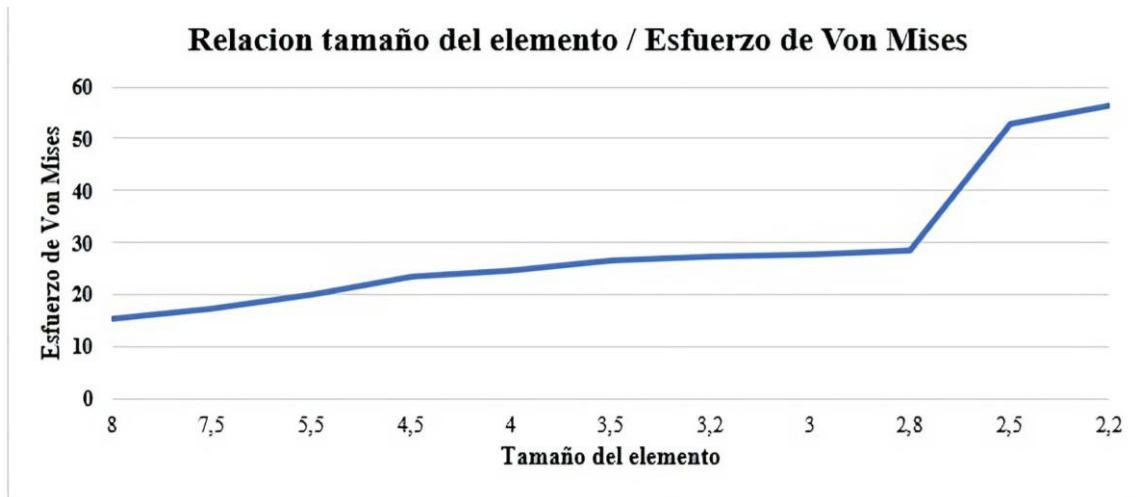
2,2	263240	0,80199	2,0166	429192	56,41	0,035039
2	284126	0,80197	2,0037	458864	58,069	0,027619
1,5	346651	0,79883	2,0059	546483	69,054	0,039631
1	521917	0,78275	2,0413	789836	73,598	0,03999

En las curvas de caracterización del mallado se observa que a partir de los tamaños de elementos que van desde 2.8 mm hasta 5.5 mm, la calidad del mallado se estabiliza en un rango de valores que oscila entre 0.799 y 0.802.



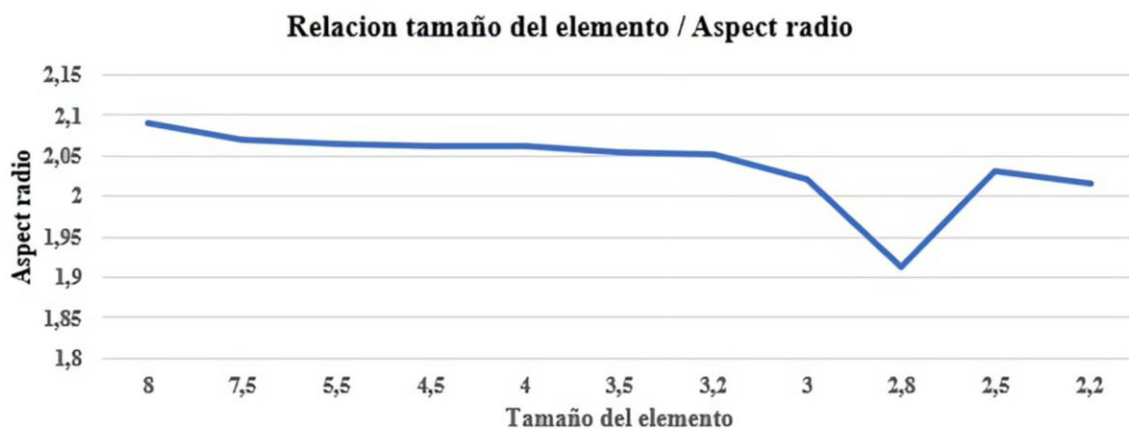
**Fig. 70.** Curvas de caracterización del mallado.

En la Fig. 71 se evidencia una convergencia con los valores del esfuerzo de Von Mises. Sin embargo, a partir de un tamaño de elemento de 2.5 mm, los esfuerzos de Von Mises aumentan significativamente, donde se ocasiona una singularidad del mallado.



**Fig. 71.** Curvas de caracterización del mallado.

Para la selección del tamaño de los elementos en la malla, es de suma importancia que la relación entre las dimensiones de los elementos finitos utilizados en el modelo del mecanismo, conocida como "aspect ratio", se aproxime lo máximo posible a 1. En el análisis de elementos finitos, se busca mantener un aspect ratio cercano a 1 para prevenir distorsiones de la geometría y garantizar resultados precisos, al analizar la curva del aspect ratio, se observa que el valor más cercano a 1 corresponde a un tamaño de elemento de 2.8 mm. Por lo tanto, se opta por un valor de 2.8 mm para el mallado.

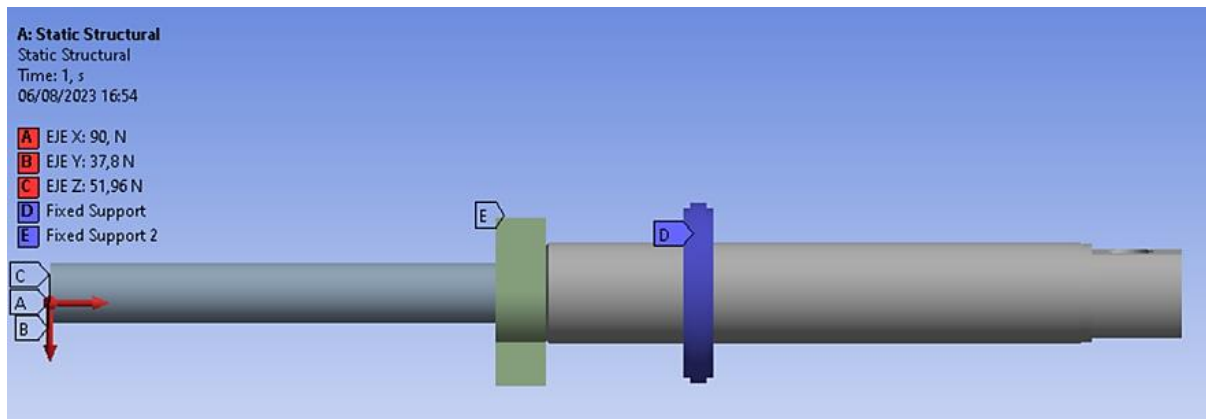


**Fig. 72.** Curvas de caracterización del mallado.

### 3.3.1.2 Asignación de las condiciones de frontera del mecanismo.

Se agrega las fuerzas y soportes fijos del mecanismo, en aquellas no existe variación con la simulación del diseño original, como se muestra en la Fig. 73.

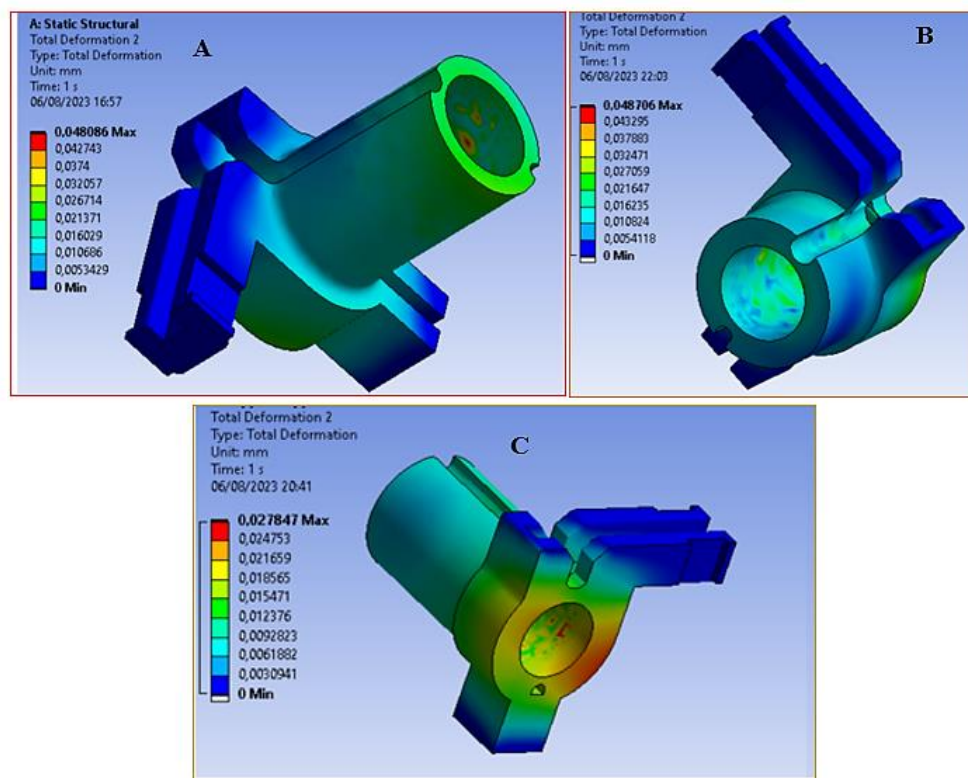




**Fig. 73.** Asignación de fuerzas y soportes en el mecanismo del actuador (Rediseños).

### 3.3.2 Análisis de deformaciones de los rediseños del husillo de bloqueo.

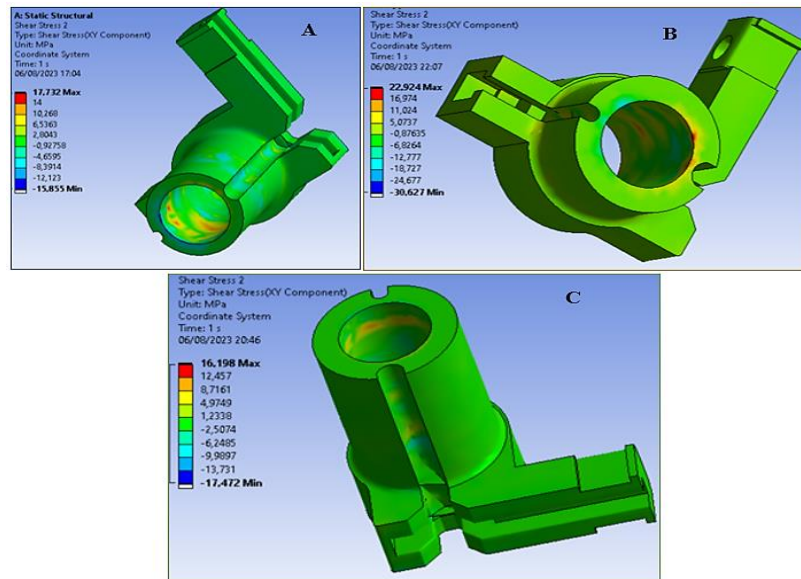
Los resultados del rediseño por resistencia muestran una deformación máxima de 0.048 mm, en el rediseño por rigidez, se identifica una deformación máxima de 0.048 mm. Al llevar a cabo el rediseño por resistencia - rigidez, se muestra una deformación máxima de 0.0278 mm. Estos valores son considerablemente más bajos en comparación con las deformaciones que se observan en el primer y segundo prototipo como se ilustra en la Fig. 74.



**Fig. 74.** Deformaciones presentadas en los 3 rediseños del husillo.

### 3.3.2.1 Análisis de esfuerzos cortantes en el mecanismo del actuador de los rediseños del husillo de bloqueo.

En el análisis del husillo de bloqueo, se identifica un esfuerzo cortante máximo de 17.732 MPa en el rediseño por resistencia, en el rediseño por rigidez se presentan valores de esfuerzos cortantes de 22.92 MPa. Sin embargo, en el rediseño por resistencia - rigidez, el esfuerzo cortante registra un valor máximo de 16.198 MPa mostradas en la Fig. 75.

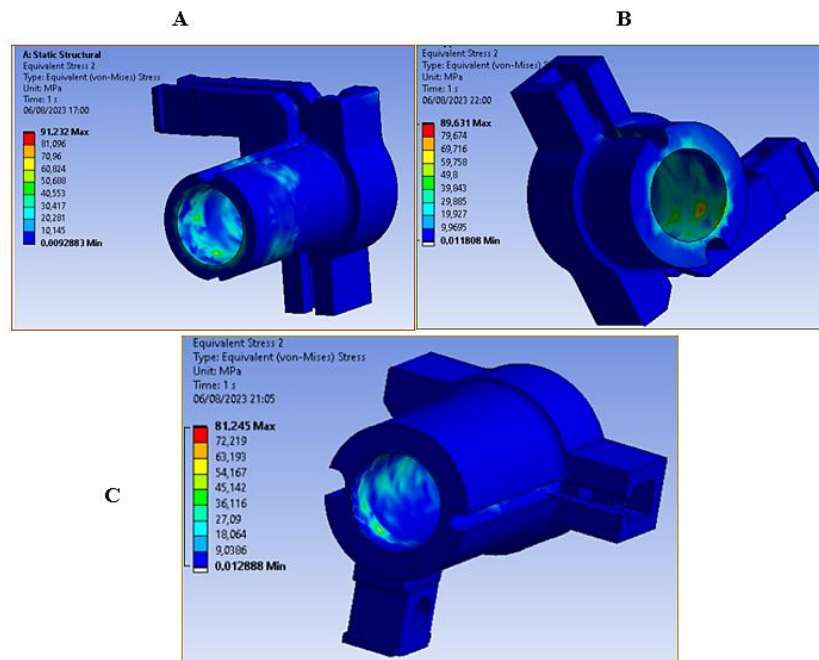


**Fig. 75.** Esfuerzos cortantes presentados en los 3 rediseño.

### 3.3.2.2 Análisis de esfuerzos de Von Mises en el mecanismo del actuador de los rediseños del husillo de bloqueo.

En el husillo de bloqueo del rediseño por resistencia, se registra un valor máximo de esfuerzo de 91.232 MPa en su diámetro interno. Por otro lado, en el rediseño por rigidez, el esfuerzo máximo es de 89.63 MPa. En el rediseño por resistencia - rigidez, el esfuerzo máximo alcanza un valor máximo de 81.245 MPa. (Ver Fig. 76)

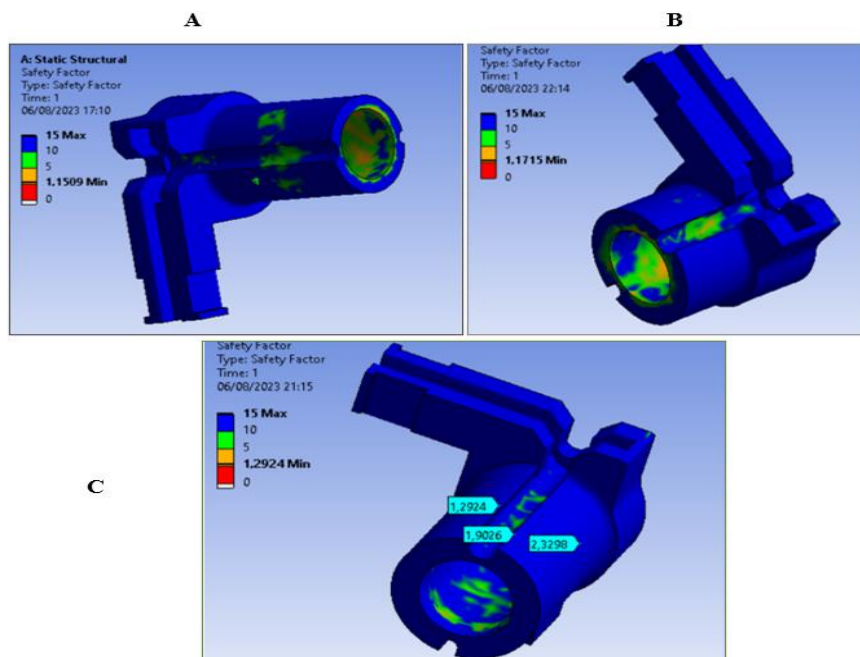




**Fig. 76.** Esfuerzos de Von Mises presentados en los 3 rediseño.

### 3.3.2.3 Análisis del factor de seguridad de los rediseños del husillo de bloqueo.

Al evaluar el factor de seguridad, se determina un valor mínimo de 1.1509 en el diámetro interno del husillo de bloqueo en el rediseño por resistencia. En el rediseño por rigidez, se obtiene un valor mínimo de factor de seguridad de 1.17. Sin embargo, en el rediseño por resistencia - rigidez, alcanza un valor de 1.29. (Ver Fig. 77)



**Fig. 77.** Factor de seguridad en los 3 rediseño.

### 3.3.2.4 Análisis comparativo de los rediseños del husillo de bloqueo por simulación a fatiga.

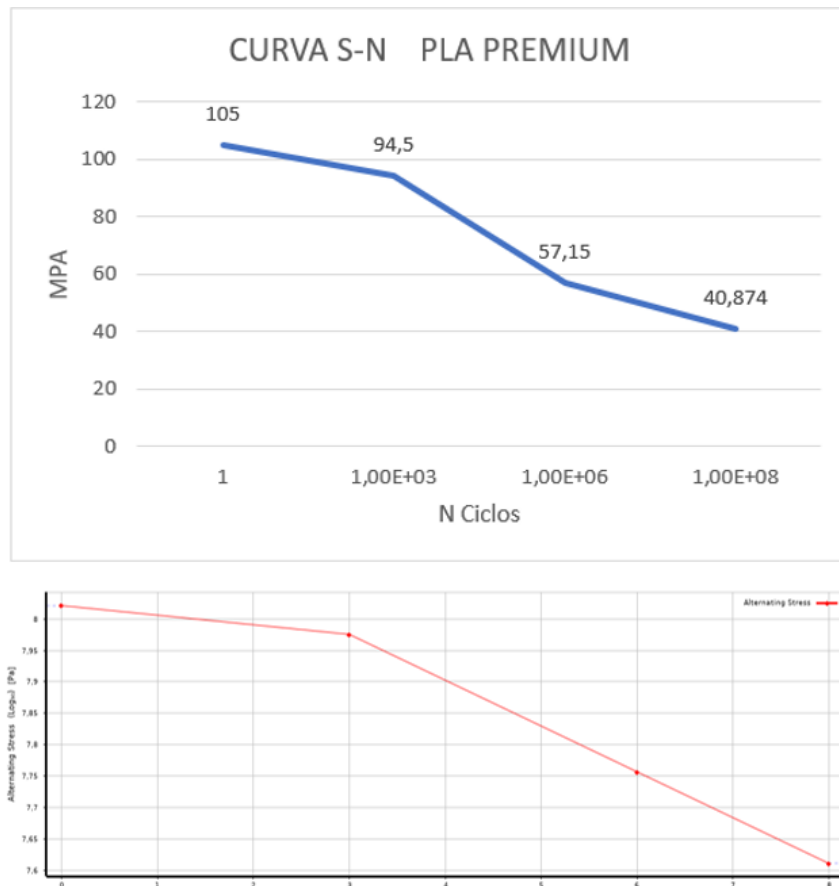
Se analiza cuál de los rediseños modelados cuenta con un factor de seguridad apto por análisis de fatiga en la simulación, así como su tiempo de vida útil. Se realiza el análisis por fatiga para simular las cargas dinámicas que actúan y afectan al husillo de bloqueo del actuador.

Por tal motivo se agrega la curva de Wohler del PLA PREMIUM de FormFutura, sin embargo, los fabricantes no cuentan con una curva S-N en su base de datos, por tal razón se crea la curva S-N para la simulación como se muestra en la Fig. 78 y en la TABLA XII se muestran los parámetros para la creación de la curva.

**TABLA XII**

#### **PARÁMETROS PARA LA CREACIÓN DE LA CURVA S-N DEL PLA PREMIUM**

<b>Numero de ciclos</b>	<b>Resistencia</b>
1 ciclos	105 MPA
10e+3 ciclos	94.5 MPA
10e+6 ciclos	57.15 MPA
10e+8 ciclos	40.874

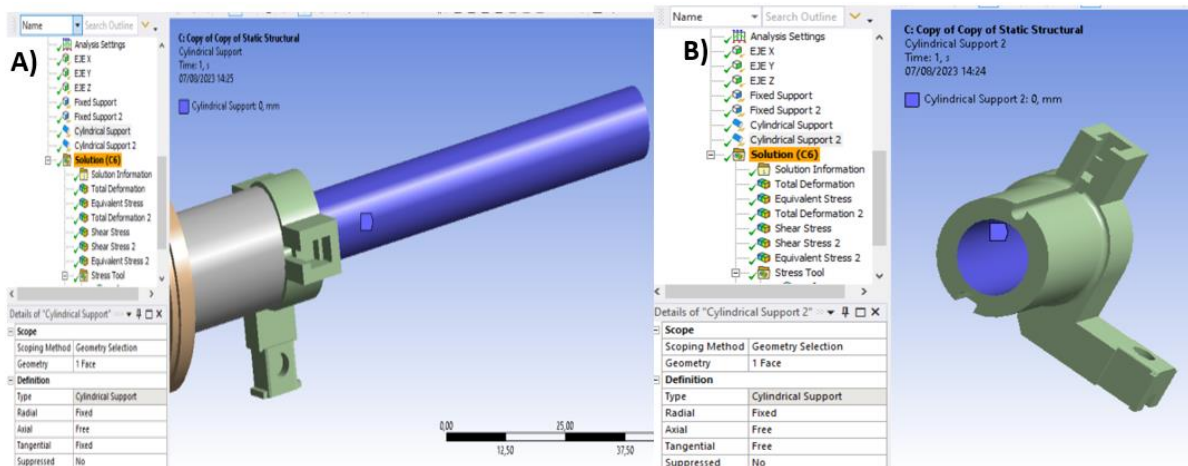


**Fig. 78.** Curva S-N del PLA PREMIUM.

**Nota:** La curva inferior corresponde a la que se ha introducido en la base de datos de ANSYS Workbench para llevar a cabo la simulación correspondiente.

### 3.3.2.5 Asignación de soportes cilíndricos para un análisis por fatiga de los rediseños del husillo de bloqueo.

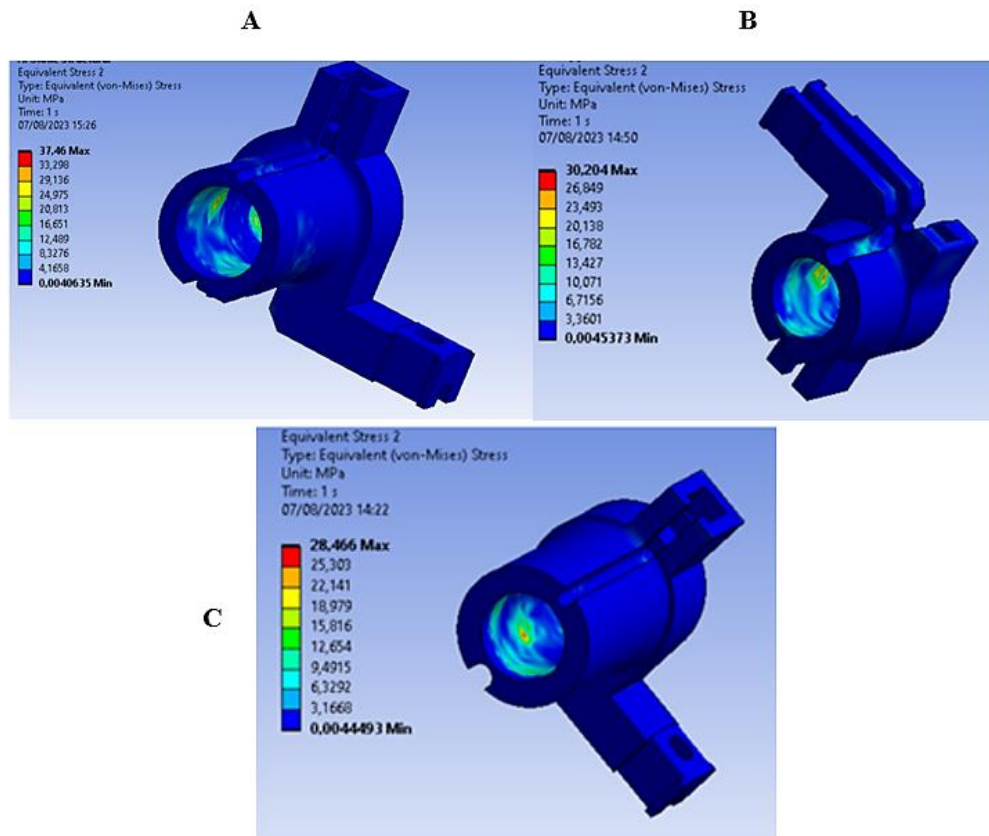
Se añade restricciones de movimiento al mecanismo para un análisis de fatiga óptimo del mecanismo, para ello se incorporan dos soportes cilíndricos, un soporte cilíndrico al eje roscado con libertad solo en el eje axial, por motivo de que la autoparte solo rota y no se desplaza, el otro soporte cilíndrico es para el diámetro interno del husillo de bloqueo, el cual rota en el eje axial y se desplaza en el eje tangencial del mecanismo como se observa en la Fig. 79.



**Fig. 79.** Asignación de soportes cilíndricos; A) Soporte cilíndrico en eje roscado; B) Soporte cilíndrico en el diámetro interno husillo de bloqueo.

### 3.3.2.6 Análisis del esfuerzo de Von Mises por fatiga de los rediseños del husillo de bloqueo.

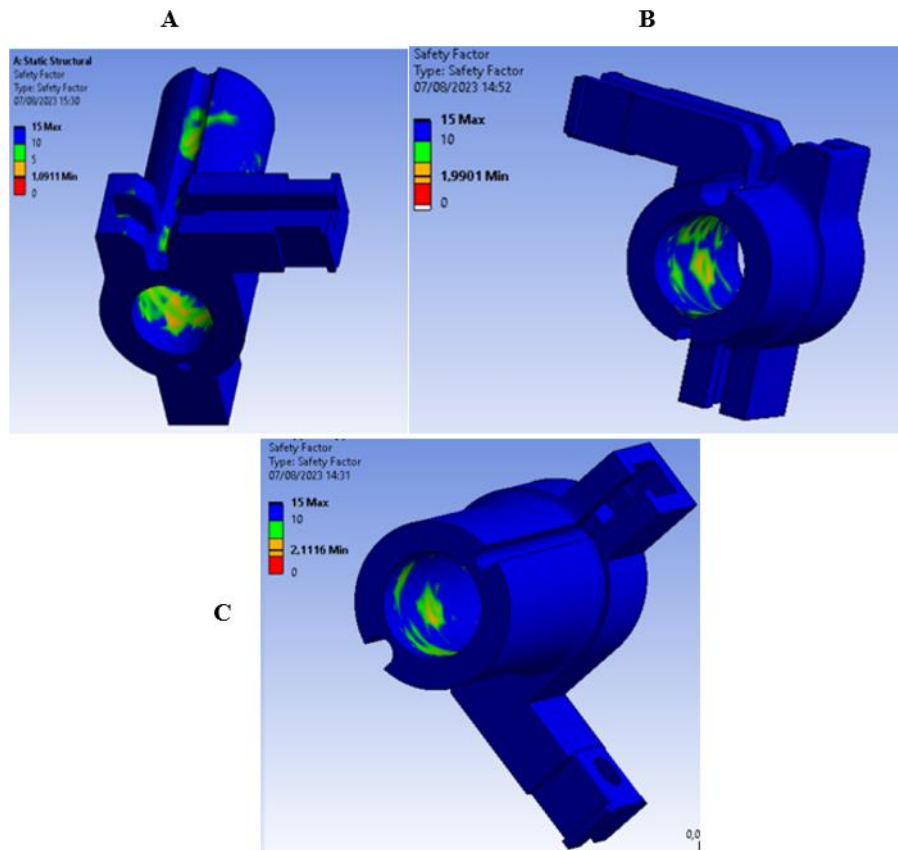
Los esfuerzos de Von Mises o esfuerzos alternantes varían con relación al análisis estático, por tal motivo se agrega los soportes cilíndricos. En la simulación del rediseño por resistencia, se expone un esfuerzo alternante máximo de 37.46 MPa, el rediseño por rigidez muestra un esfuerzo máximo de 30.20 MPa y el rediseño por resistencia - rigidez modelado presenta un esfuerzo máximo de 28.46 MPa como se observa en la Fig. 80.



**Fig. 80.** Esfuerzos alternantes de los 3 rediseño del husillo de bloqueo; A) Rediseño por resistencia; B) Rediseño por rigidez; C) Rediseño por resistencia y rigidez.

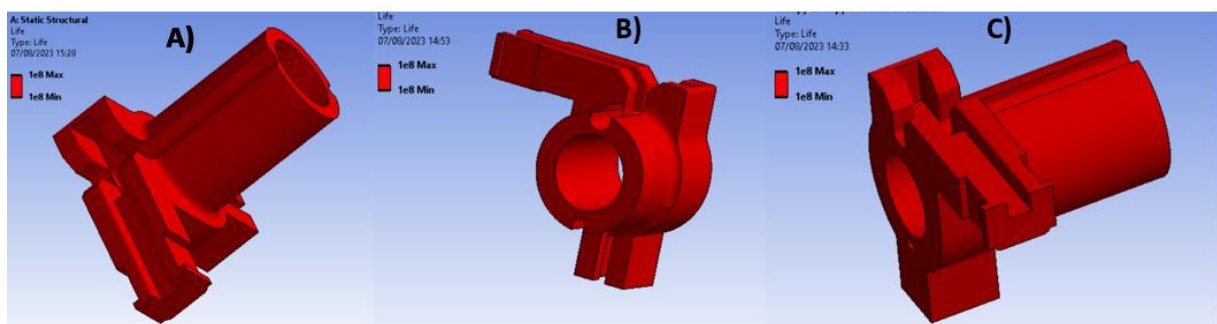
### 3.3.2.7 Análisis del factor de seguridad por fatiga de los rediseños del husillo de bloqueo.

Se añade la teoría de fatiga a analizar, en este caso es la teoría de Goodman. Por tal razón, los resultados del factor de seguridad del rediseño por resistencia son de 1.09, en el rediseño por rigidez es de 1.99 y en el rediseño por resistencia - rigidez es de 2.11 como se muestra en la Fig. 81.



**Fig. 81.** Factor de seguridad de los 3 rediseños del husillo de bloqueo; A) Rediseño por resistencia; B) Rediseño por rigidez; C) Rediseño por resistencia y rigidez.

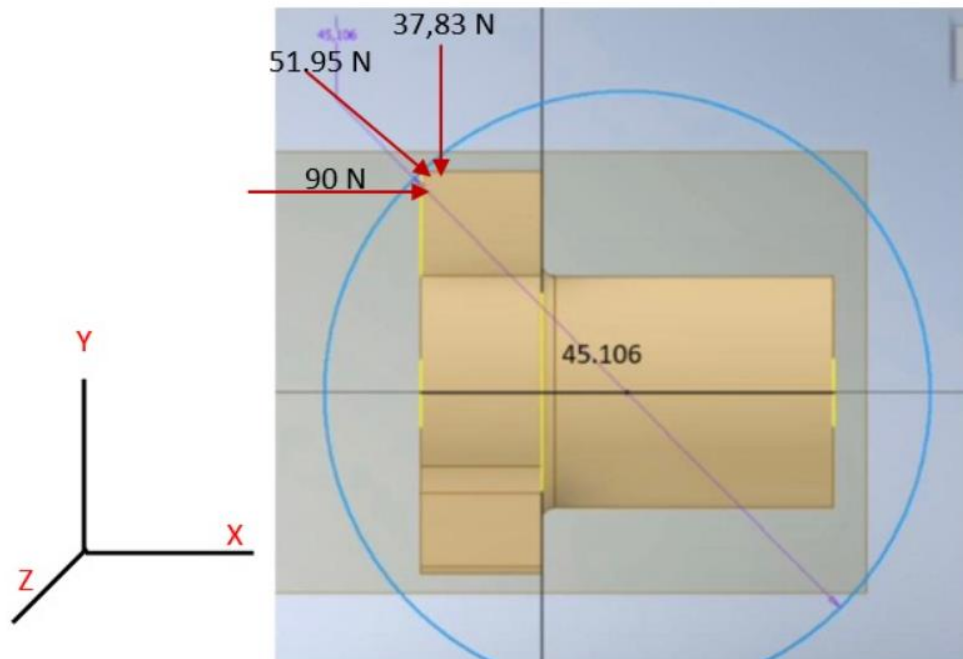
Las simulaciones de los rediseños demuestran que tendrán vida infinita como se expone en la Fig. 82, se revela que el rediseño por resistencia - rigidez se destaca como la opción más sobresaliente en términos de resistencia y factor de seguridad de Von Mises y por Goodman.



**Fig. 82.** Análisis de ciclo de vida de los rediseños del husillo de bloqueo; A) Rediseño por resistencia; B) Rediseño por rigidez; C) Rediseño por resistencia y rigidez.

### 3.3.3 Análisis de fatiga del rediseño seleccionado por métodos analíticos.

Para calcular el factor de seguridad por fatiga, se establecen los momentos que actúan en el husillo de bloqueo, para identificar el momento torsor se determina el diámetro en donde se produce la fuerza de torsión, en la Fig. 83. se aprecia el valor del diámetro que es de 45.106 mm, donde su radio en metros es de 0.0225 m.



**Fig. 83.** Medidas del diámetro y fuerzas que actúan en el husillo.

Se calcula el momento torsor donde se obtiene un valor de 1.172 Nm en (73). Mientras que, el momento flector se mantiene con el mismo valor del diseño original.

$$T_m = 51.95 \cdot 0.0225 = 1.172 \text{ Nm} \quad (73)$$

Se calcula el límite de resistencia a la fatiga momentánea, se muestra un valor de 52.5 MPa (74).

$$Se' = 0.5(105) = 52.5 \text{ MPa} \quad (74)$$

El rediseño seleccionado se fabrica mediante impresión 3D. Por tal razón, se utiliza el ANEXO 1 y se aprecia un valor “ $k_a$ ” de 1.314 (75).

$$k_a = 4.51 \cdot 105^{-0.265} = 1.314 \quad (75)$$

Para definir “ $k_b$ ” se calcula “ $d_e$ ” y se obtiene un valor de 6.33 mm en (76), con el valor de “ $d_e$ ” se visualiza que “ $k_b$ ” tiene un valor de 1.018 (77).

$$d_e = 0.370(17.1) = 6.33 \text{ mm} \quad (76)$$

$$k_b = 1.24 * 6.33^{-0.107} = 1.018 \quad (77)$$

El valor de “ $k_c$ ” y “ $k_d$ ” es de 1. El valor de “ $k_e$ ” es de 0.814 como se observa en el ANEXO 3 al resolver el cálculo por fatiga con una confiabilidad del 99%. Al conseguir los valores de los factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga, se calcula “ $Se$ ” y se obtiene en (78) un valor de 57.153 MPa.

$$Se = 1.314 * 1.018 * 1 * 1 * 0.814 * 52.5 = 57.153 \text{ MPa} \quad (78)$$

Se debe identificar el valor de “ $k_f$ ” y “ $k_{fs}$ ”. Por consiguiente, se utiliza las medidas del rediseño por resistencia - rigidez observadas en la Fig. 61, se calcula  $D/d$  con un valor de 1.13 (79) y en  $r/d$  un valor de 0.058 (80).

$$\frac{D}{d} = \frac{19.22}{17.1} = 1.13 \quad (79)$$

$$\frac{r}{d} = \frac{1}{17.1} = 0.058 \quad (80)$$

Después, se calcula “ $q$ ” y “ $q_s$ ”, se obtiene un valor de 0.367 como se indica en (81) y el valor que se adquiere en la gráfica de “ $K_t$ ” es de 1.9 y de “ $K_{ts}$ ” es de 1.3. Una vez se alcanzan los parámetros mencionados previamente. En (82) se observa que el valor de “ $K_f$ ” es 1.33 y el valor de “ $K_{fs}$ ” es 1.11.

$$q = \frac{1}{1 + \frac{0.341}{\sqrt{0.039}}} = 0.367 \quad q_s = \frac{1}{1 + \frac{0.341}{\sqrt{0.039}}} = 0.367 \quad (81)$$

$$K_f = 1 + 0.367(1.9 - 1) = 1.33 \quad K_{fs} = 1 + 0.367(1.3 - 1) = 1.11 \quad (82)$$

Al determinar “ $K_f$ ” y “ $K_{fs}$ ” se adquiere en (83) un esfuerzo alternante de 23.51 MPa y en (84) un esfuerzo medio de 2.295 MPa. A continuación, se calcula el factor de seguridad por fatiga, donde en (85) se muestra un valor de 2.308.



$$\sigma_a = \frac{32 * 1.332 * 8.677}{\pi * 17.1^3} = 23.51 \text{ MPa} \quad (83)$$

$$\sigma_m = \frac{\sqrt{3} * 16 * 1.111 * 1.172}{\pi * 17.1^3} = 2.295 \text{ MPa} \quad (84)$$

$$nf = \frac{1}{\frac{23.51}{57.153} + \frac{2.295}{105}} = 2.308 \quad (85)$$

## **4 CAPÍTULO IV. RESULTADOS**

### **4.1 Resultados**

Al momento de identificar el daño del mecanismo de manera visual, simulación y validación por métodos analíticos, se determina que el diseño original del husillo de bloqueo es el elemento que presenta falla en el gobernador de aceleración de la miniexcavadora, por razón de los esfuerzos que se generan por el mecanismo en el husillo de bloqueo, el análisis por elementos finitos revelan valores de esfuerzo de Von Mises de 89 MPa, una deformación de 0.097 mm, esfuerzos cortantes de 49.05 MPa y un factor de seguridad de 0.74. Estos resultados indican que los esfuerzos que afectan al husillo exceden la capacidad de resistencia del material, lo que conduce a su fractura. El roscado interno del husillo está limitado a la mitad de la pieza, lo que resulta en una concentración de esfuerzos elevados en la porción no roscada. Esta desigualdad de distribución provoca la cedencia del material en esa área específica.

Por mencionadas razones, se realiza un rediseño al husillo de bloqueo para que el mecanismo del actuador se reutilice sin inconvenientes, el primer paso para un rediseño óptimo es asignar a la autoparte un nuevo material termoplástico, por ello es importante primero conocer el proceso de fabricación ideal para la geometría de la pieza, así como el proceso que otorga las mejores propiedades al material.

### **4.2 Elección de métodos de fabricación aditiva y material termoplástico**

En la tabla XIII, la impresión 3D destaca sobre las otras tecnologías de manufactura en varios aspectos, según se observa en la tabla la impresión 3D es compatible con termoplásticos, geometría del husillo, tolerancia y tecnología CAD, donde se obtiene un total de 4 puntos, el más alto de todos los procesos analizados. Esto significa que la impresión 3D es altamente versátil y capaz de adaptarse a una amplia gama de requisitos de fabricación. Además, su ventaja significativa radica en que no requiere el uso de moldes, lo que simplifica el proceso y reduce los costos asociados con la fabricación tradicional. Con base en las ventajas mencionadas, se emplea el proceso de impresión 3D para la fabricación del husillo de bloqueo.

**TABLA XIII**  
**TABLA DE DECISION.**

<b>1 = Cumple</b>						
<b>0 = No cumple</b>						
<b>Compatibilidad con:</b>						
<b>Proceso</b>	<b>Termoplásticos</b>	<b>Geometría del husillo</b>	<b>Tolerancia</b>	<b>Tecnología CAD</b>	<b>Uso de moldes</b>	<b>Total</b>
Impresión 3d.	1	1	1	1	No	4
Moldeo por soplado.	1	1	1	0	Si	3
Prototipado basado en deposición.	1	1	0	1	No	3
Perforación.	1	1	1	0	Si	3
Moldeo por inyección.	1	1	1	0	Si	3
Prototipado en laser.	1	1	0	1	No	3
Mecanizado.	1	1	1	0	Si	3
Moldeo rotacional.	1	1	1	0	Si	3

La tabla XIV proporciona una visión clara y concisa de las opciones de materiales disponibles, además toma una decisión fundamentada en función de los parámetros clave para el rediseño del husillo.

TABLA XIV

## TABLA DE DECISION DE LOS MATERIALES.

1 = Cumple							
0 = No cumple							
Material	Fabricante	Cumple con:					Total
		Densidad	Precio	Temperatura de extrusión	Temperatura de trabajo	Resistencia a la tracción.	
ABSpro	FormFutura [56]	1	1	0	1	0	3
PLA PREMIUN	FormFutura [57]	1	1	1	1	1	5
TPU – PYTHON FLEX	FormFutura [58]	1	1	1	0	0	3
PLA+	Esun [59]	1	1	1	1	0	4
PLA + 10% Carbon Fiber	Bambu Lab [60]	1	1	1	1	0	4
POM (Acetal)	Tarfuse [61]	0	1	0	1	0	2
PC (Policarbonato) + 20% Carbon Fiber	3DXTech [62]	1	1	0	1	0	3
PP + 30% Glass Fiber	3DXTech [63]	1	1	0	0	0	2
PETG + 20% Carbon Fiber	3DXTech [64]	1	1	1	0	0	3

PETG CF	Nanovia	1	1	1	0	0	3
	[65]						

Mediante la tabla de decisión, se visualiza de manera clara y fundamentada que el material idóneo para el rediseño del husillo de bloqueo es el PLA Premium del fabricante FormFutura. Este material presenta varias ventajas significativas en comparación con otros materiales analizados. Además, la facilidad de adquisición del PLA Premium es una ventaja importante porque está ampliamente disponible en el mercado. Esto facilita el acceso al material y asegura su disponibilidad para el proyecto de rediseño del husillo.

Además, el PLA Premium se destaca por su facilidad de impresión, esto se debe a sus bajas temperaturas de extrusión, por lo que se imprime el material en la impresora ENDER 3 PRO sin necesidad de equipos profesionales, ni realizar cambios en la impresora. Otra ventaja del PLA Premium es su baja densidad, lo que significa que no genera un peso adicional en el actuador. Esto es importante para mantener un funcionamiento óptimo del sistema y evitar restricciones en el rendimiento debido a un aumento de la carga.

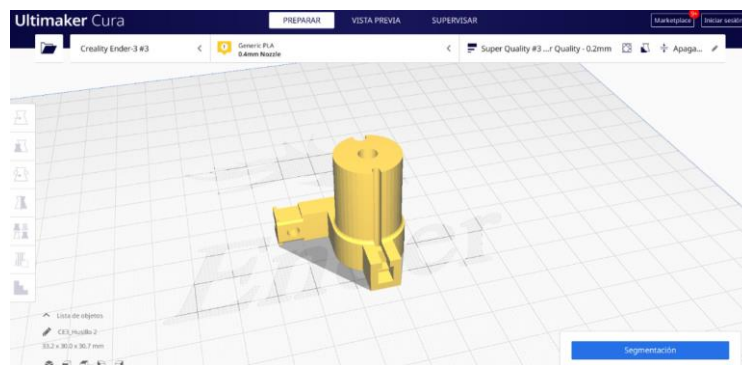
En términos de resistencia a la tracción, el PLA Premium supera a todos los materiales seleccionados en la tabla de decisión. Esto proporciona una mayor confianza en la integridad estructural y la capacidad de carga del husillo rediseñado. Al tener en consideración todas estas ventajas, el PLA Premium del fabricante FormFutura se posiciona como el material ideal para el rediseño del husillo de bloqueo. Su disponibilidad, baja temperatura de impresión, baja densidad y resistencia a la tracción, lo convierten en la opción más adecuada para garantizar un rendimiento óptimo y seguro del husillo.

El rediseño seleccionado se fundamenta en las simulaciones realizadas, estos análisis se enfocan en el análisis de deformación, esfuerzos cortantes, teoría de Von Mises, factor de seguridad y teoría de Goodman con su factor de seguridad. Las evaluaciones realizadas revelan que la tercera opción de prototipo, un rediseño por resistencia - rigidez es la alternativa más apropiada. Tanto el análisis analítico como las simulaciones indican que esta propuesta de rediseño presenta valores específicos ideales. El análisis de deformación obtiene valores de 0.0278 mm, mientras que los esfuerzos cortantes es 16.198 MPa, los valores de Von Mises de 81.245 MPa, y el factor de seguridad es 1.29. Además, en base a la teoría de Goodman, el factor de seguridad es de 2.11. Por lo tanto, se considera que el rediseño por resistencia - rigidez es

el óptimo en términos de capacidad para soportar eficazmente las cargas generadas por el mecanismo del actuador.

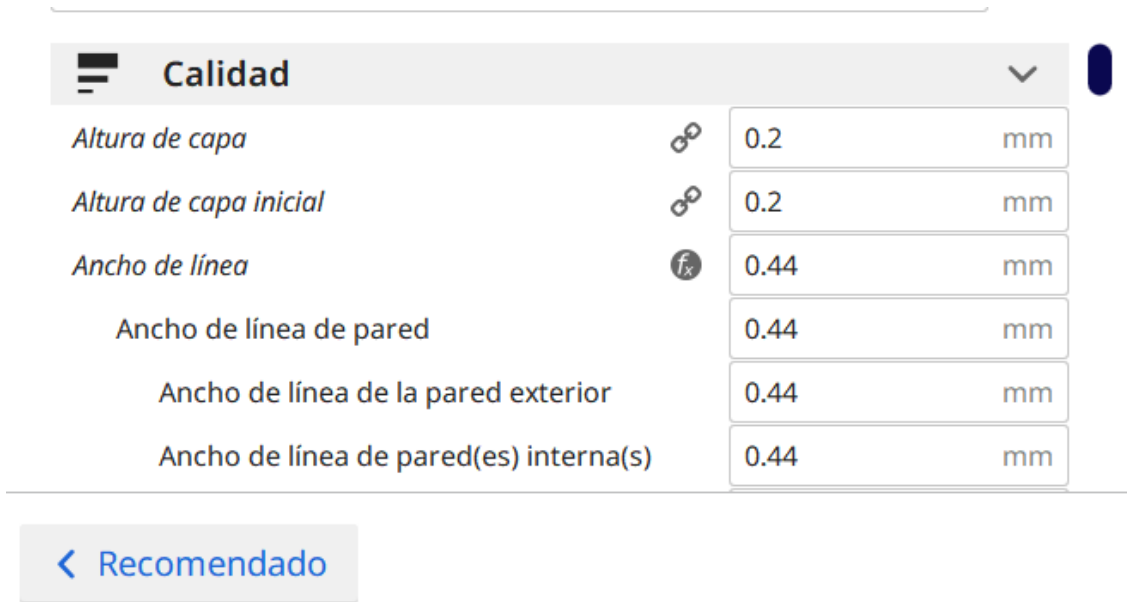
### 4.3 Fabricación del husillo

Después de la selección del rediseño óptimo del husillo de bloqueo, el archivo resultante se guarda en formato STL utilizando el software Inventor. Posteriormente, se abre el programa Ultimaker Cura, donde se importa el archivo STL correspondiente al rediseño, tal como se ilustra en la Fig. 84. Dentro de Cura, se lleva a cabo la selección de la impresora que se utiliza para la fabricación de la autoparte. Esta elección resulta importante ya que permite la adaptación de los parámetros de impresión de la pieza a las características de la impresora en uso. Además, se realiza la selección de la boquilla correspondiente a la impresora, en este caso, con un diámetro de 0.4 mm. Este aspecto resulta de vital importancia para evitar bloqueos en la boquilla y asegurar un proceso de impresión eficiente, para evitar acabados inadecuados en el producto final.



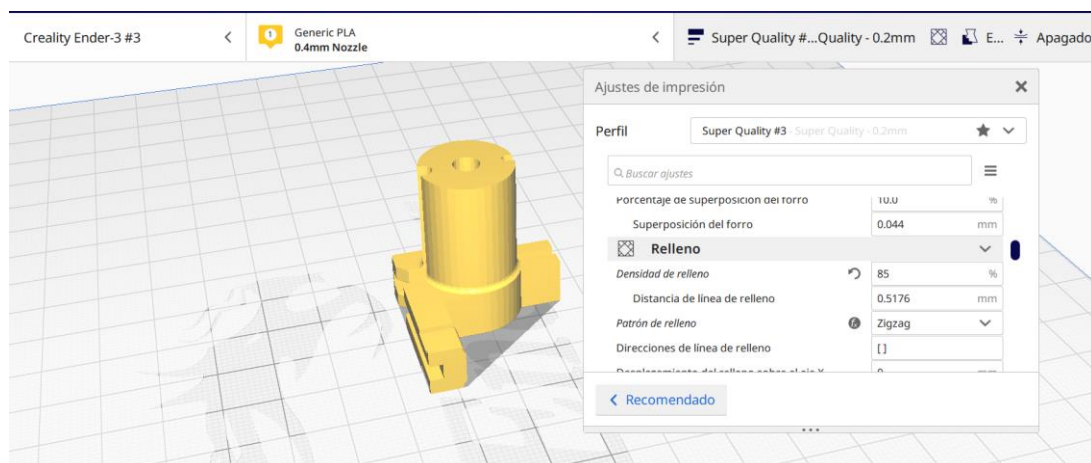
**Fig. 84.** Proceso de parametrización en el Software Ultimaker Cura.

En la Fig. 85 Se observan los parámetros de calidad para la fabricación del husillo de bloqueo como la altura de capa, altura de capa inicial y ancho de línea, donde para conseguir mejores acabados en una pieza pequeña la altura de cada capa debe ser la mitad del tamaño de boquilla, por esta razón se obtiene un valor de 0.2 mm y un ancho de línea perfecto para este parámetro es de 0.44 mm.



**Fig. 85.** Parámetros de calidad en Cura para la fabricación.

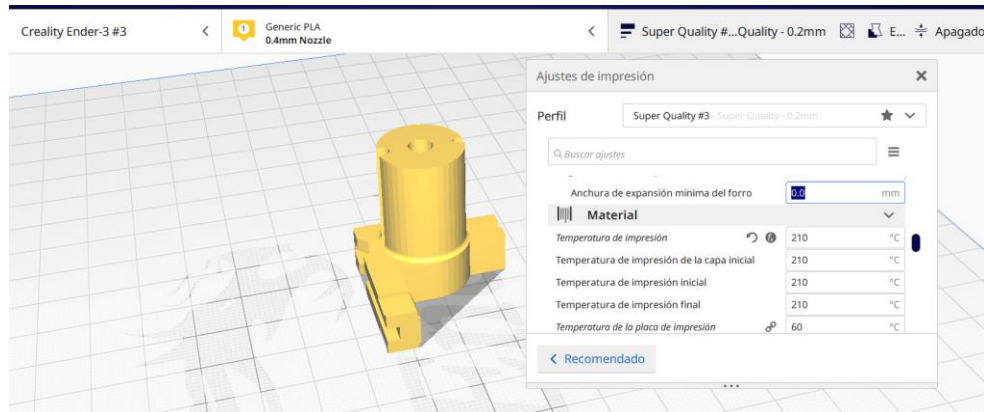
La cantidad de relleno de 85 %, donde para obtener una mayor densidad y resistencia de la pieza se debe imprimir a un alto porcentaje de relleno, donde para partes automotrices el valor en experiencia varía entre los 70 a 85% y el patrón de relleno que se escogió fue de zigzag, por motivo de que este tipo de patrón ofrece mayor consistencia a la autoparte a fabricar. (ver Fig. 86).



**Fig. 86.** Parámetros de relleno en Cura para la fabricación.

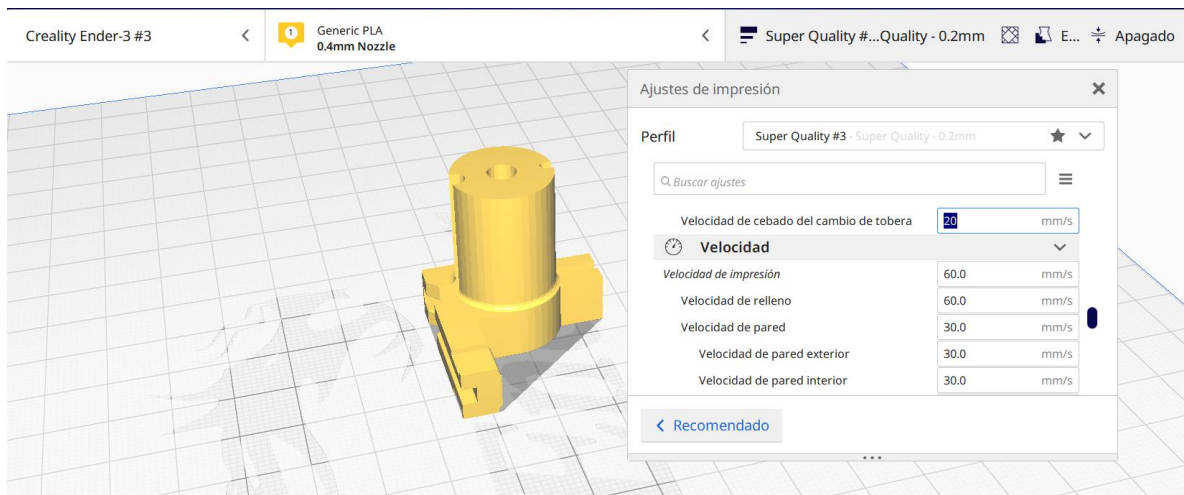
La temperatura de impresión y de la cama es dada por el fabricante, por lo que en la Fig. 87 se establece una temperatura de impresión de 210 grados centígrados y la temperatura de cama de impresión de 60 grados centígrados. Estos valores son importantes porque si no existe una temperatura idónea de impresión es muy probable que el filamento se obstruya en la boquilla en caso de bajas temperaturas y en caso de altas temperaturas, en que se deteriore

las propiedades de la pieza en fabricación, además la temperatura de la cama es importante para evitar que las capas se despeguen y se tenga que interrumpir la fabricación.



**Fig. 87.** Parámetros de temperatura en Cura para la fabricación.

Mismo caso con la velocidad de impresión que es recomendada por el fabricante, como se observa en la Fig. 88. La velocidad de impresión y de relleno es de 60 mm/s, mientras que la velocidad de las paredes y soporte es de 30 mm/s, se usan los parámetros establecidos de velocidades para evitar que no se imprima correctamente en las áreas detalladas que cuenta el husillo de bloqueo.

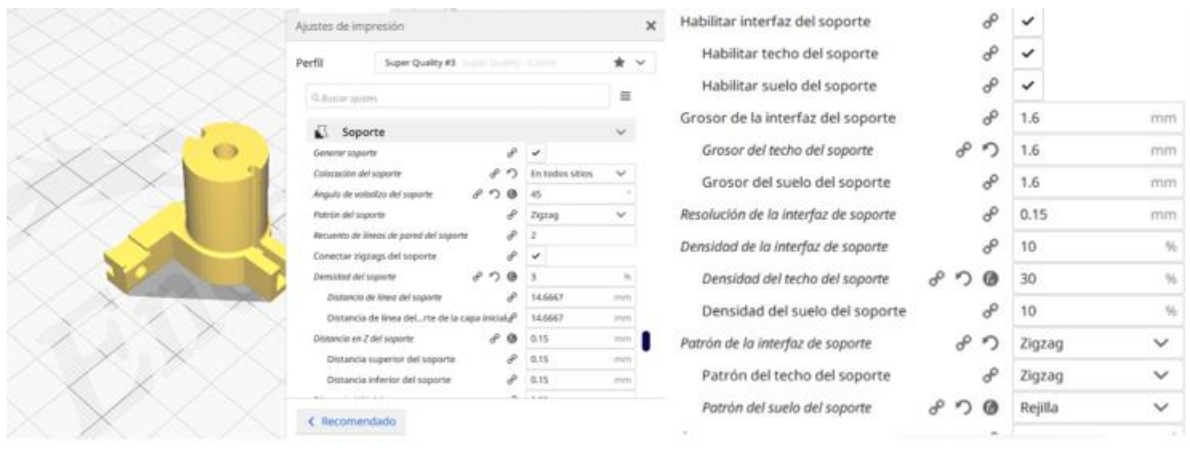


**Fig. 83.** Parámetros de velocidad en Cura para la fabricación.

Al observar el husillo de bloqueo, existen áreas que al momento de impresión necesitan apoyos para que se fabriquen correctamente todas las caras, por ese motivo se asignan soportes con una densidad del 3% para que el soporte se retire con facilidad, una densidad de interfaz de soporte de 10% para el suelo y de 30% para el techo de soporte, estos valores de densidad de interfaz otorgan que antes y después del soporte las capas se creen perfectamente y además

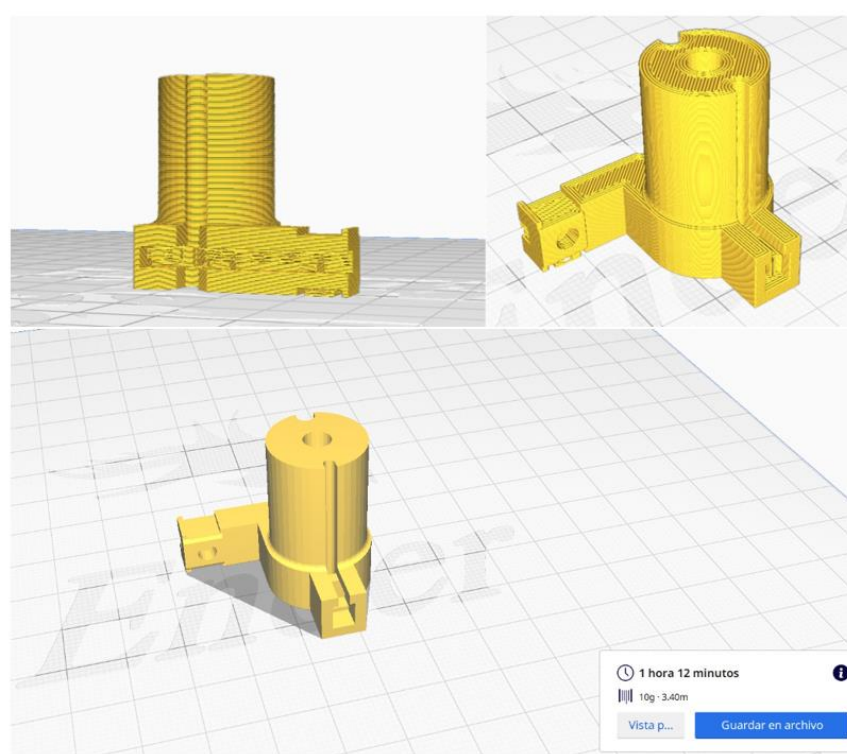


no se pegue con la pieza a fabricar. El patrón de soporte es de Zigzag, mientras que la distancia entre la capa y soporte es de 0.15 para evitar desperfectos en los acabados de la pieza por la creación de soportes. (Ver Fig. 89)



**Fig. 89.** Parámetros del soporte en Cura para la fabricación.

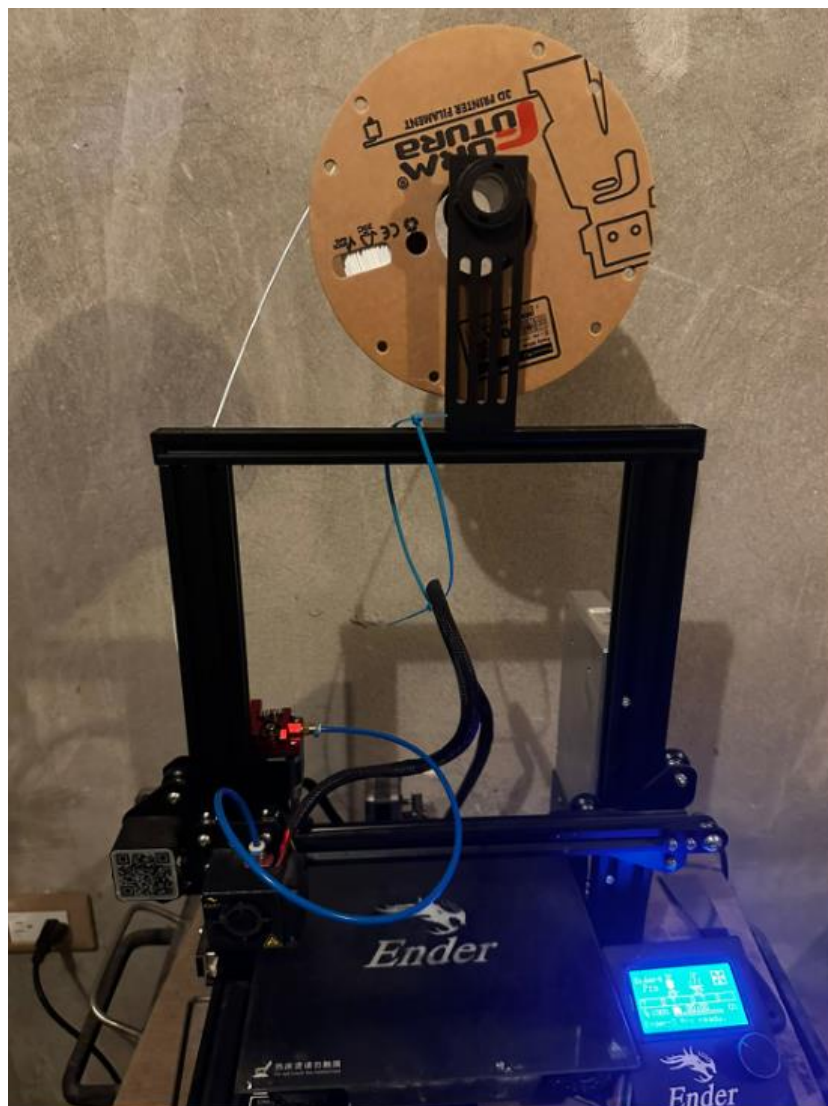
Una vez se ingresan los parámetros más importantes para conseguir un acabado óptimo de la autoparte, se procede a segmentar la pieza, se observa cómo saldrá la pieza de la impresora, los soportes creados, etc. Donde el tiempo que demora en fabricarse el husillo de bloqueo es de 1 hora y 12 minutos como se muestra en la Fig. 90.



**Fig. 90.** Segmentación del husillo de bloqueo en Cura para iniciar el proceso de fabricación.

Es fundamental comprender que se realiza una disminución en el diámetro interno de la pieza automotriz al imprimir el husillo de bloqueo. Esto se lleva a cabo con el propósito de utilizar un proceso de torneado para la creación de la rosca interna del husillo de bloqueo.

Seguidamente, se exporta el GCODE de cura a una microSD, la cual se inserta en la impresora 3D, donde el filamento del PLA premium de FormFutura se ubica en la impresora Ender 3 Pro para su extrusión como se observa en la Fig. 91.



**Fig. 91.** Inicio de proceso de fabricación en la impresora Ender 3 Pro.

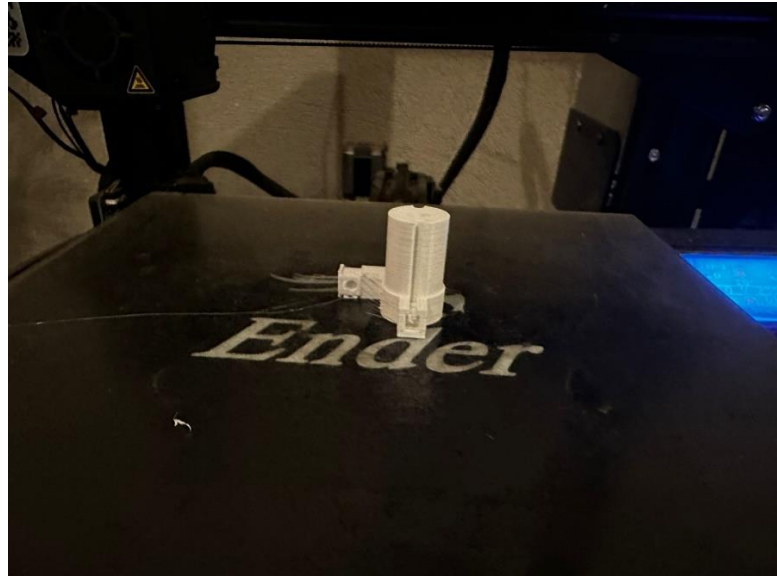
Antes de realizar el proceso de fabricación por impresión 3D, se observa que la cama esté calibrada correctamente, que el extrusor se encuentra en el punto de origen y que la

impresora esté leyendo correctamente el GCODE, donde en este caso es el husillo 2 y que la impresora marque los parámetros de temperatura 210 y 60 grados respectivamente como se observa en la Fig. 92.



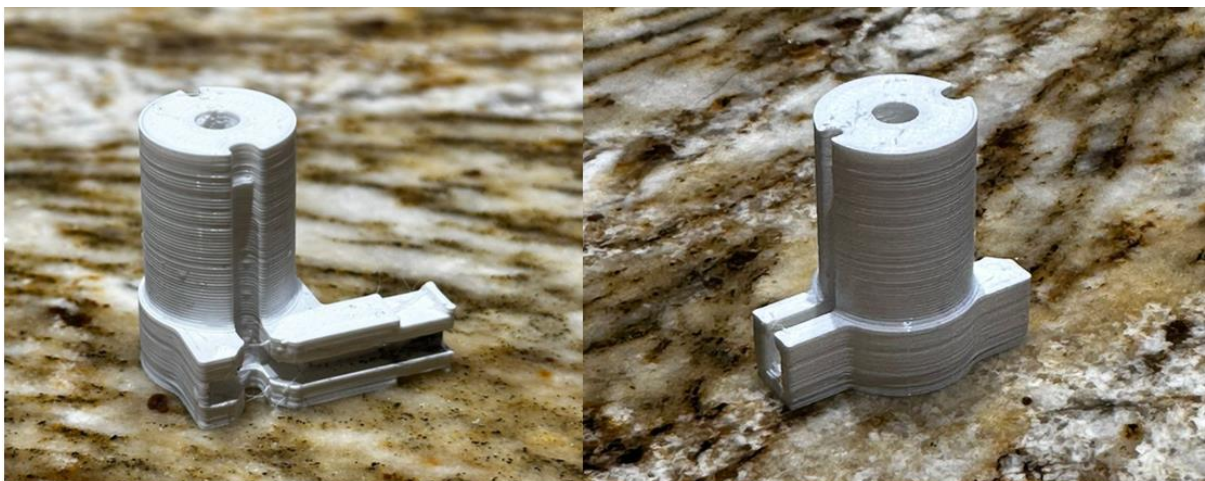
**Fig. 92.** Monitoreo de los parámetros de temperatura en la impresora 3D.

La impresora comienza a fabricar el husillo de bloqueo, donde después de 1 hora, finaliza la etapa de fabricación del repuesto del husillo de bloqueo como se observa en la Fig. 93.



**Fig. 93.** Impresión en 3D del husillo de bloqueo.

Se obtienen buenos resultados de acabados como se muestra en la Fig. 94., por lo que se retira el soporte de la pieza y se prueba que el husillo de bloqueo encaja con las guías de la carcasa como se muestra en el ANEXO 11. El roscado del diámetro interno del husillo de bloqueo realizado por torneado no presenta desperfectos y enrosca con el tornillo sin fin. Por tal motivo, empieza el proceso de ensamblado donde el husillo de bloqueo se conecta a presión con el cilindro del actuador y se agrega un pin por precaución para que las dos autopartes no se separen.



**Fig. 94.** Rediseño del husillo de bloqueo fabricado.

Se conecta el gobernador de aceleración a una batería antes de llevar a cabo la prueba de funcionamiento en la miniexcavadora. Esta conexión se realiza con el propósito de



suministrar energía al motor DC. Durante este proceso, se verifica que el actuador se desplaza y contrae de manera adecuada sin presentar ningún tipo de desperfectos. Es importante destacar que este correcto funcionamiento se debe al nuevo rediseño implementado en el husillo de bloqueo, tal como se ilustra en la Fig. 95.



**Fig. 95.** Verificación del husillo de bloqueo fabricado.

Por tal motivo se realiza la prueba de funcionamiento en la miniexcavadora y se determina que el gobernador de aceleración cumple correctamente su función en la maquinaria como se observa en la Fig. 96.



**Fig. 96.** Verificación del husillo de bloqueo en la miniexcavadora.

***Presupuesto***

Al analizar la TABLA XV, se resalta el costo asociado al rediseño y análisis del husillo de bloqueo del gobernador de aceleración de una miniexcavadora mediante aplicaciones CAD-CAE, el cual es de \$315 dólares. Se identifica que el costo de importar un nuevo actuador eléctrico asciende a alrededor de \$1000 dólares. Esto conlleva una notable disminución en los costos del 68% por cada actuador defectuoso, generando un impacto económico significativo. Además, esta estrategia contribuye de manera sustancial a la reducción del tiempo de inactividad de la máquina. Anteriormente, el proceso de obtención del actuador eléctrico por importación se extiende hasta los 3 meses aproximadamente. En contraste, la opción de fabricar el husillo de bloqueo mediante la utilización de la impresión 3D reduce este tiempo a tan solo 3 días, permitiendo una pronta operatividad de la miniexcavadora.

**TABLA XV****PRESUPUESTO PARA LA FABRICACION DEL HUSILLO**

<b>Recurso</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo</b>
Equipo	Impresión en 3D	\$60,00
Filamento	Rollo de PLA premium	\$100,00
Torno	Proceso de torneado para el husillo rediseñado	\$80,00
Varios	Gastos varios personales	\$75,00
<b>Total</b>		<b>\$315,00</b>

## 5 CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Se evidencia que la falla del gobernador de aceleración se produce en la unión entre el husillo de bloqueo y el vástago del mecanismo, falla que se corrobora mediante análisis de elementos finitos, donde se determina un factor de seguridad en fatiga de 0,329, por lo que se deduce que los esfuerzos superan a la resistencia del material.

Las características del ácido poliláctico (PLA premium), como es la densidad, facilidad de manufactura, y buena resistencia a la tracción, lo convierten en la mejor opción para el desarrollo del rediseño del husillo de bloqueo del gobernador de aceleración de una miniexcavadora.

Para determinar el mejor rediseño se considera parámetros de resistencia y rigidez, por lo que se elabora tres modelos y al considerar de manera combinada resistencia y rigidez se establece medidas del husillo de 21.7 mm de largo, 17.1 mm de ancho y un radio de entalle de 1 mm.

Al considerar la confiabilidad en el funcionamiento del mecanismo, el rediseño que combina resistencia y rigidez es el de mejores prestaciones porque en el análisis por elementos finitos se determina valores de deformación de 0.0278 mm, esfuerzos de 28.46 MPa y factor de seguridad a la fatiga de 2.11.

Para establecer un correcto análisis por elementos finitos se determina que la convergencia del mallado se da cuando el tamaño de elemento de malla es de 2.8 mm, con una calidad del elemento entre el límite permitido de 0.8 a 1 y por una proporción geométrica cercana a 1.

Se valida a través de métodos analíticos y se corrobora que el rediseño que combina la resistencia y rigidez es la mejor propuesta porque alcanza valores de esfuerzos alternantes de 23.51 MPa, logrando un factor de seguridad a la fatiga de 2.308 que asegura un amplio margen de durabilidad y resistencia frente a cargas cíclicas.

Al obtener un factor de seguridad mayor a 2 se reduce significativamente el riesgo de falla por fatiga y aumenta la vida útil del husillo de bloqueo, además es un indicador que el rediseño tiene una buena robustez y que la selección del material es óptima.

La técnica más eficiente para la fabricación del husillo de bloqueo es la impresión 3D por su versatilidad, precisión, así como la capacidad para ofrecer una amplia gama de materiales termoplásticos, lo que permite una selección personalizada, garantizando que se elija el material óptimo que se ajuste perfectamente a las necesidades específicas de cada proyecto, en este caso el rediseño del husillo con el material PLA premium.

El desarrollo de presente proyecto aporta de manera eficaz a la economía de las empresas que laboran con miniexcavadoras, porque con el rediseño del husillo disminuye en un 68% los costos de adquisición de un nuevo actuador, así como también se estima un descenso del 97% en tiempos de parada de la miniexcavadora, lo que contribuye de manera sustancial a la optimización de los procesos y al incremento general de la productividad de la maquinaria.

## **5.2 Recomendaciones**

Al realizar la simulación a través de métodos de elementos finitos, se recomienda ajustar los parámetros de calidad del mallado lo más cercano posible al valor 1. Esta práctica resulta esencial para lograr valores de análisis precisos y confiables.

Se recomienda que, al momento de llevar a cabo una simulación por elementos finitos en ANSYS Workbench para ensamblajes sin soldadura, se verifique que el tipo de conexiones sea establecido como "No separation". Esta medida es crucial para asegurar la obtención precisa de resultados.

Para realizar una correcta selección de material, se recomienda llevar a cabo un análisis detallado de múltiples características del material que resulten esenciales para el proyecto en cuestión. Este análisis debería abarcar factores como la resistencia, la ductilidad, la conductividad térmica y eléctrica, entre otros. La consideración de estas propiedades asegurará que el material seleccionado no solo sea compatible con los requisitos funcionales y



estructurales, sino que también promueva la seguridad, la eficiencia y la confiabilidad del producto o componente final.

Se recomienda la creación de múltiples prototipos, porque es esencial para desarrollar un diseño eficiente y de calidad. Esto permite explorar varias soluciones, evaluar su impacto en el rendimiento y corregir problemas tempranos. Realizar iteraciones reduce costos futuros al abordar desafíos en etapas iniciales y asegura un producto final sólido.

Es aconsejable tener en cuenta la impresión 3D como el método de fabricación para componentes elaborados con materiales termoplásticos. Las ventajas que ofrece la impresión 3D es brindar una amplia gama de opciones de materiales termoplásticos, permitiendo una selección que se adapta mejor a los requisitos específicos del proyecto. Además, la tecnología de impresión 3D facilita la creación de formas geométricas complejas y estructuras internas personalizadas, lo que resulta en un aumento significativo de la eficiencia y el rendimiento de los componentes.

## REFERENCIAS

- [1] V. Lucas and R. Rivero, “Evolución del Uso de los Materiales Plásticos en la Industria Automotriz Evolution of the Use of Plastic Materials in the Automotive Industry,” *INNOVA Research Journal*, vol. 3, no. 12, pp. 17–27, 2018.
- [2] L. F. Molina-Prieto and A. T. Ortega-Ramírez, “Residuos plásticos automotrices como agregados para concretos y morteros sostenibles,” *Gestión y Ambiente*, vol. 24, no. 1, p. 89893, 2021, doi: 10.15446/ga.v24n1.89893.
- [3] O. Alejandro *et al.*, “Polímeros reforzados con fibras naturales para su aplicación en la industria automotriz Natural fibre reinforced polymers for application in the automotive industry. Polímers reforçats amb fibres naturals per a la seva aplicació en la indústria automotriu.”
- [4] ICEX, “El mercado de repuestos y autopartes en Ecuador,” 2022, Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available: <http://Ecuador.oficinascomerciales.es>
- [5] N. A. Diseño and B. Sosa, “Análisis sectorial Guayas y Pichincha lideran el mercado del sector automotriz en Ecuador,” *Análisis Sectorial Automotriz y Autopartes*, 2011, Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available: [http://www.inec.gob.ec/cenec/index.php?option=com\\_content&view=article&id=231&Itemid=125&lang=es](http://www.inec.gob.ec/cenec/index.php?option=com_content&view=article&id=231&Itemid=125&lang=es)
- [6] B. J. Cedeño Alvarado and B. J. Cedeño Alvarado, “Estudio para el modelado e impresión 3D de autopartes,” 2018, Accessed: Feb. 08, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/2763>
- [7] U. Y. Sociedad *et al.*, “05 RECYCLING: A NICHE INNOVATION AND ENTREPRENEURSHIP WITH ENVIRONMENTAL FOCUS EL RECICLAJE: Universidad Metropolitana. República del Ecuador. ¿Cómo referenciar este artículo?,” 2016, [Online]. Available: <http://rus.ucf.edu.cu/>
- [8] A. Wroblaski, “Electric Throttle Actuators: An easy way to increase the efficiency and functionality of equipment with mechanical diesel engines.” [Online]. Available: [www.thomsonlinear.com](http://www.thomsonlinear.com)
- [9] “MAQUINARIA PESADA PREFERIDA EN LA CONSTRUCCIÓN | El Oficial.” [Online]. Available: <https://www.eloficial.ec/que-marcas-y-maquinarias-pesadas-se-imponen-en-la-construccion/>
- [10] Håkan Persson, “Electric Throttle Actuators: An easy way to increase the efficiency and functionality of equipment with mechanical diesel engines.” <https://www.thomsonlinear.com/en/support/20140919-uk>, Sep. 19, 2014.
- [11] “ET12-084-SECN2S - Actuador, Electrak Throttle, 12 Vdc, Carga dinámica: 45 N (10 lbf), alta velocidad, Máx. longitud de carrera: 2 inch, Control: CANBUSParalelo al adaptador | Thomson.” <https://www.thomsonlinear.com/es/product/ET12-084-SECN2S> (accessed Jun. 26, 2023).

- [12] “Alquiler de maquinaria en Ecuador - Mi Flota.” <https://www.miflota.com/catalogo/miniexcavadoras/detalle/3824/miniexcavadoras-bobcat-e26-pasaje#> (accessed Jun. 26, 2023).
- [13] “Cámara de la Industria Automotriz Ecuatoriana.” <https://www.cinae.org.ec/> (accessed Jun. 28, 2023).
- [14] “Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo-ENEMDU Indicadores laborales”.
- [15] INEC, “Directorio de Empresas y Establecimientos 2021,” [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_Economicas/DirectorioEmpresas/Directorio\\_Empresas\\_2021/Boletin\\_Tecnico\\_DIEE\\_2021.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/DirectorioEmpresas/Directorio_Empresas_2021/Boletin_Tecnico_DIEE_2021.pdf), Dec. 2022.
- [16] “Evolución de la Balanza Comercial por Productos”.
- [17] “¿Qué es la fabricación aditiva? - Mizar Additive.” <https://mizaradditive.com/que-es-fabricacion-aditiva/> (accessed Jun. 28, 2023).
- [18] “Manufactura aditiva como alternativa a importaciones de repuestos industriales - Hornero 3DX.” <https://www.hornero3dx.com/manufactura-aditiva-repuestos-industriales/> (accessed Jul. 01, 2023).
- [19] J. Pérez Landeo, “Revista Maquinaria Pesada N° 6 by magaly villanueva - Issuu,” *Grupo Editorial Ambientalista*, pp. 1–36, 2014. Accessed: Feb. 05, 2023. [Online]. Available: [https://issuu.com/malagymaquinaria/docs/maquinaria\\_pesada\\_6](https://issuu.com/malagymaquinaria/docs/maquinaria_pesada_6)
- [20] “Miniexcavadora E26 – Bobcat Company Europe.” <https://www.bobcat.com/eu/es/equipment/mini-excavators/2-3t-mini-excavators/e26> (accessed Mar. 26, 2023).
- [21] “Implementos para miniexcavadora: Tipos y aplicaciones | EQUIPZILLA,” 2021. <https://equipzilla.com/blog/implementos-para-miniexcavadora/> (accessed Feb. 05, 2023).
- [22] “Sensores y Actuadores - Leonel Germán Corona Ramírez, Griselda Stephany Abarca Jiménez, Jesús Mares Carreño - Google Libros.” [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=wMm3BgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=actuadores+&ots=6Oakiye4\\_t&sig=JL5cyBFptNepAR38I329vUCRhUc#v=onepage&q=actuadores&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=wMm3BgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=actuadores+&ots=6Oakiye4_t&sig=JL5cyBFptNepAR38I329vUCRhUc#v=onepage&q=actuadores&f=false) (accessed Aug. 07, 2023).
- [23] “Linear Actuators Thomson-the Choice for Optimized Motion Solutions Local Support Around the Globe.” [Online]. Available: [www.thomsonlinear.com](http://www.thomsonlinear.com)
- [24] “Poliacetal (POM) | Tecnología de los Plásticos.” <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/poliacetal-pom.html> (accessed Aug. 08, 2023).
- [25] “Polymerland\_Catalogo\_PPI\_20171207”.
- [26] Descubre Arduino, “PLA, Ácido poliláctico: El plástico respetuoso con el medio ambiente.” <https://descubrearduino.com/que-es-pla/> (accessed Jan. 29, 2023).

- [27] J. Madrid, “Bioplásticos en la industria el automóvil,” Madrid, 2020.
- [28] S. Olivera, H. B. Muralidhara, K. Venkatesh, K. Gopalakrishna, and C. S. Vivek, “Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review,” *J Mater Sci*, vol. 51, no. 8, pp. 3657–3674, 2016, doi: 10.1007/s10853-015-9668-7.
- [29] J. Bauer, *Impresión 3D: Introducción al mundo de la impresión 3D*, Rev. Primera edición. 2015.
- [30] “ABS | Tecnología de los Plásticos.” <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/abs.html> (accessed Aug. 08, 2023).
- [31] Descubre Arduino, “Filamento ABS: La Guía completa (y las mejores impresoras 3D ABS) - Descubrearduino.com.” <https://descubrearduino.com/filamento-abs/> (accessed Feb. 01, 2023).
- [32] “Acrilonitrilo-butadieno-estireno Copolímero de fibra de vidrio Fied ABS con 45% gf Engineering Plastic Manufacturers and Factory - Alta calidad - Xiamen Keyuan Plastic Co., Ltd.” <http://es.ky-plastics.com/acrylonitrile-butadiene-styrene/glass-fibre-grade.html> (accessed Aug. 08, 2023).
- [33] “ABS GF - Acrilonitrilo butadieno estireno recubierto con fibra de vidrio - Plásticos Brello.” <https://plasticos-brello.com/material/abs-gf/> (accessed May 28, 2023).
- [34] “PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta | Filament2Print.” <https://filament2print.com/es/pla-especial/656-fibra-carbono-proto-pasta.html> (accessed Mar. 26, 2023).
- [35] “LA FACTORÍA 3D - Fibra de Carbono.” [https://www.lafactoria3d.es/servicios/impresion/materiales/40/fibra\\_de\\_carbono](https://www.lafactoria3d.es/servicios/impresion/materiales/40/fibra_de_carbono) (accessed Aug. 21, 2023).
- [36] “¿Qué es el PETG?” [https://filament2print.com/es/blog/49\\_petg.html](https://filament2print.com/es/blog/49_petg.html) (accessed Aug. 08, 2023).
- [37] “FICHA TÉCNICA PETG”.
- [38] “Guía completa: el TPU en la impresión 3D - 3Dnatives.” <https://www.3dnatives.com/es/guia-completa-tpu-040620202/> (accessed Aug. 08, 2023).
- [39] “¿Qué es el TPU? - Lubrizol.” <https://espanol.lubrizol.com/Engineered-Polymers/About/What-is-TPU> (accessed Aug. 03, 2023).
- [40] “Propiedades del material de policarbonato (PC) | Fabricación rápida y directa.” <https://www.rapiddirect.com/es/materiales/pc-policarbonato/> (accessed Aug. 03, 2023).
- [41] “Funcionalidad del policarbonato | Rdiplastics.” <https://www.rdiplastics.com/productos-de-plastico/funcionalidad-del-policarbonato/> (accessed Aug. 08, 2023).

- [42] H. Á. GONZÁLEZ, MESA G., and DAIRO HERNÁN, “LA IMPORTANCIA DEL METODO EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES,” <https://www.redalyc.org/pdf/849/84912053029.pdf>.
- [43] “GRANTA Selector para investigación y enseñanza avanzada – Ansys Granta.” <https://www.grantadesign.com/es/education/ces-selector-for-research/> (accessed Jun. 09, 2023).
- [44] “Criterio de máxima tensión de von Mises - 2014 - Ayuda de SOLIDWORKS.” [https://help.solidworks.com/2014/spanish/solidworks/cworks/r\\_Maximum\\_von\\_Mises\\_Stress\\_Criterion.htm](https://help.solidworks.com/2014/spanish/solidworks/cworks/r_Maximum_von_Mises_Stress_Criterion.htm) (accessed Jun. 09, 2023).
- [45] “Criterio de tensión de cortadura máxima - 2014 - Ayuda de SOLIDWORKS.” [https://help.solidworks.com/2014/spanish/SolidWorks/cworks/r\\_Maximum\\_Shear\\_Stress\\_Criterion.htm?id=764ee075c0c941b49a51e0076bad4cb3#Pg0](https://help.solidworks.com/2014/spanish/SolidWorks/cworks/r_Maximum_Shear_Stress_Criterion.htm?id=764ee075c0c941b49a51e0076bad4cb3#Pg0) (accessed Jun. 09, 2023).
- [46] Teoría de Soderberg y Goodman, “Fallas por cargas dinámicas.” Accessed: Jul. 01, 2023. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/265579634/Teoria-de-Soderberg-y-Goodman>
- [47] Richard G. Budynas; J. Keith Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, Octava. 2008.
- [48] “DISEÑO DE MÁQUINAS IV edición - Robert Norton | uDocz.” <https://www.udocz.com/apuntes/96659/disen-de-maquinas-iv-edicion-robert-norton-2> (accessed Aug. 08, 2023).
- [49] Mariangely Talavera, “Ingeniería Asistida por Computador”, Accessed: Jun. 10, 2023. [Online]. Available: <https://asesoriacad.files.wordpress.com/2014/02/unidad-1-introduccion-al-cad-cam-cae.pdf>
- [50] “Uso de sistema CAD/CAM enfrenta a dentistas y protésicos | Noticias Dentales.” <https://dentistaentucidad.com/noticias-dentales/uso-de-sistema-cad-cam-enfrenta-a-dentistas-y-proteticos/> (accessed Aug. 26, 2023).
- [51] “Preparados para la 4ª revolución industrial Fabricación Aditiva”.
- [52] P. A. Ruiz, “Impresión 3D: Modelos reales, Productos mas funcionales,” *Metal Actual*. <https://es.scribd.com/document/243300314/impresion-3D-pdf> (accessed Mar. 26, 2023).
- [53] “1.3.2.- Fuerzas en los engranes helicoidales. | DPM05.- Cálculo de elementos de máquina (I).” [https://ikastaroak.birt.eus/edu/es/DFM/DPM/DPM05/es\\_DFM\\_DPM05\\_Contenidos/wbsite\\_132\\_fuerzas\\_en\\_los\\_engranes\\_helicoidales.html](https://ikastaroak.birt.eus/edu/es/DFM/DPM/DPM05/es_DFM_DPM05_Contenidos/wbsite_132_fuerzas_en_los_engranes_helicoidales.html) (accessed Jul. 11, 2023).
- [54] “Engranajes – Diseño NN.” <https://diseno336107169.wordpress.com/engranajes/> (accessed Jul. 11, 2023).
- [55] “Solved 1. The S-N curve for an acetal polymer is shown in | Chegg.com.” <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/1-s-n-curve-acetal->

- polymer-shown-fig-1-part-produced-acetal-polymer-survives-exactly-one-m-q25449806 (accessed Aug. 11, 2023).
- [56] “3D ABSpro - High quality filaments - Formfutura.”  
<https://formfutura.com/es/producto/abspro/> (accessed Jul. 09, 2023).
- [57] “3D PLA de alta calidad - High quality filaments - Formfutura.”  
<https://formfutura.com/es/producto/premium-pla/> (accessed Jul. 09, 2023).
- [58] “3D Python Flex - High quality filaments - Formfutura.”  
<https://formfutura.com/es/producto/python-flex/> (accessed Jul. 10, 2023).
- [59] “eSUN PLA+ Filament PLA Plus 3D Printer Filament PLA Pro.”  
[https://www.esun3d.com/pla-pro-product/?gclid=CjwKCAjw2K6lBhBXEiwA5RjtCcuek8P45NMryWR2z9ehaR-kIdfOT0dfgpyrsuX83eWVvkPEvHT-RoCjw4QAvD\\_BwE](https://www.esun3d.com/pla-pro-product/?gclid=CjwKCAjw2K6lBhBXEiwA5RjtCcuek8P45NMryWR2z9ehaR-kIdfOT0dfgpyrsuX83eWVvkPEvHT-RoCjw4QAvD_BwE) (accessed Jul. 09, 2023).
- [60] “Bambu Lab Carbon Fiber PLA 1.75mm - Black 1kg | Dynamism.”  
<https://www.dynamism.com/bambu-lab/bambu-lab-carbon-fiber-pla.html> (accessed Jul. 09, 2023).
- [61] “3D Drucker Tarfuse POM Filament 1.75 mm kaufen - POM Natur.”  
<https://filamentworld.de/shop/special-filament/pom-filament/tarfuse-pom-filament-natur-1-75-mm/> (accessed Jul. 09, 2023).
- [62] “CarbonX™ ezPC+CF | Filament2Print.”  
<https://filament2print.com/es/avanzados/1325-carbonx-ez-pc-cf.html> (accessed Jul. 09, 2023).
- [63] “PP+CF 3D Filament Durable Carbon Fiber by 3DXTECH.”  
<https://www.3dxttech.com/product/carbonx-pp-cf-polypropylene/> (accessed Jul. 09, 2023).
- [64] “PETG+CF 3D Printing Filament | Carbon Fiber Reinforced PETG.”  
<https://www.3dxttech.com/product/carbonx-petg-cf/> (accessed Jul. 09, 2023).
- [65] “PETG GF UV | Filament2Print.” [https://filament2print.com/es/avanzados/1992-petg-gf-uv.html#/236-color-blanco/627-formato-bobina\\_2\\_kg/217-diametro-175\\_mm](https://filament2print.com/es/avanzados/1992-petg-gf-uv.html#/236-color-blanco/627-formato-bobina_2_kg/217-diametro-175_mm) (accessed Jul. 09, 2023).
- [66] “Optimización aplicada al diseño mecánico - CORE Reader.”  
<https://core.ac.uk/reader/229165080> (accessed Sep. 05, 2023).
- [67] GUILLERMO GARCIA P., “Una teoría general de análisis en el diseño de elementos de máquinas,” <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4902424.pdf>, 1985.
- [68] “Service Code List,”

- [69] “Actuador lineal Electrak® Throttle | Thomson.”  
<https://www.thomsonlinear.com/es/productos/actuadores-lineales/electrak-throttle>  
(accessed Aug. 09, 2023).

## ANEXOS

## ANEXO 1

Acabado superficial	Factor <i>a</i>		Exponente <i>b</i>
	$S_{UT}$ kpsi	$S_{UT}$ MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

**Fig. 97.** Parámetros en el factor de la condición superficial. [47]



## ANEXO 2

Temperatura, °C	$S_T/S_{RT}$	Temperatura, °F	$S_T/S_{RT}$
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

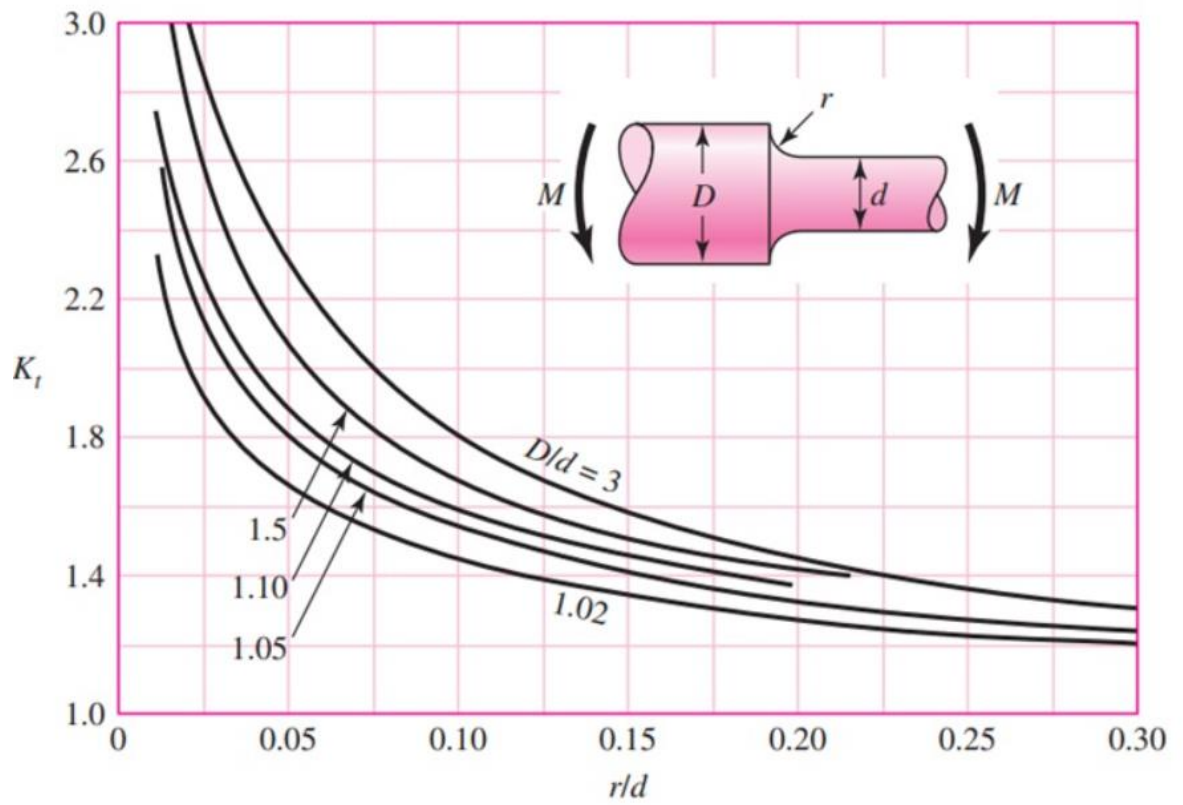
**Fig. 98.** Valores de parámetros en el factor de temperatura. [47]

## ANEXO 3

Confiabilidad, %	Variación de transformación $z_\alpha$	Factor de confiabilidad $k_\alpha$
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

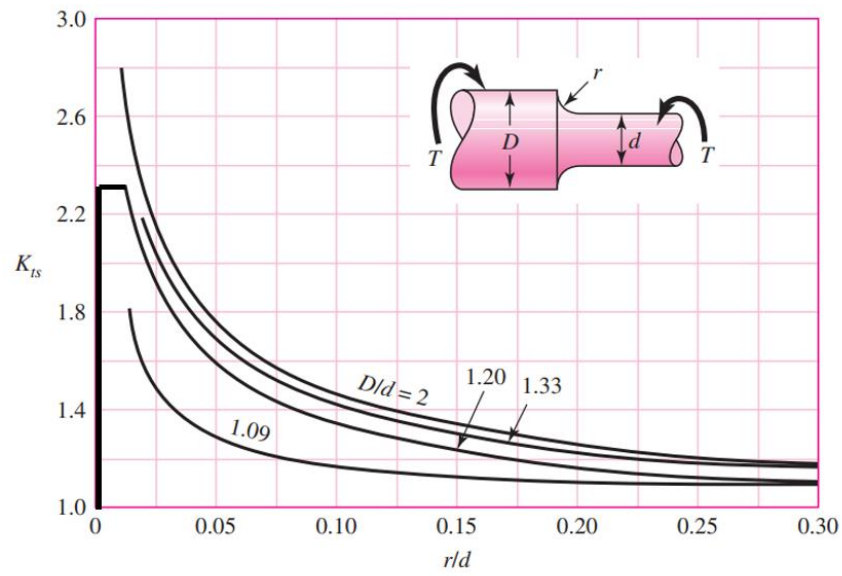
**Fig. 99.** Valores de parámetros en el factor de confianza. [47]

## ANEXO 4



**Fig. 100.** Valores de parámetros en el factor de concentración de esfuerzo por fatiga. [47]

## ANEXO 5



**Fig. 101.** Valores de parámetros “Kts” [47]

## ANEXO 6

$N_2$	$z$
1.0E6	-3.000
5.0E6	-3.699
1.0E7	-4.000
5.0E7	-4.699
1.0E8	-5.000
5.0E8	-5.699
1.0E9	-6.000
5.0E9	-6.699

**Fig. 102.** Factor  $z$  para (26). [48]

**ANEXO 7****TABLA XVI****CONSTANTE DE NEUBER [48]**

<b>Sut (Ksi)</b>	<b><math>\sqrt{a}</math> (in)</b>
<b>10</b>	0.500
<b>15</b>	0.341
<b>20</b>	0.264
<b>25</b>	0.217
<b>30</b>	0.180
<b>35</b>	0.152
<b>40</b>	0.126
<b>45</b>	0.111

## ANEXO 8



**Fig. 103.** Numero de horas donde se produce el fallo del actuador.



**Fig. 104.** Codigos de fallo presentados en la miniexcavadora por falla del actuador.

**ANEXO 9****TABLA XVII****CODIGOS DE FALLA PRESENTADOS EN LA MINIEXCAVADORA. [68]**

<b>Código de falla</b>	<b>Descripción</b>
M3204	El controlador del acelerador no se comunica con el controlador Bobcat
M3223	El control del actuador no está calibrado
M3228	Fallo en el control del actuador
M5722	Interruptor de control auxiliar fuera de rango bajo
M2521	Sensor de detección de carga fuera de rango alto



## ANEXO 10

Especificaciones	ET12-084	ET12-174	ET24-084	ET24-174
Tensión de entrada (V CC)	12		24	
Tolerancia de la tensión de entrada (V CC)	9 - 16		18 - 32	
Longitud de carrera: mm (in)	50,8 (2,0)			
Longitud en posición retraída: mm (in)	184,7 (7,27)			
Carga estática máx. (Fx): N (lb)	90 (20)	260 (60)	90 (20)	260 (60)
Carga dinámica máx. (Fx): N (lb)	45 (10)	130 (30)	45 (10)	130 (30)
Velocidad sin carga: mm/s (in/s)	96 (3,7)	48 (1,9)	96 (3,7)	48 (1,9)
Velocidad con carga nominal: mm/s (in/s)	83 (3,3)	37 (1,45)	83 (3,3)	37 (1,45)
Consumo de corriente en carga máx. nominal (A)	4		2	
Consumo de corriente en calado/pico (A)	12		6	
Peso: kg (lb)	1,11 (2,5)			
Recorrido máx. en movimiento: mm (in)	1,5 (0,06)			
Límites de la temperatura de funcionamiento Unidades estándares: °C (°F)	-40 to 85 (de -40 a 185)			
Límites de la temperatura de funcionamiento Unidades a altas temperaturas: °C (°F)	-40 to 125 (de -40 a 257)			
Ciclo de trabajo de carga completa a 25 °C	50%			
Vida útil: (ciclos)	500 000			
Par de restricción: N·m (lb·in)	0 (con restricción interna)			
Sección transversal de la conexión del cable motor: mm <sup>2</sup> (AWG)	0,8 (18)			
Longitud del cable motor: mm (in)	165 (6,5)			
Clase de protección	IP67 / IP69K			
Certificaciones	CE, RoHS			

Fig. 105. Especificaciones del actuador eléctrico. [69]

## ANEXO 11



**Fig. 106.** Posición del husillo rediseñado en la carcasa del actuador.