UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL PROCESO DE FUNDICIÓN DE AUTOPARTES DE ALUMINIO"

Trabajo de titulación previo a la obtención del título en ingeniería automotriz

Línea de investigación: Gestión, producción, productividad, innovación y desarrollo socioeconómico

AUTOR:

Mabel Carolina Ortiz López

DIRECTOR:

Ing. Erik Paúl Hernández Rueda MSc.

Ibarra – Ecuador

2026

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Ortiz López Mabel Carolina

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"Desarrollo de una metodología para el proceso de fundición de autopartes de aluminio"
AUTOR:	Ortiz López Mabel Carolina
FECHA: DD/MM/AA	23/09/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** □ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero automotriz
DIRECTOR/ ASESOR:	Ing. Erik Paúl Hernández Rueda, MSc. Ing. Víctor Javier Montenegro Simancas, MSc.

2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 23 días, del mes de septiembre de 2026

EL AUTOR:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
MABEL CAROLINA
ORTIZ LOPEZ

Firma…….....

Nombre: Mabel Carolina Ortiz López

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 23 de septiembre de 2026

Ing. Erik Paúl Hernández Rueda, MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

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

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ERIK PAUL HERNANDEZ RUEDA

(f) ……
Ing. Erik Paúl Hernández Rueda, Msc.
C.C.: 1002978060

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular "Desarrollo de una metodología para el proceso de fundición de autopartes de aluminio" elaborado por Mabel Carolina Ortiz López, previo a la obtención del título de ingeniero automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ERIK PAUL HERNANDEZ RUEDA

(f):…….
Ing. Erik Paúl Hernández Rueda, Msc.
C.C.: 1002978060

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
VICTOR JAVIER MONTENEGRO SIMANCAS

(f):…….
Ing. Víctor Javier Montenegro Simancas, Msc.
C.C.: 1717035149

DEDICATORIA

Todo el esfuerzo puesto en este trabajo de investigación lo dedico con profundo amor y gratitud a mis queridos padres, quienes no solo me brindaron la oportunidad de estudiar, sino que también han sido mi pilar fundamental en los momentos en los que sentí que no podía con todo a la vez. Gracias por confiar en mí cuando yo misma dudaba, por creer siempre en mis capacidades y por acompañarme con amor, paciencia y apoyo incondicional durante este proceso.

A mi madre, Mónica López, por ser un gran ejemplo de perseverancia, valentía y fortaleza en cada aspecto de su vida. Gracias por ser mi modelo a seguir, por tu nobleza como persona, por su entrega como madre y por demostrarme, con su ejemplo, el verdadero valor del esfuerzo, la responsabilidad y el amor.

A mi padre, Vinicio Ortiz, por enseñarme a no rendirme y a comprender que, cuando nos proponemos alcanzar una meta, con dedicación y constancia es posible lograrla. Gracias por estar siempre pendiente de mí, por guiarme con tus consejos y por ser un ejemplo de buen profesional y, sobre todo, de gran ser humano.

Mabel Carolina Ortiz López

AGRADECIMIENTO

Primeramente, quiero agradecer a mis padres por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Gracias por estar siempre para mí, por llenarme de amor cada día y por acompañarme en cada paso de mi crecimiento personal y profesional. Su confianza, comprensión y cariño han sido fundamentales para llegar hasta aquí. Los amo profundamente.

A mi familia, especialmente a mi hermana Indira y a mi sobrino Robert, gracias por su paciencia en los días de estrés, por regalarme sonrisas sinceras y por estar presentes cuando más los necesité. A mis mascotas, gracias por acompañarme en mis noches de desvelo y brindarme su amor incondicional.

A mis primos Danny y Victoria, gracias por apoyarme en mis días más difíciles, por motivarme a seguir adelante y por recordarme que podía lograrlo. A mis amigos, especialmente a Paunni, gracias por estar siempre para mí; más que una amiga, has sido como una hermana y un ejemplo de perseverancia, valentía y autenticidad.

Expreso un agradecimiento especial a mi director de tesis, MSc. Paúl Hernández, por su paciencia, guía y apoyo incondicional durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por compartir sus conocimientos con tanta entrega y por orientarme en cada etapa de este proceso. De igual manera, agradezco a mi asesor, MSc. Víctor Montenegro, por brindarme su tiempo, apoyo y conocimientos durante la realización de esta investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas que formaron parte de este camino y que, de una u otra manera, me brindaron su ayuda para culminar esta etapa de mi vida. Siempre llevaré conmigo el aprendizaje y la gratitud por todo lo recibido.

Mabel Carolina Ortiz López

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación aborda el desarrollo de una metodología para el proceso de fundición de autopartes de aluminio, implementando tecnologías de manufactura digital y técnicas tradicionales de fundición con el propósito de mejorar la eficiencia del proceso. El estudio se centró en dos autopartes: una biela y una cubierta lateral de motor de motocicleta, seleccionadas por sus diferentes características geométricas. La metodología integra la digitalización 3D de las piezas originales, reparación de mallas, fabricación aditiva de tecnologías FDM y SLA, elaboración de moldes de caucho silicón, reproducción de modelos en cera, fabricación de moldes en yeso, fundición de aluminio y comparación dimensional con las piezas originales. Se evaluaron diferentes tipos de cera, identificando que la cera de uso cosmético presentó mejores resultados por su resistencia al desmoldeo y adecuada reproducción geométrica. Los resultados evidenciaron que la digitalización 3D permitió obtener modelos STL precisos para las etapas posteriores. La biela fundida presentó una reproducción dimensional válida, mientras que la cubierta lateral mostró mayor variación en el espesor de pared. Se concluye que la metodología propuesta es técnicamente viable para el prototipado experimental y la validación geométrica de autopartes de aluminio.

Palabras clave: Fundición de aluminio, autopartes, manufactura aditiva, digitalización 3D, cera perdida, moldes de silicón, análisis dimensional.

ABSTRACT

This research addresses the development of a methodology for the aluminum casting process of automotive parts, implementing digital manufacturing technologies and traditional casting techniques in order to improve process efficiency. The study focused on two automotive parts: a connecting rod and a motorcycle engine side cover, selected due to their different geometric characteristics. The methodology integrates 3D digitization of the original parts, mesh repair, additive manufacturing using FDM and SLA technologies, silicone rubber mold production, wax pattern reproduction, gypsum mold fabrication, aluminum casting, and dimensional comparison with the original parts. Different types of wax were evaluated, identifying that cosmetic-use wax showed the best results due to its resistance during demolding and adequate geometric reproduction. The results showed that 3D digitization made it possible to obtain accurate STL models for the subsequent stages. The cast connecting rod presented valid dimensional reproduction, while the side cover showed greater variation in wall thickness. It is concluded that the proposed methodology is technically feasible for experimental prototyping and geometric validation of aluminum automotive parts.

Keywords: Aluminum casting, automotive parts, additive manufacturing, 3D digitization, lost-wax casting, silicone molds, dimensional análisis.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I 18
INTRODUCCIÓN 18
1.1 Problema de investigación. 18
1.2 Objetivos 19
1.2.1 Objetivo general 19
1.2.2 Objetivos específicos 19
1.3 Alcance 19
1.4 Justificación 20
2 CAPÍTULO II 21
2.1 Antecedentes 21
2.2 Manufactura 22
2.2.1 Conceptos básicos 23
2.2.2 Tipos de manufactura 24
2.3 Procesos de formado 24
2.3.1 Cera perdida 25
2.4 Procesos de fundición 25
2.4.1 Moldeo en arena 26
2.4.2 Moldeo en coquilla 26
2.5 Impresión 3D 26
2.5.1 Laminadores (Slicers) 27
2.5.2 Código G 27
2.5.3 Tipos de procesos de impresión 3D 28
2.5.4 Materiales para impresión 29
2.5.5 Filamento 30
2.6 Digitalización 3D 31
2.6.1 Por contacto 32

2.6.2 Sin contacto 32

3 CAPÍTULO III 33

MATERIALES Y MÉTODOS 33

3.1 Materiales 33

3.1.1 Poliuretano Termoplástico (TPU) 33

3.1.2 Resina a base de plantas tipo ABS 34

3.1.3 Caucho de silicón 35

3.1.4 Cera odontológica 36

3.1.5 Cera de parafina 36

3.1.6 Cera microcristalina 37

3.1.7 Cera termoplástica de uso cosmético 37

3.1.8 Sulfato de calcio semihidratado (yeso) 38

3.1.9 Yeso odontológico Tipo IV 38

3.1.10 Aluminio 39

3.2 Equipo 40

3.2.1 Escáner Revopoint Miraco Pro 3D 40

3.2.2 Impresora 3D Artillery Genius Pro 41

3.2.3 Impresora 3D Anycubic Photon Mono X 6K 42

3.2.4 Horno de tratamiento térmico 43

3.2.5 Crisol 44

3.3 Herramientas de software 45

3.3.1 Software de edición y procesamiento de nube de puntos 45

3.3.2 Software para procesamiento de mallas 3D 45

3.3.3 Software para impresión 3D 46

3.4 Metodología 47

3.4.1 Selección de componentes 47

3.4.2 Proceso de digitalización 48

3.4.3 Fabricación Aditiva 50

3.4.4 Producción de moldes en caucho silicón 52

3.4.5 Elaboración de los moldes en yeso 53

3.4.6 Fundición de aluminio 54

3.4.7 Análisis comparativo 55

3.4.8 Determinación del área transversal del bebedero y la velocidad de llenado 55

3.4.9 Cálculo del número de Reynolds del aluminio fundido 57

3.4.10 Factores de corrección dimensional de la pieza digitalizada, patrón de cera y pieza fundida 58

4 CAPITULO IV 61

RESULTADOS Y ANÁLISIS 61

4.1 Componentes seleccionados 61

4.2 Digitalización de los componentes 62

4.2.1 Preparación de las piezas 62

4.2.2 Propiedades y configuraciones del escaneo 63

4.3 Fabricación aditiva 64

4.3.1 FDM 64

4.3.2 SLA 66

4.4 Fabricación de moldes de caucho silicón 68

4.5 Elaboración de piezas en cera 70

4.5.1 Piezas en cera odontológica 70

4.5.2 Piezas en cera microcristalina y parafina 70

4.5.3 Piezas en cera de uso cosmético 71

4.6 Fabricación de moldes en yeso 72
4.6.1 Preparación de la mezcla de yesos 72
4.6.2 Secado y acondicionamiento térmico del molde 73
4.6.3 Vaciado y fraguado del molde 73
4.7 Piezas obtenidas mediante fundición de aluminio 74
4.8 Análisis comparativo de la pieza original y pieza fundida 75
4.8.1 Análisis comparativo de la biela 76
4.8.2 Análisis comparativo de la cubierta lateral de motor de motocicleta 81
5 CAPITULO V 87
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 87
5.1 Conclusiones 87
5.2 Recomendaciones 88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 89
ANEXOS 94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas del TPU 33
Tabla 2. Especificaciones Técnicas de la Resina ABS 34
Tabla 3. Especificaciones técnicas del Caucho de silicón 35
Tabla 4. Propiedades físicas de la cera dental 36
Tabla 5. Propiedades físicas del Aluminio 39
Tabla 6. Especificaciones técnicas del escáner MIRACO 3D Scanner 40
Tabla 7. Especificaciones técnicas de la impresora Artillery Genius Pro 41
Tabla 8. Especificaciones técnicas de Anycubic Photon Mono X 6k 42
Tabla 9. Especificaciones técnicas de horno de tratamiento térmico 43
Tabla 10. Parámetros de cálculo del flujo del aluminio fundido para la biela y la cubierta lateral 55
Tabla 11. Factores de corrección dimensional de la biela en las diferentes etapas del proceso 59
Tabla 12. Factores de corrección dimensional representativos de la biela 59
Tabla 13. Factores de corrección dimensional de la cubierta lateral de motocicleta en las diferentes etapas del proceso 60
Tabla 14. Factores de corrección dimensional representativos de la cubierta lateral de motocicleta 60
Tabla 15. Propiedades de escaneo de la biela 63
Tabla 16. Propiedades de escaneo de la cubierta lateral de motor de motocicleta 63
Tabla 17. Resumen de impresión del modelo negativo de la biela 65
Tabla 18. Resumen de impresión del modelo negativo de la cubierta lateral de motor de motocicleta 66
Tabla 19. Resumen de impresión del modelo positivo de la biela 67
Tabla 20. Resumen de impresión del modelo positivo de la cubierta lateral de motor de motocicleta 68
Tabla 21. Medidas dimensionales de la biela original 76
Tabla 22. Medidas dimensionales de la biela digitalizada y variación respecto a la pieza original 77
Tabla 23.Medidas dimensionales de la biela en cera y variación respecto a la pieza original 79
Tabla 24. Medidas dimensionales de la biela fundida y variación respecto a la pieza original 80
Tabla 25. Comparación dimensional entre la biela original, digitalizada, en cera y fundida 81
Tabla 26. Medidas dimensionales de la cubierta lateral de motocicleta original 82
Tabla 27. Medidas dimensionales de la cubierta lateral de motocicleta digitalizada y variación respecto a la pieza original 83

Tabla 28. Medidas dimensionales de la cubierta lateral de motocicleta en cera y variación respecto a la pieza original 84
Tabla 29. Medidas dimensionales de la cubierta lateral de motocicleta fundida y variación respecto a la pieza original 85
Tabla 30. Comparación dimensional entre la cubierta lateral original, digitalizada, en cera y fundida 86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de introducción a la manufactura 22
Figura 2. Diagrama de tolerancias dimensionales 24
Figura 3. Piezas en cera perdida 25
Figura 4. Proceso de la obtención del molde 26
Figura 5. Proceso de deposición del filamento 28
Figura 6. Estructura del filamento 30
Figura 7. Proceso de digitalización 3D 32
Figura 8. TPU 33
Figura 9. Resina ABS 34
Figura 10. Caucho de silicón 35
Figura 11. Cera odontológica 36
Figura 12. Cera de parafina 37
Figura 13. Cera microcristalina 37
Figura 14. Cera termoplástica 38
Figura 15. Sulfato de calcio hemihidratado 38
Figura 16. Yeso odontológico 39
Figura 17. Escáner Miraco Pro 3D 40
Figura 18. Impresora 3D Artillery Genius Pro con klipper en creality sonic pad 41
Figura 19. Impresora 3D Anycubic Photon Mono X 6k 42
Figura 20. Horno de tratamiento térmico 43
Figura 21. Crisol 44
Figura 22. Interfaz del Software REVO SCAN 5 45
Figura 23. Interfaz del Software Meshmixer 46
Figura 24. Interfaz del Software Anycubic Photon Workshop 46
Figura 25. Interfaz del Software OrcaSlicer 47
Figura 26. Flujograma de la metodología 47
Figura 27. Proceso de digitalización 48
Figura 28. Escaneo Biela 49
Figura 29. Escaneo cubierta lateral de motor de motocicleta 49
Figura 30. Malla reparada de la biela 50
Figura 31. Malla reparada de la cubierta lateral de motor de motocicleta 50
Figura 32. Modelo digital FDM del molde 51
Figura 33. Modelo digital FDM del molde de la cubierta lateral de motor de motocicleta 51
Figura 34. Modelo positivo digital SLA de la biela 52
Figura 35. Modelo positivo digital SLA de la cubierta lateral de motor de motocicleta 52
Figura 36. Molde de silicón de la biela. 53
Figura 37.Molde de silicón de la cubierta lateral de motor de motocicleta 53

Figura 38. Moldes en yeso 54
Figura 39. Fundición de aluminio en moldes de yeso 54
Figura 40. Biela 61
Figura 41. Cubierta lateral de motor de motocicleta 62
Figura 42. Biela con talco 62
Figura 43. Cubierta lateral de motor de motocicleta con talco 63
Figura 44. Modelo final de la biela 64
Figura 45. Modelo final de la cubierta lateral de motor de motocicleta 64
Figura 46. Configuración de TPU 65
Figura 47. Modelo negativo de la biela en TPU 65
Figura 48. Modelo negativo de la cubierta lateral de motor de motocicleta en TPU 66
Figura 49. Configuración de la resina ABS like 67
Figura 50. Modelo positivo de la biela en resina 67
Figura 51. Modelo positivo de la cubierta lateral de motor de motocicleta en resina 68
Figura 52. Medición del componente A) Caucho silicón y componente B) Catalizador 69
Figura 53. Molde final de la biela en caucho silicón 69
Figura 54. Molde final de la cubierta lateral de motor de motocicleta en caucho silicón 69
Figura 55. Falla en el desmoldeo de piezas de cera odontológica 70
Figura 56. Falla en el desmoldeo de piezas de cera microcristalina y parafina 71
Figura 57. Modelo en cera cosmética de la biela 71
Figura 58. Modelo en cera cosmética de la cubierta lateral del motor de una motocicleta 72
Figura 59. Mezcla para la fabricación de moldes en yeso 72
Figura 60. Preparación del horno térmico 73
Figura 61. Vaciado y fraguado de los moldes 73
Figura 62. Biela fundida fallida 74
Figura 63. Cubierta lateral del motor de motocicleta fundida fallida 74
Figura 64. Biela fundida elaborada 75
Figura 65. Cubierta lateral del motor de motocicleta fundida elaborada 75
Figura 66. Acotación dimensional de la biela original 76
Figura 67. Acotación dimensional de la biela digitalizada 77
Figura 68. Acotación dimensional de la biela en cera 78
Figura 69. Acotación de la biela fundida 79
Figura 70. Acotación de la cubierta lateral de motocicleta original 82
Figura 71. Acotación de la cubierta lateral de motocicleta digitalizada 83
Figura 72. Acotación de la cubierta lateral de motocicleta en cera 84
Figura 73. Acotación de la cubierta lateral de motocicleta fundida 85

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Área transversal 56
Ecuación 2. Velocidad de llenado 56
Ecuación 3. Número de Reynolds 57
Ecuación 4. Factor de corrección dimensional experimental 58
Ecuación 5. Factor de corrección digitalizada 58
Ecuación 6. Factor de corrección de cera 58
Ecuación 7. Factor de corrección fundida 59
Ecuación 8. Cálculo de la dimensión corregida mediante el factor de corrección 60

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Tema

Desarrollo de una metodología para el proceso de fundición de autopartes de aluminio.

1.1 Problema de investigación.

El área metalúrgica ecuatoriana se basa principalmente de importaciones de piezas metálicas, en su mayoría son componentes fundidos con aluminio aplicadas en autopartes. Los procesos de fundición de aluminio en Ecuador se realizan de manera artesanal o semi industrial, operando con bajos parámetros técnicos.

Esta problemática limita al sector productivo nacional, debido a que impide garantizar la calidad necesaria para cumplir estándares internacionales. Además, esta irregularidad incrementa los costos de producción, reduce la eficiencia de los productos y obliga a la industria a depender de importaciones, afectando la economía del país [1].

Con base en los avances tecnológicos en los procesos de impresión y digitalización 3D, el proceso productivo plantea el desarrollo de una metodología optimizada para la fundición de piezas automotrices en aluminio, que cumpla con los parámetros óptimos de fundición, analizando el tipo de moldeo más adecuado. Esta propuesta busca mejorar la calidad, precisión geométrica y a la implementación de prácticas sostenibles en la fabricación de componentes automotrices [2].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología para el proceso de fundición de piezas automotrices en aluminio, priorizando la calidad y eficiencia de la fabricación.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Definir las autopartes a fabricar y establecer el proceso de fundición adecuado, considerando la geometría, función, y producción del prototipo.
2. Validar los modelos a través de digitalización 3D.
3. Desarrollar el proceso de moldeo y fundición de las autopartes seleccionadas.
4. Validar los datos comparando con el modelo original.

1.3 Alcance

El presente estudio se centra en el análisis de procesos aditivos: SLA y FDM, para la fabricación de moldes de dos autopartes: biela, y cubierta lateral de motor de motocicleta, aplicando técnicas de moldeo apropiadas para reducir los defectos y evitar el uso de post mecanizado, para verificar el acabado se realizará una validación con digitalización 3D.

Esta investigación establecerá una evaluación técnica del proceso de fundición de las piezas automotrices, además de realizar una evaluación de factibilidad económica del producto. Los resultados que se obtendrán ayudarán a definir metodologías aplicables en el área metalúrgica ecuatoriana, contribuyendo al avance tecnológico y productivo de la industria local.

1.4 Justificación

La presente investigación plantea aplicar técnicas de manufactura como la impresión 3D en SLA y FDM, para la fabricación de moldes de las piezas a fundir. Estas técnicas disminuirán los errores de moldeo e incorporarán procesos más sostenibles para el medio ambiente. Se realizarán dos piezas, una biela y una cubierta lateral de motocicleta. Las piezas resultantes serán comparadas con digitalización 3D de las piezas originales.

Este proyecto aporta al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 9: Industria, Innovación e Infraestructura, al promover una industria inclusiva y sostenible, al fortalecer el desarrollo tecnológico y la introducción de nuevas técnicas de manufactura al país [3].

La mejora de los procesos de manufactura permite la competitividad de talleres y pequeñas industrias, lo que puede generar puestos de trabajo, especialmente en áreas vinculadas a la fabricación de autopartes, diseño mecánico y servicios técnicos, aportando así al Eje 2 del Plan Nacional de Desarrollo 2025–2029, “Oportunidades y empleo digno” [4].

La investigación busca fortalecer a la producción local al proponer una metodología aplicable para fabricación baja o masiva. La aplicación de técnicas de impresión y escaneo 3D permitirá fabricar piezas a bajo costo y con una alta precisión, disminuyendo las importaciones y promoviendo el uso de piezas nacionales [5].

Este trabajo validará los parámetros técnicos como: la temperatura de colada, velocidad de enfriamiento, tipo de moldeo y necesidad de un proceso post moldeo, aportando conocimientos técnicos que pueden ser aplicados al diseño y optimización de procesos industriales [6].

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En el estudio de D. Chauhan y A. Singh, se evidenció la eficiencia de recursos y la optimización energética a través de procesos de fabricación aditiva. Los resultados evidenciaron que la agregación de manufactura aditiva reduce los residuos hasta en un 25 % y mejora la sostenibilidad del proceso de elaboración [7].

En la producción de componentes automotrices de aluminio la selección correcta de materiales y energía puede reducir los costos totales de producción, esto es analizado en el estudio: “Life Cycle Assessment and Activity-Based Costing for Low-Cost Aluminum Die Casting” en la revista Results in Engineering [8].

El impacto del tipo de molde de arena hueco en la microestructura y propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio. El estudio de B. Liu, J. Kang y Y. Zhao se comparó moldes sólidos y huecos bajo las mismas condiciones de colada. Se pudo concluir que los moldes huecos presentan un enfriamiento más uniforme, mejoran la resistencia a la tracción y reduce procesos post mecanizado de la pieza, mejorando la calidad del producto final [9].

Y. Mohseni en su artículo estudió cómo los parámetros de impresión 3D FDM (velocidad, temperatura y altura de capa) influyen en las dimensiones de moldes utilizados para la fundición de aluminio. Se compararon los moldes impresos con diferentes parámetros, con una correcta configuración se obtiene un mejor molde [10].

R. Kleinhans en su trabajo evaluó las propiedades físicas y químicas de moldes 3D utilizados en la fundición de metales ligeros. Mediante ensayos experimentales se demostró que los moldes impresos en 3D permiten un mayor control de la transferencia térmica, disminuyendo defectos de solidificación y mejorando la estructura de las piezas fundidas [11].

2.2 Manufactura

La manufactura es el conjunto de procesos técnicos e industriales mediante los cuales las materias primas se transforman en productos con valor agregado, a través de operaciones controladas que modifican su forma, dimensiones, propiedades o estado físico, cumpliendo requisitos funcionales y de calidad [12].

Figura 1. *Diagrama de introducción a la manufactura*



Tomado de: Ivanov, Evtuhov, Dehtiarov,Trojanowska, Introduction to Manufacturing Engineering, 2025, [12]

2.2.1 Conceptos básicos

Los conceptos de manufactura son fundamentales para entender el funcionamiento de los procesos industriales que se van a aplicar, permiten interpretar correctamente las etapas de la transformación de la materia prima en una pieza final.

2.2.1.1 Materia prima

Es el material inicial con propiedades físicas, químicas y mecánicas determinadas, las cuales definen su comportamiento durante el proceso de manufactura. La selección de la materia prima influye en acabado del producto final, la eficacia del proceso y los costos de producción [13].

2.2.1.2 Acabado superficial

El acabado superficial como la calidad de la superficie física de una pieza resultante, evaluado mediante parámetros de rugosidad. Estudios demuestran que el acabado superficial afecta la funcionalidad, vida útil y desempeño mecánico del componente, y depende directamente del proceso, parámetros de operación y material utilizado [14].

2.2.1.3 Tolerancias dimensionales

Las tolerancias dimensionales son los límites permisibles de variación en las dimensiones de una pieza, establecidos para garantizar el correcto ensamblaje, funcionamiento y control de costos dentro del proceso de manufactura. Las investigaciones destacan que una correcta asignación de tolerancias es clave para garantizar un ensamblaje adecuado, la funcionalidad del producto y control de costos, ya que tolerancias más estrictas aumentan la complejidad y el costo de manufactura [15].

Figura 2. *Diagrama de tolerancias dimensionales*



Tomado de: Umaras, Dimensional Tolerances in Mechanical Assemblies: A Cost-Based Optimization Approach, 2023, [15]

2.2.2 Tipos de manufactura

2.2.2.1 Manufactura aditiva

La manufactura aditiva es un método de fabricación en el cual los objetos tridimensionales se crean mediante la adición de material capa por capa a partir de un modelo digital, permitiendo geometrías complejas y reducción de desperdicios, esta manufactura es utilizada en áreas como la ingeniería, medicina y diseño industrial [16].

2.2.2.2 Manufactura sustractiva

La manufactura sustractiva es un proceso en el cual el material es removido de una pieza inicial mediante operaciones de mecanizado, como fresado o torneado, hasta obtener la geometría final deseada. Presenta una alta precisión dimensional, un buen acabado superficial, destacando en la producción de piezas mecánicas [17].

2.3 Procesos de formado

Los procesos de formado son técnicas de manufactura que permiten dar forma a un material mediante deformación plástica o solidificación, sin necesidad de remover material en grandes cantidades.

Estos procesos requieren la aplicación de calor, presión o ambos, y son ampliamente utilizados para fabricar componentes metálicos con formas complejas y buenas propiedades mecánicas [18].

2.3.1 Cera perdida

El proceso de cera perdida es un método de fundición en el cual se utiliza un modelo de cera que es recubierto por material refractario; posteriormente, la cera se elimina con altas temperaturas, dejando un molde en el cual se vierte el metal fundido para obtener piezas con una alta precisión dimensional y un buen acabado superficial [19]

Figura 3. *Piezas en cera perdida*



Tomado de: Mukhtarkhanov, Perveen, Talamona, Application of Stereolithography Based 3D Printing Technology in Investment Casting, 2020, [19]

2.4 Procesos de fundición

Los procesos de fundición consisten en fundir un material metálico y verterlo en un molde, donde se solidifica adquiriendo la forma deseada. La fundición es un método versátil de manufactura, ya que con el se pueden fabricar una amplia variedad de piezas con distintos metales y aleaciones [20].

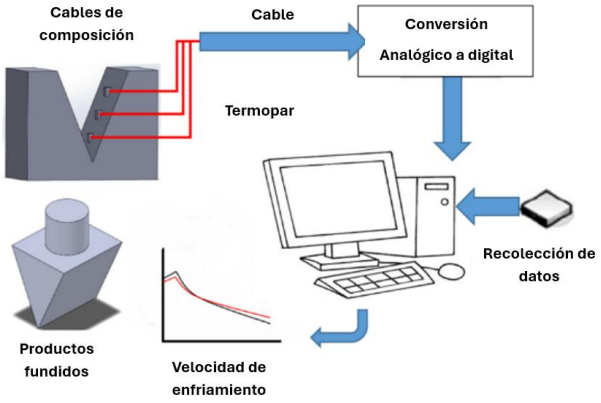
2.4.1 Moldeo en arena

El moldeo en arena es un proceso de fundición que utiliza moldes desechables de arena compactada, adecuado para fabricar piezas de gran tamaño y geometrías variadas. Sin embargo, presenta una menor precisión dimensional y acabado superficial en comparación con otros métodos [21].

2.4.2 Moldeo en coquilla

El moldeo en coquilla es un proceso de fundición que emplea moldes metálicos permanentes, lo que permite obtener mejor acabado superficial y mayor precisión dimensional [22].

Figura 4. *Proceso de la obtención del molde*



Tomado de: Majid, Investigation of Thickness Effects on Cooling Rate and Hardness of Gray Cast Iron in Metal and Sand Molds, 2025, [22]

2.5 Impresión 3D

La impresión 3D es una tecnología de manufactura aditiva que permite fabricar objetos tridimensionales a partir de un modelo digital, mediante la deposición controlada de material capa por capa. Este proceso es fundamental en la elaboración de componentes que han ayudado en el desarrollo de la ingeniería [23].

2.5.1 Laminadores (Slicers)

Los laminadores son softwares que convierten un modelo CAD en capas y generan las instrucciones necesarias para la impresora 3D, definiendo parámetros como velocidad, temperatura y altura de capa[24]. Las extensiones CAD que comúnmente se usa son: STL (Standard Tessellation Language), OBJ (Wavefront Object), 3MF (3D Manufacturing Format), AMF (Additive Manufacturing File).

2.5.1.1 Slicers para impresión SLA

El Software especializado en tecnologías SLA, DLP y LCD, para la impresión 3D en resina. Ayuda con la orientación del modelo para mejorar la calidad, generando soportes automáticos y manuales, además configura tiempos de exposición y curado disminuyendo el consumo de resina.

2.5.1.2 Slicers para impresión FDM

El Software de laminado para impresión FDM, convierte modelos CAD en código G. Permite ajustar parámetros de impresión como: temperatura, velocidad, retracción y altura de capa, es compatible con múltiples impresoras FDM. Este programa facilita la optimización de calidad y tiempo de la impresión, visualizando la impresión capa por capa antes de ejecutar el proceso.

2.5.2 Código G

El código G es un lenguaje de programación utilizado para controlar los movimientos, velocidades y acciones de la impresora 3D durante el proceso de fabricación precisa del modelo digital [25].

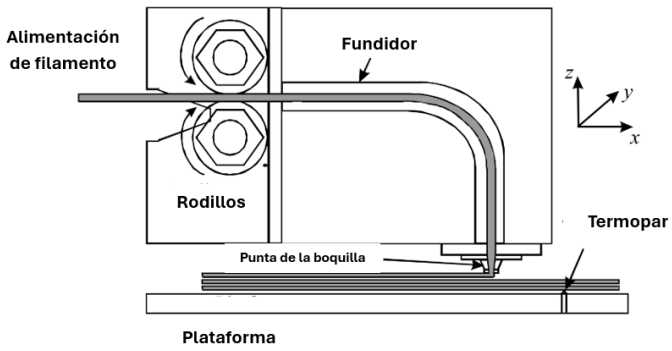
2.5.3 Tipos de procesos de impresión 3D

La impresión 3D comprenden un conjunto de tecnologías de manufactura aditiva con procesos que se diferencian principalmente por el principio de funcionamiento, el tipo de material y la forma en que el material es depositado durante la fabricación. La selección del proceso de impresión 3D depende de factores como la precisión dimensional requerida, el acabado superficial, las propiedades mecánicas del material y la aplicación final de la pieza.

2.5.3.1 Modelado por deposición de material fundido (Fused Deposition Modeling, FDM)

El proceso FDM consiste en la extrusión de un filamento termoplástico fundido que se deposita capa por capa hasta formar el objeto tridimensional. En esta como en otras tecnologías aditivas, una vez que se obtiene el diseño, se realiza un corte para nivelar la superficie en la que se depositará durante la impresión [26].

Figura 5. *Proceso de deposición del filamento*



Tomado de: Freire, Vlahos, Bol, Šavija, Micromechanical Models for FDM 3D-Printed Polymers: A Review, 2023, [26]

2.5.3.1.1 Extrusión directa

Es un sistema para impresión 3D de materiales flexibles que ofrece una mayor precisión en la deposición del material. Este método permite retracciones cortas, mejorando la calidad superficial y es más adecuada para impresión técnica y prototipos funcionales [27].

2.5.3.1.2 Sistema Bowden

Este sistema fue diseñado para impresiones rápidas debido a su cabezal ligero, es aplicado para producción de piezas sencillas con filamentos rígidos, ya que reduce vibraciones y mejora la estabilidad mecánica a altas velocidades. Tiene un Menor consumo de energía en el movimiento del eje, este procedimiento es recomendado para materiales muy flexibles [28].

2.5.3.2 Estereolitografía (Stereolithography Apparatus, SLA)

La estereolitografía es un proceso de impresión 3D que utiliza resina líquida fotosensible, la cual se solidifica mediante la acción de un láser o fuente de luz ultravioleta, que se repite capa por capa hasta finalizar el proceso de elaboración de la pieza. Este proceso tiene un buen acabado, trabaja a velocidades más altas y permite una variedad de materiales más amplia [29].

2.5.4 Materiales para impresión

2.5.4.1 Resina

La resina es un material fotosensible utilizado en tecnologías como SLA, caracterizado por su alta precisión y excelente acabado superficial [30].

2.5.4.1.1 Resina estándar

Es el material más utilizado en impresión 3D por resina, se usa principalmente para prototipado rápido. Presenta un excelente acabado superficial sin necesidad de aplicar procesos de post mecanizado, sin embargo, tiene una baja resistencia mecánica comparada con resinas técnicas. Este material se aplica para producir piezas con detalles finos y geometrías complejas, además es accesible y de bajo costo [31].

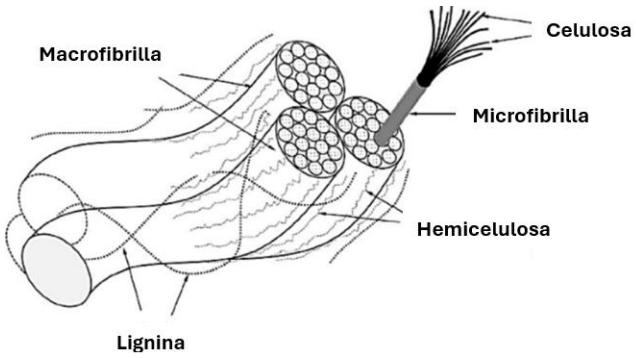
2.5.4.1.2 Resina Casteable

La resina casteable fue diseñada para quemarse sin dejar residuos, esta propiedad la hace ideal para procesos de fundición. Es usada en joyería y cera perdida por su alta precisión dimensional y facilidad de fabricación de moldes complejos [32].

2.5.5 Filamento

El filamento es un material termoplástico en forma de hilo continuo, utilizado principalmente en impresión FDM, disponible en diferentes composiciones como PLA, ABS o PETG [33].

Figura 6. *Estructura del filamento*



Tomado de: Ahmad, Ishak, Mohammad, Mustapha, Leman, A Review of Natural Fiber-Based Filaments for 3D Printing: Filament Fabrication and Characterization, 2023, [33]

2.5.5.1 Acrilonitrilo butadieno estireno (Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS)

Es un insumo resistente ya que tiene una buena estabilidad mecánica. Gracias a su control térmico soporta temperaturas moderadas. Comúnmente es usado en piezas funcionales, carcasas y componentes mecánicos.

2.5.5.2 Polietileno tereftalato modificado con glicol (Polyethylene Terephthalate Glycol, PETG)

Es un material con buena resistencia química, tiene una menor inestabilidad que el PLA. Presenta una buena adhesión entre capas, por lo que es usado en la producción de envases, piezas mecánicas y prototipos funcionales [34].

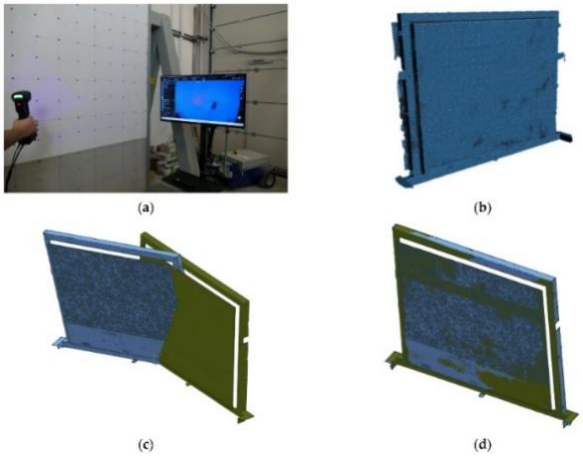
2.5.5.3 Poliuretano termoplástico (Thermoplastic Polyurethane, TPU)

Es un filamento flexible usado en impresión 3D FDM, tiene alta elasticidad lo que le permite deformarse y recuperar su forma original. Excelente resistencia a la abrasión y al desgaste. Requiere bajas velocidades de impresión, y tiene amplias aplicaciones en la impresión 3D más allá de piezas resistencia [35].

2.6 Digitalización 3D

La digitalización 3D es el proceso de captura de la geometría de un objeto físico para generar un modelo digital tridimensional. Esta tecnología es fundamental en aplicaciones como ingeniería inversa, control de calidad y diseño asistido por computadora [36].

Figura 7. *Proceso de digitalización 3D*



Tomado de: Piekarczuk, Mazurek, Szer, A Case Study of 3D Scanning Techniques in Civil Engineering Using the Terrestrial Laser Scanning Technique, 2024, [36]

2.6.1 Por contacto

La digitalización por contacto utiliza dispositivos, como palpadores o sondas que tocan físicamente la superficie del objeto para obtener coordenadas precisas de su geometría [37].

2.6.2 Sin contacto

La digitalización sin contacto emplea tecnologías, como láser o luz estructurada, para capturar la forma del objeto sin tocarlo físicamente. Este método adquiere datos rápidamente, por lo que se aplica para capturar objetos frágiles o con geometrías complejas [38]. Esta herramienta permite transformar piezas reales en modelos digitales 3D, tiene una tecnología de escaneo sin contacto que aporta una alta precisión y buen nivel de detalle. Es compatible con procesos de impresión 3D y CAD, lo cual facilita la producción y análisis de piezas complejas, además permite documentar objetos para el mantenimiento o control de calidad.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

3.1.1 Poliuretano Termoplástico (TPU)

El Poliuretano Termoplástico (TPU) es un material flexible para impresión 3D de 1,75 mm de calibre. Este material tiene una buena absorción de energía y estabilidad ante agentes químicos y solventes.

Figura 8. *TPU*



Tomado de: Creality. Filamento TPU, 2024 [39]

Tabla 1. *Especificaciones técnicas del TPU*

Propiedad	Unidad	Filamento
Temperatura de impresión	°C	200-250
Temperatura de la cama	°C	Hasta 60
Fuerza de tensión	MPa	50
Tensión de elongación a la rotura	%	450
Módulo de tensión	MPa	150
Peso	g	330

Tomado de: Cality. Filamento TPU, 2024 [39]

3.1.2 Resina a base de plantas tipo ABS

Le resina ABS es resistente y duradera hecha de materiales vegetales renovables. Es ideal para prototipos y piezas duraderas.

Figura 9. *Resina ABS*



Tomado de: PRODEMAQ. Resina tipo ABS Like, 2025 [40]

Tabla 2. *Especificaciones Técnicas de la Resina ABS*

Propiedad	Valor
Peso	1kg
Densidad (g/cm3)	1.05-1.25
Viscosidad (MPa*S)	130-230
Fuerza máxima (N)	1443.54±10%
Resistencia a la tracción (MPa)	34.7±10%
Módulo de Tracción (MPa)	474.26±10%
Alargamiento a la rotura	19.54±10%
Fuerza Flexible (MPa)	39.47±10%
Módulo de flexión (MPa)	1156.21±10%

Tomado de: PRODEMAQ. Resina tipo ABS Like, 2025 [40]

3.1.3 Caucho de silicón

El caucho de silicón es un polímero flexible y duradero, con excelente estabilidad térmica y resistencia química. Conocido por su capacidad para mantener sus propiedades en un amplio rango de temperaturas.

Figura 10. *Caucho de silicón*



Tomado de: PINTULAC. Caucho de silicón, 2026 [41]

Tabla 3. *Especificaciones técnicas del Caucho de silicón*

Propiedades	Unidades	Valores
Peso específico	g/cm3	0,972
Dureza de indentación	Shore A	25-90
Carga de rotura	kg/cm2	35-105
Alargamiento a la rotura	%	100-800
Desgarro		Aceptable
Resistencia a la abrasión		Aceptable
Temperatura de trabajo	ºC	-70+200

Tomado de: Juntas industriales. Ficha técnica caucho silicón [42]

3.1.4 Cera odontológica

La cera odontológica es un material orgánico que se caracteriza por su maleabilidad dentro de un intervalo de fusión específico. Esta propiedad, sumada a una notable estabilidad dimensional, le permite conservar con alta precisión las dimensiones y la morfología del patrón modelado.

Figura 11. *Cera odontológica*



Tomado de: CRON. Cera, 2023 [43]

Tabla 4. *Propiedades físicas de la cera dental*

Propiedad	Valor
Temperatura de fusión	37°C - 65 °C
Coeficientes de contracción térmica	0.3% y 0.7% por cada 10°C de reducción de temperatura
Coeficientes de expansión térmica	0.7% al aumentar 20°C o se contrae un 0.35% al enfriarse de 37 a 25°C

Tomado de: Clínica Santana. Composición y tipos de ceras, 2025 [44]

3.1.5 Cera de parafina

Es un subproducto del petróleo, procedente del proceso de refinación. Es solida a temperatura ambiente, con un punto de fusión bajo (45 – 65°C). Se utiliza principalmente para la fabricación de velas, puede ser modificada o mezclada con otras ceras para ajustar su punto de fusión y dureza.

Figura 12. *Cera de parafina*



Tomado de: EVERICOM. Cera de parafina, 2020 [45]

3.1.6 Cera microcristalina

La cera microcristalina tiene un punto de fusión elevado (65 – 100ºC), se caracteriza por su flexibilidad y tenacidad, lo que la hace menos quebradiza. Aporta y previene el agrietamiento en mezclas que contienen distintas ceras.

Figura 13. *Cera microcristalina*



Tomado de: EVERICOM. Cera microcristalina, 2020 [46]

3.1.7 Cera termoplástica de uso cosmético

La cera cosmética es empleada como material de modelado ya que es termoplástica, se ablanda con el calor y se endurece al enfriarse, tiene un punto de fusión de 55 a 80 °C. Es un material con alta maleabilidad para reproducción de formas, permite copiar contornos, bordes y detalles superficiales.

Figura 14. *Cera termoplástica*



3.1.8 Sulfato de calcio semihidratado (yeso)

El yeso es un material ampliamente utilizado en el área de construcción por su facilidad para moldear, lo que permite obtener superficies uniformes y lisas. Se caracteriza por su rápido de fraguado, y buenas propiedades de aislamiento térmico.

Figura 15. *Sulfato de calcio hemihidratado*



Tomado de:[47]

3.1.9 Yeso odontológico Tipo IV

Es un material con una alta resistencia y precisión utilizado principalmente para la fabricación de modelos de trabajo detallados. Su superficie lisa y dura permite el pulido y acabado de las piezas.

Figura 16. *Yeso odontológico*



Tomado de: CRON. Yeso Ortodoncia, 2023 [48]

3.1.10 Aluminio

El aluminio es un metal ligero que posee una alta ductilidad y maleabilidad; dichas propiedades mecánicas lo convierten en un material óptimo para procesos de conformado como la fundición, el laminado y la forja. En la fabricación de componentes, este material proporciona acabados superficiales de alta calidad. Asimismo, su amplia disponibilidad en el mercado favorece una adquisición económicamente competitiva.

Tabla 5. *Propiedades físicas del Aluminio*

Propiedad	**Valor**
Masa atómica	26.98 g/mol
Densidad	2.7 g/cm3
Punto de fusión	660.3 °C
Punto de ebullición	2467 °C
Estado de la materia	Sólido a temperatura ambiente
Color	Plateado/blanco
Conductividad térmica	237 W/(m·K)
Conductividad eléctrica	38.2 × 10^6 S/m
Coeficiente de expansión térmica	23.1 × 10^ (-6) K^ (-1)
Módulo de elasticidad	70 GPa
Dureza (escala Mohs)	2.75

Tomado de: Marco Saltos. Fabricación de piezas, 2023 [49]

3.2 Equipo

3.2.1 Escáner Revopoint Miraco Pro 3D

Es un escáner 3D independiente y portátil, con tecnología de luz estructurada infrarroja, que frece precisión al capturar detalles, ideal para objetos grandes o pequeños, cuentan modo de escaneo versátiles.

Figura 17. *Escáner Miraco Pro 3D*



Tomado de: Tienda Kear3D. Revopoint Miraco Pro 3D Scanner, 2025 [50]

Tabla 6. *Especificaciones técnicas del escáner MIRACO 3D Scanner*

Característica	Especificación técnica
Tipo de equipo	Escáner 3D portátil
Sistema de cámaras	Sistema cuádruple de cámaras de profundidad
Cámaras de profundidad	2 cámaras Near-mode + 2 cámaras Far-mode
Cámara de color	Cámara RGB de alta resolución
Precisión	Hasta 0.05 mm (precisión por cuadro)
Modos de escaneo	Near mode y Far mode
Modos de captura	Escaneo continuo y disparo único (Single-shot)
Iluminación	LEDs infrarrojos y proyectores de luz blanca
Pantalla	Pantalla AMOLED integrada
Almacenamiento	16 GB o 32GB DDR4
Conectividad	Wi-Fi, USB Type-C
Salida de video	DisplayPort vía USB Type-C
Alimentación	Adaptador de Corriente USB-C (65W)
Montaje	Rosca estándar ¼” para trípode

Tomado de : REVOPOINT. Miraco 3D scanner, 2023 [51]

3.2.2 Impresora 3D Artillery Genius Pro

La impresora Artillery Genius tiene un controlador avanzado, facilitando la puesta en marcha y su uso. Tiene un klipper en una creality sonic pad, lo que mejora la calibración de la impresora.

Figura 18. *Impresora 3D Artillery Genius Pro con klipper en creality sonic pad*

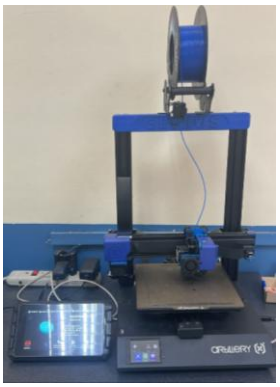


Tabla 7. *Especificaciones técnicas de la impresora Artillery Genius Pro*

Característica	Especificación
Tecnología de impresión	FDM (Modelado por deposición fundida)
Área de impresión	220 x 220 x 250 mm
Materiales de impresión	PLA, ABS, PETG, TPU, WOOD
Sensor de auto nivelación	ABL
Conector del cable del extrusor	Rediseñado (a la tarjeta y de la tarjeta a la PCB)
Nivel de ruido	Ultra silenciosa
Cama caliente	130°C
Soporte en el eje Z	Doble
Interfaz de usuario	Pantalla táctil a color
Tipo de extrusor	Titan (Extrusión directa)

Tomado de: Arrow. Artillery Genius Pro, 2026 [52]

3.2.3 Impresora 3D Anycubic Photon Mono X 6K

Es una impresora 3D de resina que permite conseguir piezas con detalles muy exactos, es ideal para modelos detallados y prototipos. Utiliza tecnología de curado UV LCD.

Figura 19. *Impresora 3D Anycubic Photon Mono X 6k*



Tomado de: Anycubic. Photon Mono X 6k, 2025 [53]

Tabla 8. *Especificaciones técnicas de Anycubic Photon Mono X 6k*

Datos técnicos	
Tamaño de la impresora	47.5 x 29 x 27 cm
Volumen de impresión	197 x 122 x 245 mm
Peso	11 kg
Tecnología impresión	Impresión SLA basada en LCD
Velocidad de Impresión	MAX 80mm/h
resolución XY	5,760 x 3,600 px (6K)
Resolución horizontal	34 µm
Grosor de capa	25 - 300 micras
Materiales	Resina UV 405 nanómetros
Archivos	STL
Entrada de poder	120W

Tomado de: Anycubic. Photon Mono X 6k, 2025[54]

3.2.4 Horno de tratamiento térmico

El horno elaborado a base de resistencias eléctricas se aplica para tratamientos térmicos superficiales, ya que tiene un control preciso de temperatura y una estabilidad térmica. Optimiza recursos por su bajo costo operativo y eficiencia energética.

Figura 20. *Horno de tratamiento térmico*



Tabla 9. *Especificaciones técnicas de horno de tratamiento térmico*

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Física	Temperatura equivalente	1200	C
	Temperatura máxima	1000	C
	Dimensiones externas (LxAxAl)	570, 420,	mm
	Dimensiones internas (LxAxAl)	490	mm
	Altura del piso al horno	280, 200,	mm
		230	m2
		50	kg
		1.12	
		189	
Térmicas	Pérdidas totales	2436	W
	Calor total necesario	9746	W
	Tiempo de calentamiento	30.37	min
	Tiempo de enfriamiento	5297	min
	Eficiencia del horno	90.40	%

Eléctricas	Potencia del horno	7309	W
	Potencia de las resistencias	1991	W
	Corriente eléctrica	33.23	A
	Resistencia eléctrica	6.62	Ω
	Resistencia a temperatura ambiente	6.37	Ω
	Diámetro de la resistencia	1.1	mm
	Longitud de alambre	15.17	m
	Diámetro de la espira	0.0055	m
	Número de espiras	1097	--
	Longitud de la espira (comprimida – extendida)	1.2-3.6	m
	Paso de arrollamiento	0.0033	m

Tomado de: Ruiz, S. Suárez, D. Construcción de un horno [55]

3.2.5 Crisol

Este recipiente está diseñado para soportar temperaturas muy altas, ya que se utiliza para fundir metales o materiales sólidos. Permite una fusión controlada del material, facilitando la separación de impurezas durante la fusión.

Figura 21. *Crisol*



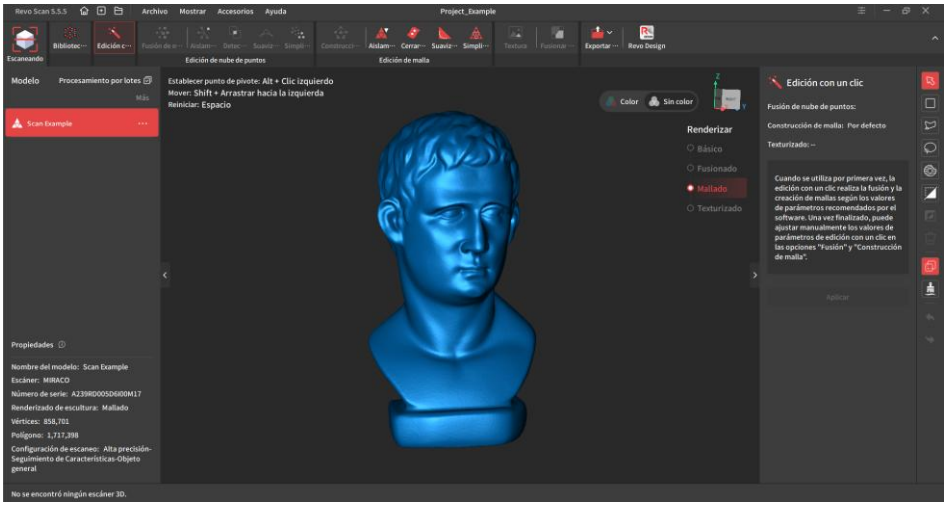
3.3 Herramientas de software

3.3.1 Software de edición y procesamiento de nube de puntos

Revo Scan 5 es un software de escaneo 3D, genera modelos detallados, ofrece herramientas de edición de mallas, permite la alineación y fusión de escaneos.

Diseñado para flujos de trabajos eficientes, utilizado principalmente en ingeniería inversa y digitalización.

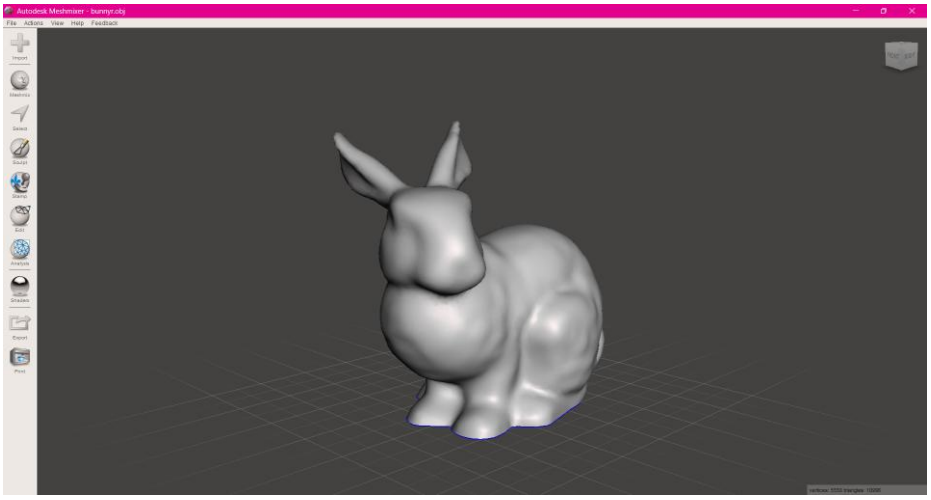
Figura 22. *Interfaz del Software REVO SCAN 5*



3.3.2 Software para procesamiento de mallas 3D

Meshmixer es un software gratuito de modelado y edición 3D, permite reparar modelos 3D escaneados. Cuenta con herramientas para cortar, dividir y fusionar mallas. Este programa es ideal para realizar modificaciones y personalizaciones en modelos.

Figura 23. *Interfaz del Software Meshmixer*



3.3.3 Software para impresión 3D

3.3.3.1 Anycubic Photon Workshop

Este software incluido con la impresora 3D, permite configurar los parámetros de impresión como: velocidad, consumo y tiempos de exposición, en tecnologías SLA.

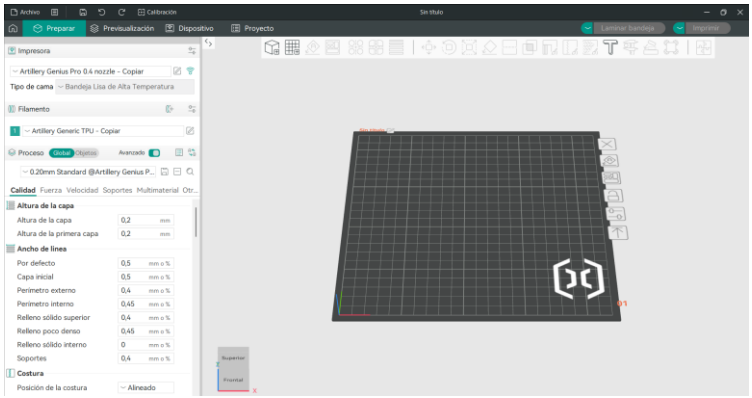
Figura 24. *Interfaz del Software Anycubic Photon Workshop*



3.3.3.2 OrcaSlicer

El Software gratuito para tecnologías con impresión FDM, es compatible con múltiples impresoras. Este programa convierte un modelado CAD a un código G.

Figura 25. *Interfaz del Software OrcaSlicer*

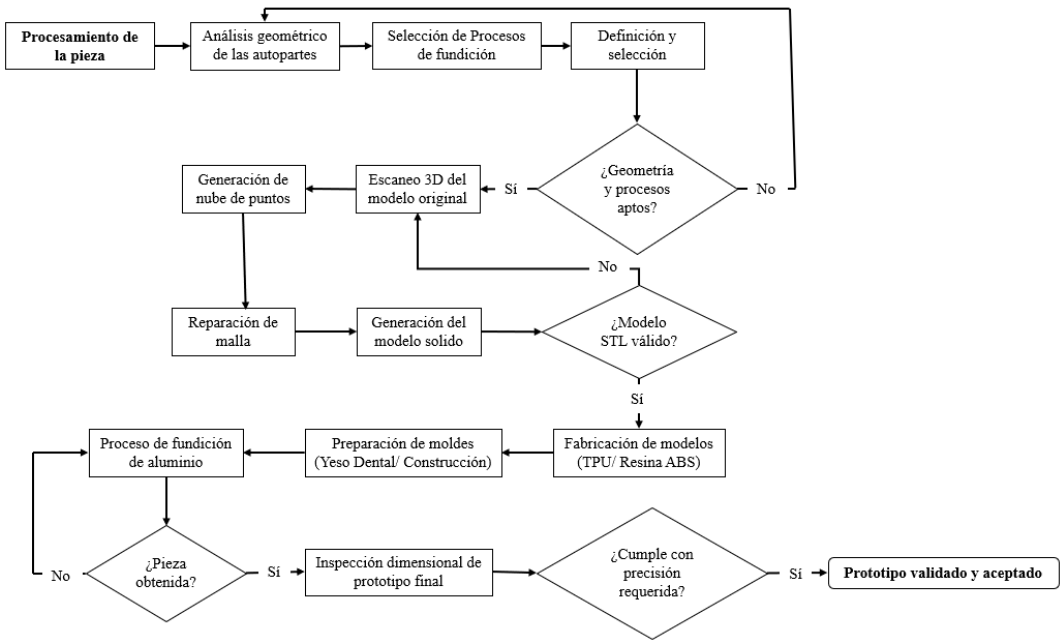


3.4 Metodología

3.4.1 Selección de componentes

En base al estudio [56] la biela y la tapa de motor de motocicleta son componentes comúnmente utilizado en la industria automotriz[57], son ideales para validar metodologías de manufactura, mas no se eligieron por su funcionalidad. Sus geometrías permiten analizar los fenómenos que se puede generar durante su fabricación como gradientes térmicos o defectos internos.

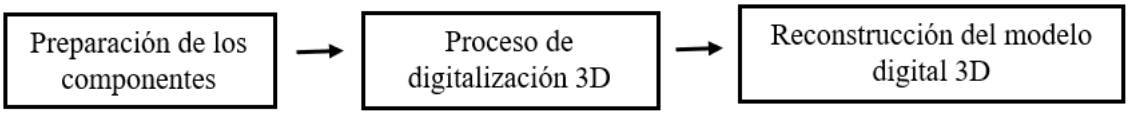
Figura 26. *Flujograma de la metodología*



3.4.2 Proceso de digitalización

En la *Figura 27* se explica el proceso de digitalización 3D, este procedimiento ayudar a obtener un buen resultado en la captura de las geometrías.

Figura 27. *Proceso de digitalización*



3.4.2.1 Preparación de los componentes a digitalizar

Previamente a la digitalización se realiza una limpieza superficial del componente, se retira polvo o contaminantes que afecten en la captura de datos. El escáner MIRACO PRO trabaja con tecnología de luz estructurada infrarroja, la cual obtiene mejores resultados en superficies no brillantes, ni oscuras. Es fundamental aplicar talco industrial en el componente, ya que disminuye el brillo superficial e incrementa la detectabilidad en zonas oscuras. El objeto debe estar fijado, la estabilidad evita movimientos durante la captura de datos. Además, la distancia del escáner y el componente es indispensable, ya que perjudica en el proceso de captura de nube de puntos.

3.4.2.2 Proceso de digitalización 3D

Se realiza la captura de los datos geométricos de los componentes: la biela en la *Figura 28* y la cubierta lateral de motor de motocicleta *Figura 29,* este proceso se realiza con el parámetro *far* activado, para capturar todas las zonas de los componentes, con un mejor detalle y menos ruidos en la malla. Posteriormente se genera una nube de puntos que representa la superficie del objeto.

Figura 28. Escaneo Biela

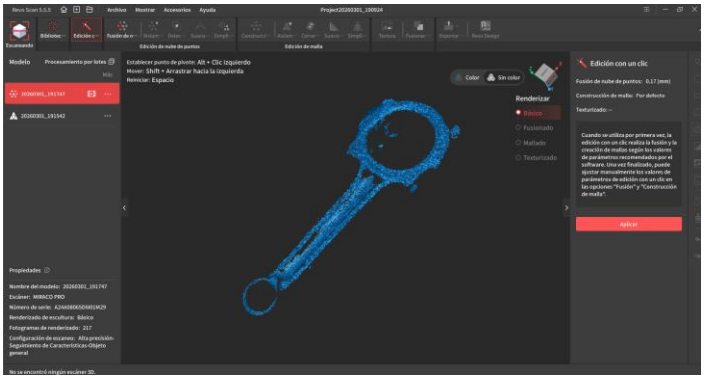
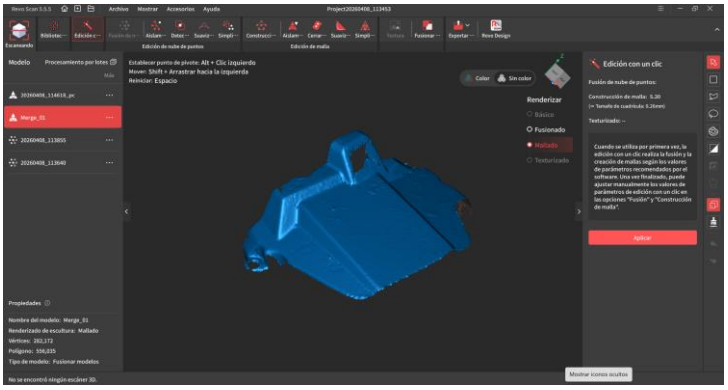


Figura 29. *Escaneo cubierta lateral de motor de motocicleta*



3.4.2.3 Proceso de reconstrucción del modelo digital 3D

Posteriormente a la digitalización del componente se depura la información geométrica, corrigiendo inconsistencias en los datos. La reconstrucción de superficie se realizó en el software Meshmixer como indica la *Figura 30* y *Figura 31*, se realizó un cierre de huecos y corrección de discontinuidades. Una vez que el modelo este totalmente cerrado se exporta a formato STL.

Figura 30. *Malla reparada de la biela*

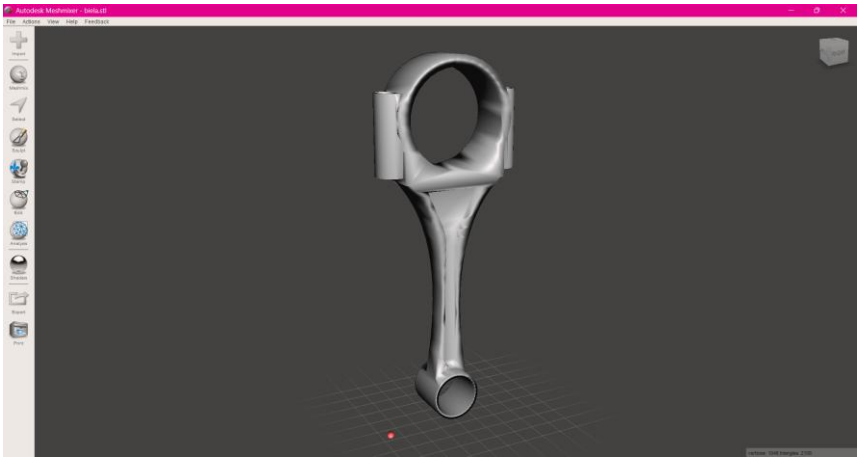
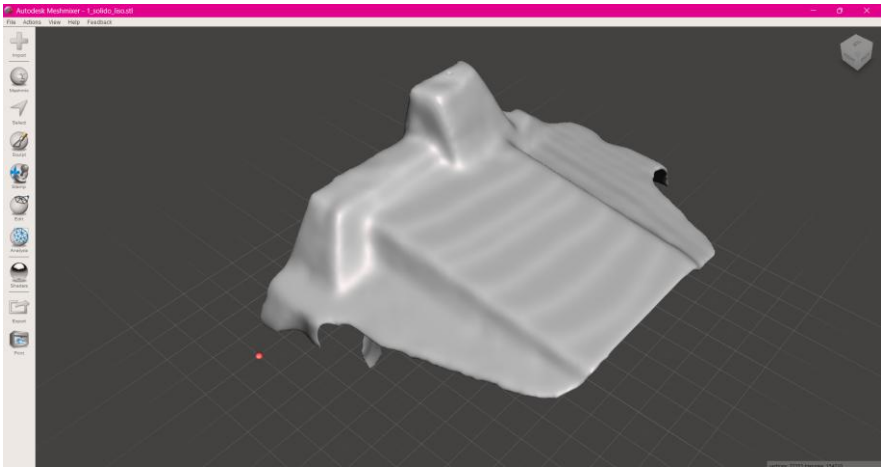


Figura 31. *Malla reparada de la cubierta lateral de motor de motocicleta*



3.4.3 Fabricación Aditiva

3.4.3.1 FDM

Se realizó una simulación en el software OrcaSlicer lo que se muestra en la *Figura 32* y *Figura 33*, con un modelo negativo de los STL generados de la digitalización de los componentes, se mantuvieron las configuraciones predeterminadas para la impresión.

Figura 32. *Modelo digital FDM del molde*

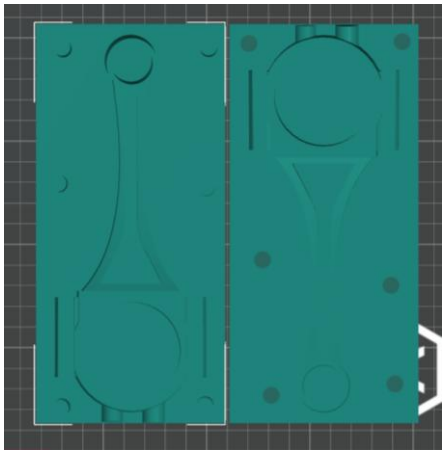
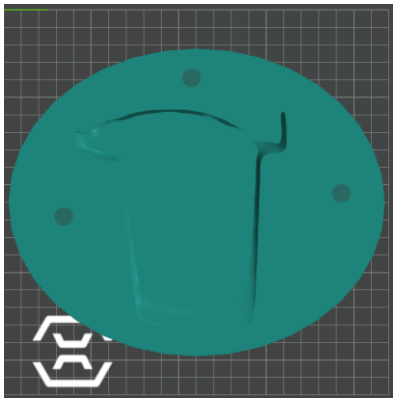


Figura 33. *Modelo digital FDM del molde de la cubierta lateral de motor de motocicleta*



3.4.3.2 SLA

Las simulaciones de los modelos positivos de la biela mostrado en la *Figura 34* y de la cubierta lateral de motor de motocicleta en la *Figura 35* fueron procesados y laminados en el software Anycubic Photon Workshop, con la generación de soportes automáticos activados para una mejor calidad de impresión. Se especificó el uso de la impresora Photon Mono X 6K y la resina ABS.

Figura 34. *Modelo positivo digital SLA de la biela*

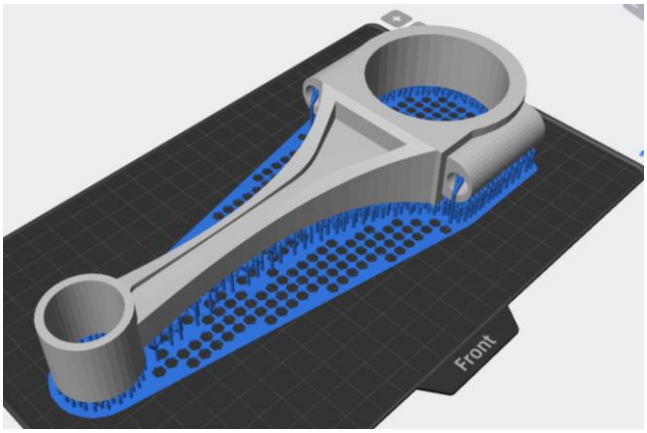
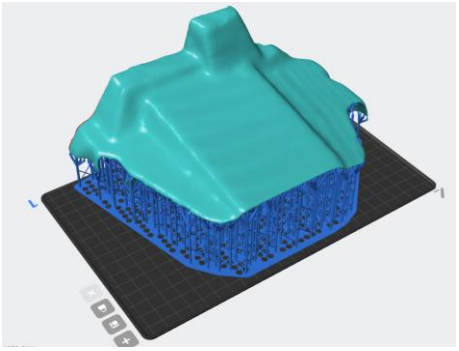


Figura 35. *Modelo positivo digital SLA de la cubierta lateral de motor de motocicleta*



3.4.4 Producción de moldes en caucho silicón

Los modelos negativos de las piezas se obtuvieron aplicando caucho de silicón sobre los modelos positivos de la impresión 3D en resina, lo que se puede observar en la *Figura 36* y *Figura 37*. Este proceso tiene como finalidad la obtención de los modelos positivos en cera.

Figura 36. *Molde de silicón de la biela.*



Figura 37*.Molde de silicón de la cubierta lateral de motor de motocicleta*



3.4.5 Elaboración de los moldes en yeso

Se preparó una mezcla de yeso dental, sulfato de calcio semihidratado (yeso de construcción) y agua, la cual fue vertida en un molde de cartón, ubicando la pieza de cera en la parte central para permitir la conformación del molde. Posteriormente, se dejó fraguar el yeso como se muestra en la *Figura 38* y, una vez endurecido, el molde fue sometido a secado en el horno de tratamiento térmico.

Figura 38. *Moldes en yeso*



3.4.6 Fundición de aluminio

El aluminio fundido en el crisol fue vertido a través de los bebederos, permitiendo llenar de manera gradual los moldes de yeso lo que se puede observar en la *Figura 39.* Posteriormente, se dejó enfriar el aluminio dentro de los moldes hasta que alcanzara su completa solidificación. Una vez finalizado este proceso, se procedió a romper el molde de yeso de forma controlada para extraer las piezas obtenidas. De esta manera, fue posible desmoldar las autopartes fundidas y verificar el resultado del proceso de fabricación.

Figura 39. *Fundición de aluminio en moldes de yeso*



3.4.7 Análisis comparativo

Se realiza un análisis comparativo entre las piezas originales y las piezas obtenidas a través de todo el proceso de fabricación aplicado. Esta comparación permite evaluar el nivel de precisión alcanzado, desde la digitalización, la impresión 3D, la elaboración de los moldes de caucho silicón y el proceso final de fundición.

Mediante este análisis se pueden identificar semejanzas y posibles variaciones en aspectos dimensionales, geométricos y superficiales de las piezas producidas con respecto al modelo original. De esta manera, se verifica si los procedimientos empleados permitieron obtener réplicas de las piezas, además de determinar la efectividad de las técnicas utilizadas durante todo el desarrollo del prototipo.

3.4.8 Determinación del área transversal del bebedero y la velocidad de llenado

Para caracterizar el comportamiento del aluminio durante el proceso de llenado del molde, se determinó de manera aproximada la velocidad de flujo a partir del volumen de las piezas y del tiempo empleado durante la colada.

Tabla 10. *Parámetros de cálculo del flujo del aluminio fundido para la biela y la cubierta lateral*

Parámetro	Biela	Cubierta
Volumen	50 192,6 mm³	54 428,2 mm³
Tiempo de llenado	21 s	26 s
Diámetro del bebedero	5 mm	5 mm
Temperatura estimada	750 °C	750 °C
Densidad	2363,47 kg/m³	2363,47 kg/m³
Viscosidad	$1{,}0837\times10^{-3}$ Pa·s	$1{,}0837\times10^{-3}$ Pa·s

3.4.8.1 Cálculo del área transversal del bebedero

Ecuación 1. *Área transversal*

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

A = área transversal del bebedero (m^2).

D= diámetro del bebedero (m).

π= constante matemática, aproximadamente 3,1416.

$$A = \frac{\pi(0{,}005)^2}{4}$$

$$A = 1{,}9635 \times 10^{-5}\, m^2$$

3.4.8.2 Cálculo de la velocidad de llenado

La velocidad de llenado se calculó mediante la relación entre el caudal volumétrico y el área transversal del bebedero, utilizando la ecuación:

Ecuación 2. *Velocidad de llenado*

$$v = \frac{V}{At}$$

v = velocidad de flujo del aluminio fundido (m/s).

V= caudal volumétrico del aluminio fundido (m^3/s).

At= área transversal del bebedero (m^2).

3.4.8.2.1 Biela

$$v = \frac{50192{,}6 \times 10^{-9}}{(1{,}9635 \times 10^{-5})(21)}$$

$$v = 0{,}1218\, m/s$$

3.4.8.2.2 Cubierta

$$v = \frac{54428{,}2 \times 10^{-9}}{(1{,}9635 \times 10^{-5})(26)}$$

$$v = 0{,}1067\ m/s$$

3.4.9 Cálculo del número de Reynolds del aluminio fundido

Con el propósito de caracterizar el comportamiento del aluminio fundido durante el llenado de los moldes, se empleó el número de Reynolds, parámetro adimensional utilizado para relacionar los efectos de las fuerzas inerciales y viscosas presentes en el flujo.

Ecuación 3. *Número de Reynolds*

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Re= número de Reynolds (adimensional).

ρ= densidad del aluminio fundido (kg/m^3).

v= velocidad de flujo del aluminio fundido (m/s).

D= diámetro característico del bebedero (m).

μ= viscosidad dinámica del aluminio fundido $(Pa \cdot s)$.

3.4.9.1 Biela

$$Re = \frac{(2363{,}47)(0{,}1218)(0{,}005)}{1{,}0837 \times 10^{-3}}$$

$$Re = 1328$$

3.4.9.2 Cubierta lateral de motocicleta

$$Re = \frac{(2363{,}47)(0{,}1067)(0{,}005)}{1{,}0837 \times 10^{-3}}$$

$$Re = 1163$$

A partir de los parámetros establecidos, se obtuvo un número de Reynolds aproximado de 1328 para la biela y de 1163 para la cubierta lateral de motocicleta. Los valores obtenidos permiten caracterizar las condiciones de flujo consideradas durante el llenado y establecer una referencia para el análisis del comportamiento del metal fundido dentro del sistema de alimentación.

3.4.10 Factores de corrección dimensional de la pieza digitalizada, patrón de cera y pieza fundida

Para obtener los factores de corrección en cada etapa del proceso, se compararon las dimensiones de la pieza original con las en la digitalización, el patrón de cera y la pieza fundida. El factor de corrección se calculó mediante la relación entre la dimensión original y la dimensión obtenida en cada etapa. Debido a que las diferentes características geométricas presentan variaciones dimensionales distintas, se empleó la mediana de los factores obtenidos para determinar un factor representativo de cada etapa.

Ecuación 4. *Factor de corrección dimensional experimental*

$$Fc = \frac{D_{original}}{D_{etapa}}$$

Ecuación 5. *Factor de corrección digitalizada*

$$F_{digital} = \frac{D_{original}}{D_{digitalizada}}$$

Ecuación 6. *Factor de corrección de cera*

$$F_{cera} = \frac{D_{original}}{D_{cera}}$$

Ecuación 7. *Factor de corrección fundida*

$$F_{fundida} = \frac{D_{original}}{D_{fundida}}$$

3.4.10.1 Factores de corrección dimensional de la biela

Tabla 11. *Factores de corrección dimensional de la biela en las diferentes etapas del proceso*

Parámetro	Original	Digitalizada	F. digital	Cera	F. cera	Fundida	F. fundida
A	69,6	69,5	**1,0014**	71	**0,9803**	69	**1,0087**
B	47	47	**1,0000**	46	**1,0217**	46,6	**1,0086**
C	60,4	60	**1,0067**	60	**1,0067**	60	**1,0067**
D	16	16	**1,0000**	16	**1,0000**	16	**1,0000**
E	17,8	17,6	**1,0114**	16,8	**1,0595**	17	**1,0471**
F	19,7	19,5	**1,0103**	20	**0,9850**	17	**1,1588**
G	25	25,2	**0,9921**	23,5	**1,0638**	24,9	**1,0040**
H	22	22	**1,0000**	24	**0,9167**	23,5	**0,9362**
I	11	11	**1,0000**	14	**0,7857**	11,5	**0,9565**
J	28,2	28,1	**1,0036**	30	**0,9400**	27,9	**1,0108**
K	22	22,1	**0,9955**	25	**0,8800**	23	**0,9565**

Tabla 12. *Factores de corrección dimensional representativos de la biela*

Etapa	Factor de corrección representativo
Digitalizada	1,0000
Cera	0,9850
Fundida	1,0067

3.4.10.2 Factores de corrección dimensional de la cubierta lateral de motocicleta

Tabla 13. *Factores de corrección dimensional de la cubierta lateral de motocicleta en las diferentes etapas del proceso*

Parámetro	Original	Digitalizada	F. digital	Cera	F. cera	Fundida	F. fundida
A	108,7	108,5	**1,0018**	105,7	**1,0284**	107,7	**1,0093**
B	3,6	3,6	**1,0000**	4,6	**0,7826**	5,2	**0,6923**
C	50	49,9	**1,0020**	51,4	**0,9728**	52,9	**0,9452**
D	89	89,1	**0,9989**	88	**1,0114**	87,4	**1,0183**
E	55,6	55,5	**1,0018**	59	**0,9424**	57	**0,9754**
F	68,3	68,1	**1,0029**	75	**0,9107**	70	**0,9757**
G	153	153	**1,0000**	154,6	**0,9897**	151	**1,0132**
H	44	44,1	**0,9977**	42,7	**1,0304**	40	**1,1000**
I	42	42	**1,0000**	45,5	**0,9231**	40	**1,0500**

Tabla 14. *Factores de corrección dimensional representativos de la cubierta lateral de motocicleta*

Etapa	Factor de corrección representativo
Digitalizada	1,0000
Cera	0,9728
Fundida	1,0093

Para corregir la dimensión en cada etapa se debe aplicar la siguiente fórmula:

Ecuación 8. *Cálculo de la dimensión corregida mediante el factor de corrección*

$$D_{etapa} = D_{original}\ x\ F_c$$

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados alcanzados se organizan conforme a los objetivos establecidos, iniciando con la selección de las piezas automotrices y continuando con las diferentes fases requeridas para su producción. Además, se realizó una comparación entre las piezas originales y las piezas obtenidas mediante los procesos aplicados, con la finalidad de determinar su nivel de precisión. Este análisis valorar la utilidad de las técnicas utilizadas en el proceso de fabricación automotriz.

4.1 Componentes seleccionados

La *Figura 40* muestra la biela que fue seleccionada principalmente por su geometría, ya que presenta una forma más sencilla y definida en comparación con otras piezas automotrices de mayor complejidad. Su elección no respondió a su función, sino a que su geometría facilita su reproducción durante las etapas de modelado, moldeo y fundición. Sus dimensiones permiten trabajar de manera más controlada el proceso de fabricación, convirtiéndola en una pieza adecuada para evaluar la funcionalidad de la metodología propuesta.

Figura 40. *Biela*



En la cubierta lateral de motor de motocicleta también fue elegida por su geometría relativamente simple. Esta característica permite un mejor manejo durante la elaboración de moldes y en el proceso de colado del aluminio, reduciendo dificultades técnicas y favoreciendo la obtención de una pieza más cercana al modelo original.

Figura 41. *Cubierta lateral de motor de motocicleta*



4.2 Digitalización de los componentes

4.2.1 Preparación de las piezas

La Figura *42* muestra la biela cubierta con talco antes de iniciar el proceso de digitalización. La aplicación de este material permite que el escáner registre con mayor precisión la geometría del componente, especialmente en zonas curvas o con superficies que pueden dificultar la captura.

Figura 42. *Biela con talco*



En la *Figura 43* se observa la cubierta lateral de la motocicleta preparada para la digitalización 3D. Para ello, se aplicó una capa uniforme de talco sobre toda la superficie, con el propósito de mejorar la detección de los detalles geométricos y obtener un escaneo más preciso.

Figura 43. *Cubierta lateral de motor de motocicleta con talco*



4.2.2 Propiedades y configuraciones del escaneo

Para la digitalización de los componentes se utilizaron distintas propiedades y configuraciones de escaneo, lo que se muestra en la *Tabla 15* y *Tabla 16,* ajustadas según la geometría de cada pieza, con el fin de obtener modelos digitales más precisos y detallados.

Tabla 15. *Propiedades de escaneo de la biela*

Renderizado de escultura	Mallado
Vértices	100,686
Polígono	190,511
Configuración de escaneo	Alta precisión-Seguimiento de Características-Objeto general

Tabla 16. *Propiedades de escaneo de la cubierta lateral de motor de motocicleta*

Renderizado de escultura	Mallado
Vértices	282,172
Polígono	556,035
Tipo de modelo	Fusionar modelos

En la se muestra el modelo final de la biela y en la FIG se muestra el resultado final del escaneo, ambas piezas con la malla corregida, quedando así un archivo digital en STL para cada autoparte. Este archivo permite que se intervenga en geometría de la figura en cualquier software, ya sea CAD o laminador.

Figura 44. *Modelo final de la biela*

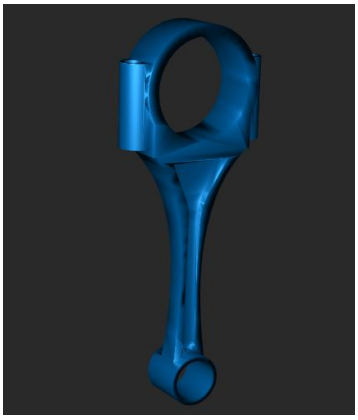
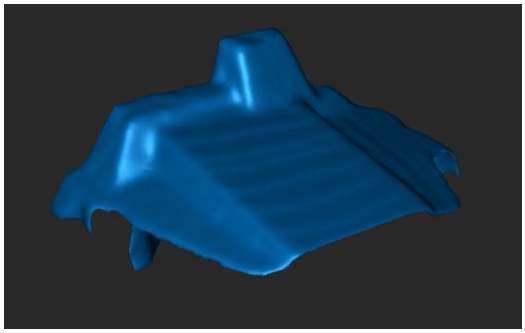


Figura 45. *Modelo final de la cubierta lateral de motor de motocicleta*

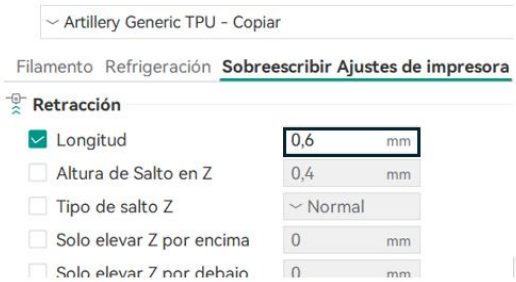


4.3 Fabricación aditiva

4.3.1 FDM

La fabricación aditiva del negativo de ambas piezas se empleó la tecnología FDM, se mantuvo la configuración predeterminada por el laminador, sin embargo, se cambió la retracción. En la *Figura 46* se observan algunos de los ajustes realizados durante el proceso, los cuales permitieron obtener una impresión óptima.

Figura 46. *Configuración de TPU*



Por otro lado, la *Tabla 17* presenta un resumen de los datos totales de impresión del negativo de la biela. En ella se observa que se requirió un total de 190,15 g de filamento y un tiempo estimado de impresión de 13 horas con 52 minutos, sin necesidad de emplear soportes. La

Figura 47 muestra el resultado, lo que evidencia que la pieza pudo ser fabricada de forma estable.

Tabla 17. *Resumen de impresión del modelo negativo de la biela*

	Estimación total
Filamento total	190,15 g
Tiempo total	13h52m
Soportes	Sin soportes

Figura 47. *Modelo negativo de la biela en TPU*



La *Tabla 18* muestra el resumen de impresión del negativo de la cubierta lateral de motor de motocicleta. Debido al tamaño de la pieza, fue necesario considerar una mayor cantidad de material y tiempo de impresión. Asimismo, se requirió el uso de soportes tipo árbol, los cuales facilitaron la correcta fabricación de las zonas con voladizos o superficies que necesitaban apoyo durante el proceso. La *Figura 48* muestra el resultado del modelo negativo de la pieza.

Tabla 18. *Resumen de impresión del modelo negativo de la cubierta lateral de motor de motocicleta*

	Estimación total
Filamento total	345,81 g
Tiempo total	1d6h21m
Soportes	Tipo Árbol

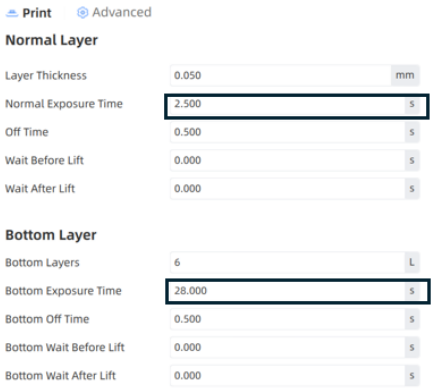
Figura 48. *Modelo negativo de la cubierta lateral de motor de motocicleta en TPU*



4.3.2 SLA

Para la fabricación en SLA para ambas piezas se modificaron los parámetros de impresión para una resina tipo ABS-like, con el propósito de obtener piezas con buen nivel de detalle y propiedades adecuadas para las etapas posteriores del proceso. En la *Figura 49* se observan los ajustes configurados, entre ellos el tiempo de exposición normal de 2,500 s y un tiempo de exposición de capas base de 28,000 s. Estos valores permitieron controlar la formación de cada capa y favorecer una correcta adhesión inicial al proceso de impresión.

Figura 49. *Configuración de la resina ABS like*



La *Tabla 19* presenta el resumen de impresión del modelo positivo de la biela fabricado mediante tecnología SLA. La

Figura ***50*** muestra el resultado final, esto conseguido en un tiempo total de impresión de 2 h 11 min 29 s, con un consumo de 69,185 ml de resina y el uso de soportes delgados. Estos valores reflejan que fue posible obtener una pieza con un buen nivel de detalle y precisión geométrica en un tiempo reducido.

Tabla 19. *Resumen de impresión del modelo positivo de la biela*

	Estimación total
Tiempo total	2h11m29s
Volumen de resina	69,185 ml
Soportes	Delgados

Figura 50. *Modelo positivo de la biela en resina*



La *Tabla 20* muestra el resumen de impresión del modelo positivo de la cubierta lateral y la *Figura 51* el resultado de la impresión de motor de motocicleta realizado mediante tecnología SLA. En este caso, la impresión requirió un tiempo total de 9 h 0 min 58 s, un volumen de resina de 40,615 ml y el empleo de soportes delgados. Aunque el consumo de material fue menor, el mayor tiempo de impresión puede asociarse a la configuración geométrica, la orientación de la pieza y su altura durante el proceso.

Tabla 20. *Resumen de impresión del modelo positivo de la cubierta lateral de motor de motocicleta*

	Estimación total
Tiempo total	9h0m58s
Volumen de resina	40,615 ml
Soportes	Delgados

Figura 51. *Modelo positivo de la cubierta lateral de motor de motocicleta en resina*



4.4 Fabricación de moldes de caucho silicón

La elaboración de los moldes de caucho silicón se realizaron a partir de los modelos positivos en resina ABS de ambas piezas. En la

*Figura **52*** se muestra la mezcla de caucho silicón con 100 gramos del componente A: Caucho de silicón y 3 gramos del componente B: Catalizador, tomando encuentra previamente el peso de los recipientes.

Figura 52. *Medición del componente A) Caucho silicón y componente B) Catalizador*



Una vez lista la mezcla, esta fue vertida sobre el modelo de las impresiones de las autopartes. Se dejó curar el molde durante 4 horas hasta su solidificación. En la *Figura 53* y *Figura 54* se observa el resultado del caucho silicón con una consistencia adecuada, se procedió al desmoldeo, obteniendo un molde flexible con precisión geométrica del modelo original.

Figura 53. *Molde final de la biela en caucho silicón*



Figura 54. *Molde final de la cubierta lateral de motor de motocicleta en caucho silicón*



4.5 Elaboración de piezas en cera

4.5.1 Piezas en cera odontológica

La cera odontológica fue seleccionada por buena capacidad de reproducir detalles y por su fácil manipulación durante el proceso. No obstante, este material presenta limitaciones, ya que se deformarse con rapidez ante la presencia de calor y es altamente frágil. En la *Figura 55* muestra que al usar el molde fabricado en TPU las piezas se fracturaron por completo durante el desmoldeo, lo que impidió extraerlas de manera adecuada.

Figura 55. *Falla en el desmoldeo de piezas de cera odontológica*



4.5.2 Piezas en cera microcristalina y parafina

Se realizó una mezcla compuesta por 20 % de cera microcristalina y 80 % de parafina, priorizando una mayor proporción de parafina con el fin de obtener un modelo con mayor resistencia durante el desmoldeo. Una vez fundidos ambas ceras y lograda una mezcla homogénea, esta fue vertida en el molde para permitir la formación de la pieza. Posteriormente, se dejó enfriar hasta su completa solidificación y se procedió al desmoldeo del modelo. Sin embargo, a pesar de la proporción utilizada, la pieza obtenida presentó una alta fragilidad, en la *Figura 56* se muestra la fractura de las piezas durante su extracción del molde.

Figura 56. *Falla en el desmoldeo de piezas de cera microcristalina y parafina*



4.5.3 Piezas en cera de uso cosmético

El uso de cera cosmética se aplicó para reproducir los detalles geométricos y mantener la estabilidad dimensional de las piezas obtenidas. En primer lugar, la cera fue fundida y posteriormente vertida en el molde, permitiendo el llenado de la cavidad. Una vez completado el proceso de enfriamiento y solidificación, se procedió al desmoldeo de las piezas fabricadas. Los resultados presentados en la *Figura 57* y *Figura 58*mostraron que este material proporcionó una buena resistencia durante la extracción, además de permitir la obtención de piezas con un acabado geométrico favorable.

Figura 57. *Modelo en cera cosmética de la biela*



Figura 58. *Modelo en cera cosmética de la cubierta lateral del motor de una motocicleta*



4.6 Fabricación de moldes en yeso

4.6.1 Preparación de la mezcla de yesos

En la *Figura 59* se muestra la preparación de la mezcla para el molde en yeso compuesta por 700 g de yeso de construcción, 300 g de yeso odontológico tipo IV y 500 ml de agua. Se empleó una mayor proporción de yeso de construcción con el propósito de proporcionar al molde una mayor resistencia frente a las altas temperaturas a las que sería sometido durante el proceso. Por su parte, el yeso odontológico tipo IV se incorporó para mejorar la reproducción de las geometrías y los detalles superficiales de las piezas, favoreciendo así una mayor fidelidad en el molde obtenido.

Figura 59. *Mezcla para la fabricación de moldes en yeso*



4.6.2 Secado y acondicionamiento térmico del molde

En la *Figura 60* se muestra el secado del molde, se preparó el horno térmico, procurando que la temperatura se incrementara de manera gradual y controlada. Este procedimiento fue necesario para evitar un choque térmico que pudiera provocar fisuras o el quiebre del molde durante el proceso de calentamiento.

Figura 60. *Preparación del horno térmico*



4.6.3 Vaciado y fraguado del molde

Una vez que está cubierto el modelo de cera con el yeso, se deja en fraguado y endurecimiento. En la *Figura 61* se observa el calentamiento progresivo del molde, hasta la fusión de la cera, para que la cera salga y no queden residuos dentro del molde.

Figura 61. *Vaciado y fraguado de los moldes*



4.7 Piezas obtenidas mediante fundición de aluminio

Después de aplicar todo el proceso, finalmente se obtuvieron las piezas mediante fundición de aluminio en moldes de yeso, utilizando el proceso de cera perdida. Esta etapa permitió materializar la geometría trabajada en las fases previas de reproducción, moldeo y preparación del molde. Sin embargo, en la *Figura 62* y *Figura 63* se muestran los primeros intentos de fundición que presentaron fallas en las geometrías obtenidas.

Figura 62. *Biela fundida fallida*



Figura 63. *Cubierta lateral del motor de motocicleta fundida fallida*



En la *Figura 64* y la *Figura 65* se muestran las piezas finales obtenidas, en las cuales se aprecia una geometría más completa y definida. Estos resultados evidencian que, después de los ajustes realizados durante el proceso, fue posible reproducir de mejor manera la forma general de los componentes. Para lograrlo, se modificaron los bebederos del molde, incorporando un mayor número de entradas y aumentando su tamaño. Esta modificación permitió mejorar el flujo del aluminio fundido hacia el interior del molde y reducir las fallas observadas en los primeros intentos.

Figura 64. *Biela fundida elaborada*



Figura 65. *Cubierta lateral del motor de motocicleta fundida elaborada*



4.8 Análisis comparativo de la pieza original y pieza fundida

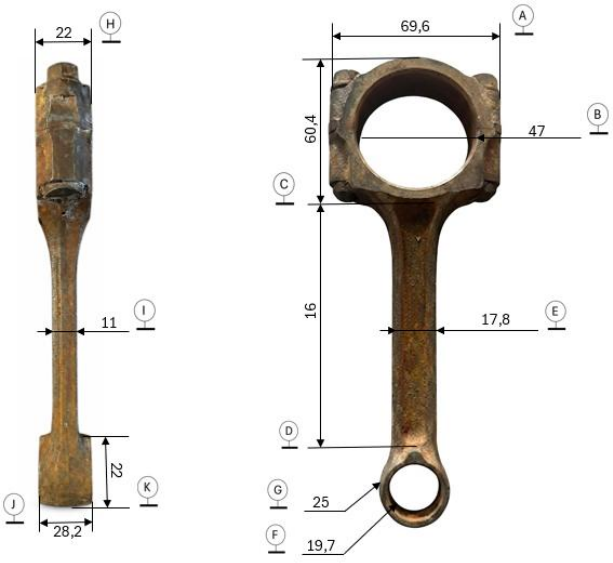
Después de la fabricación de las piezas se realizó una comparación dimensional y geométrica, tomando en cuenta la variación de medidas, diferencias en el acabado superficial. Verificando la similitud con su modelo original y defectos del su proceso de fabricación.

4.8.1 Análisis comparativo de la biela

4.8.1.1 Medición de la biela original

La medición de la pieza original de la biela como se muestra en la *Figura 66*, sirve como referencia dimensional para comparar las demás etapas del proceso y verificar su similitud.

Figura 66. *Acotación dimensional de la biela original*



Los valores de la *Tabla 21* fueron considerados como base, para identificar posibles variaciones en las piezas en todo el proceso de fabricación.

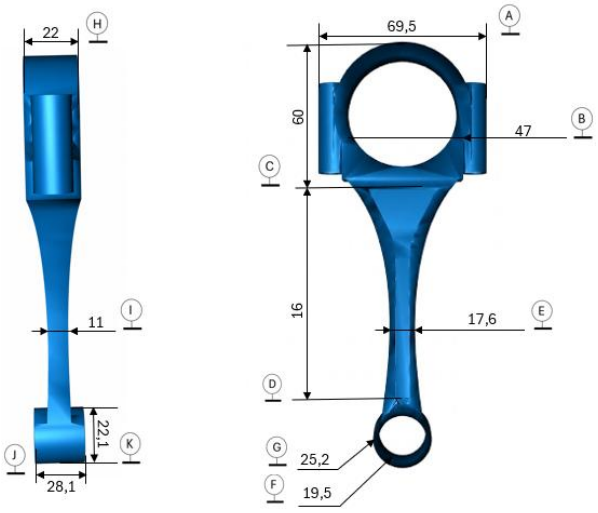
Tabla 21. *Medidas dimensionales de la biela original*

Parámetro	Parte	Medida (mm)
A	Ancho máximo de la cabeza	69,6
B	Diámetro interno de la cabeza	47
C	Alto máximo de la cabeza	60,4
D	Cuerpo o vástago	16
E	Ancho del cuerpo	17,8
F	Diámetro interno del pie	19,7
G	Diámetro externo del pie	25
H	Ancho de la cabeza	22
I	Ancho del cuerpo	11
J	Ancho del pie	28,2
K	Altura del pie	22

4.8.1.2 Medición de la biela digitalizada

En la *Figura 67* se muestra la medición de la pieza digitalizada. A partir de estas mediciones dimensionales de la digitalización es posible la comparación con la pieza original.

Figura 67. *Acotación dimensional de la biela digitalizada*



La *Tabla 22* presenta las medidas obtenidas y las diferencias con respecto a la pieza original. Las variaciones fueron mínimas, lo que indica que el proceso de escaneo 3D logró reproducir de manera adecuada la geometría y dimensión de la pieza.

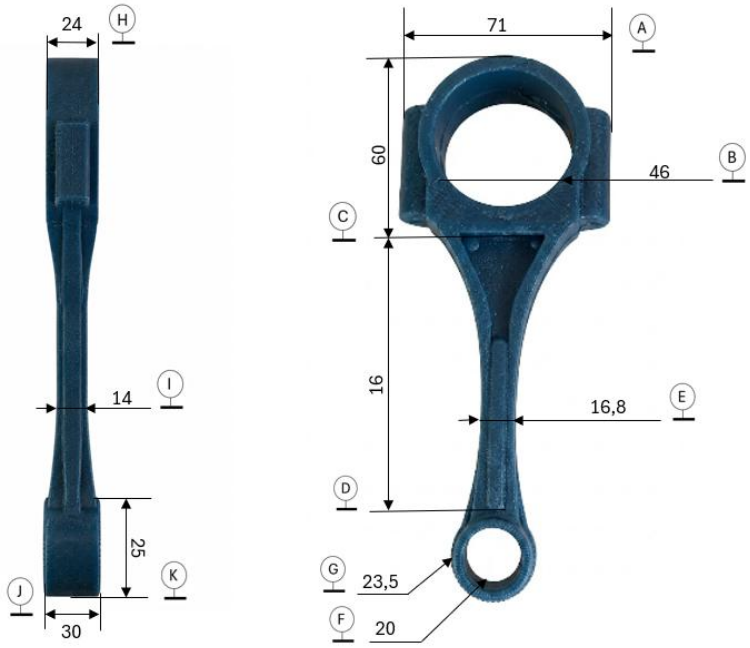
Tabla 22. *Medidas dimensionales de la biela digitalizada y variación respecto a la pieza original*

Parámetro	Medida (mm)	Diferencia (mm)	Error porcentual (%)
A	69,5	0,1	0,14%
B	47	0	0,00%
C	60	0,4	0.66%
D	16	0	0,00%
E	17,6	0,2	1,12%
F	19,5	0,2	1,02%
G	25,2	0,2	0,80%
H	22	0	0,00%
I	11	0	0,00%
J	28,1	0,1	0,35%
K	22,1	0,1	0,45%

4.8.1.3 Medición de la biela en cera

La *Figura 68* muestra las mediciones de la pieza en cera, obtenida del modelo digitalizado. Esta pieza permite verificar visualmente a geometría de la pieza previamente a la fundición.

Figura 68. *Acotación dimensional de la biela en cera*



En la *Tabla 23* presenta las medidas obtenidas de la pieza en cera. Se evidencia mayores diferencias dimensionales en comparación con la pieza digitalizada, principalmente en algunos parámetros específicos como el I y K. Estas variaciones pueden deberse con la manipulación del material, la contracción, deformaciones leves o irregularidades generadas durante la reproducción del modelo.

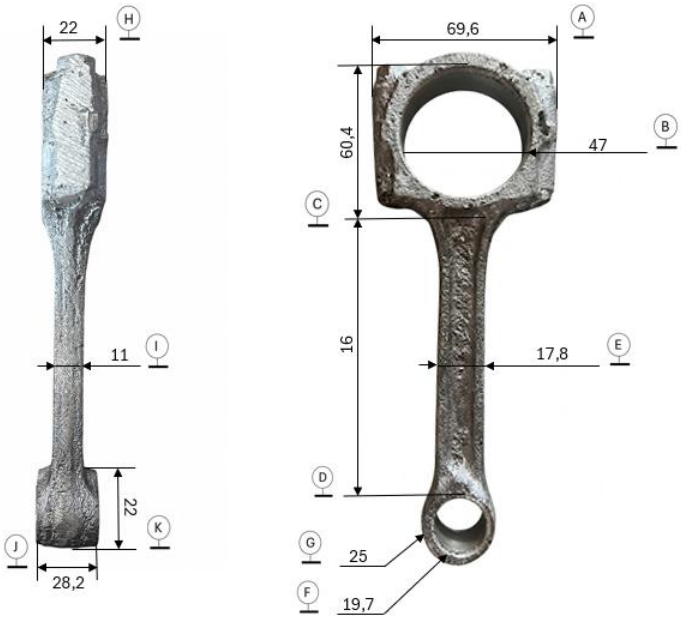
Tabla 23.*Medidas dimensionales de la biela en cera y variación respecto a la pieza original*

Parámetro	Medida (mm)	Diferencia (mm)	Error porcentual (%)
A	71	1,4	2,01%
B	46	1	2,13%
C	60	0,4	0,66%
D	16	0	0,00%
E	16,8	1	5,62%
F	20	0,3	1,52%
G	23,5	1,5	6,00%
H	24	2	9,09%
I	14	3	27,27%
J	30	1,8	6,38%
K	25	3	13,64%

4.8.1.4 Medición de la biela fundida

En la etapa final de la reproducción de la pieza se realizó la medición de la biela obtenida mediante el proceso de fundición de aluminio, lo que se muestra en la *Figura 69*, lo cual permite evaluar el resultado final del proceso de fabricación.

Figura 69. Acotación de la biela fundida



La *Tabla 24* presenta las variaciones de los parámetros, indica una reproducción similar a la pieza original. Sin embargo, se observa una mayor diferencia en el parámetro F, con un error porcentual de 13,71%, lo cual puede estar relacionado con contracción del material durante el enfriamiento, irregularidades del molde o ajustes posteriores al proceso de fundición.

Tabla 24. *Medidas dimensionales de la biela fundida y variación respecto a la pieza original*

Parámetro	Medida (mm)	Diferencia (mm)	Error porcentual (%)
A	69	0,6	0,86%
B	46,6	0,4	0,85%
C	60	0,4	0,66%
D	16	0	0,00%
E	17	0,8	4,49%
F	17	2,7	13,71%
G	24,9	0,1	0,40%
H	23,5	1,5	6,82%
I	11,5	0,5	4,55%
J	27,9	0,3	1,06%
K	23	1	4,55%

4.8.1.5 Comparación de medidas

La *Tabla 25* presenta la comparación de las medidas en las etapas del proceso: pieza original, modelo digitalizado, reproducción en cera y pieza fundida. Para el análisis se tomó como referencia la medida real de la biela original, permitiendo identificar las variaciones dimensionales generadas durante cada fase. Los resultados muestran variaciones mínimas de los parámetros, principalmente en el ancho del cuerpo y la altura del pie. En la pieza fundida se observa que aún existen pequeñas variaciones propias del proceso de fundición, contracción del material y acabado superficial.

Tabla 25. *Comparación dimensional entre la biela original, digitalizada, en cera y fundida*

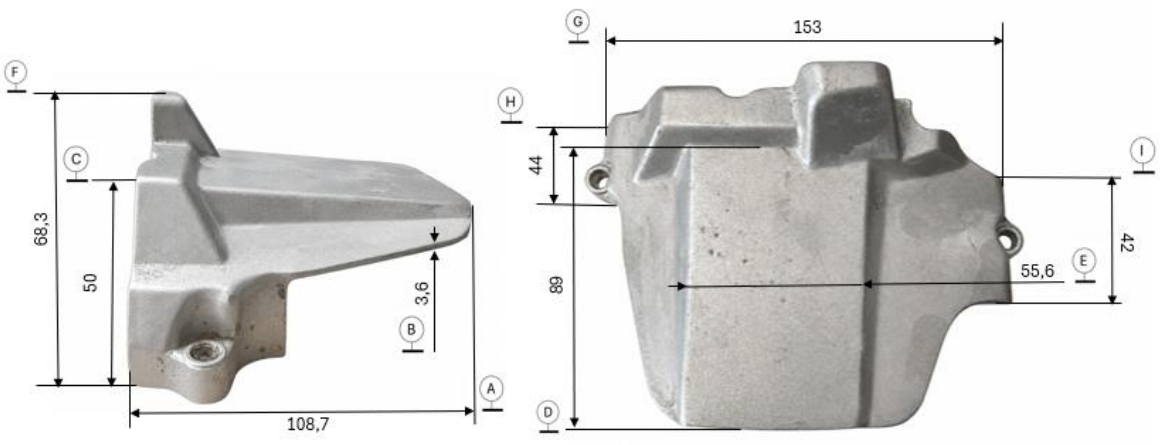
Parámetro	Medidas reales (mm)	Medidas digitalizadas (mm)	Medidas cera (mm)	Medidas fundición (mm)	Diferencia (mm)	Error porcentual (%)
A	69,6	69,5	71	69	1,4	2,01%
B	47	47	46	46,6	1,0	2,13%
C	60,4	60	60	60	0,4	0,66%
D	16	16	16	16	0,0	0,00%
E	17,8	17,6	16,8	17	1,0	5,62%
F	19,7	19,5	20	17	0,3	1,52%
G	25	25,2	23,5	24,9	1,5	6,00%
H	22	22	24	23,5	2,0	9,09%
I	11	11	14	11,5	3,0	27,27%
J	28,2	28,1	30	27,9	1,8	6,38%
K	22	22,1	25	23	3,0	13,64%

4.8.2 Análisis comparativo de la cubierta lateral de motor de motocicleta

4.8.2.1 Medición de la cubierta lateral de motor de motocicleta original

La *Figura 70* muestra la medición de la cubierta lateral de motor de motocicleta original con sus principales cotas dimensionales en vista lateral y frontal. La vista lateral permite identificar medidas como el largo total, el espesor de pared y las alturas de las salientes, mientras que la vista frontal permite observar el ancho total, el largo del plano y los anchos laterales de la pieza. Estas dimensiones fueron tomadas como referencia inicial para comparar las variaciones generadas durante las etapas de digitalización, reproducción en cera y fundición en aluminio.

Figura 70. *Acotación de la cubierta lateral de motocicleta original*



La *Tabla 26* presenta las dimensiones principales de la cubierta lateral de motor de motocicleta original. Estas medidas constituyen la base de comparación para evaluar la precisión dimensional de las piezas obtenidas en las diferentes etapas del proceso.

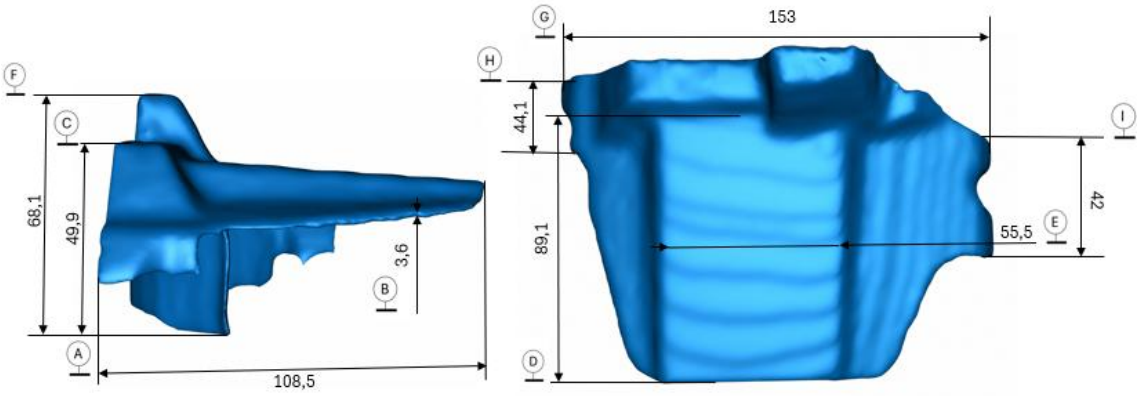
Tabla 26. *Medidas dimensionales de la cubierta lateral de motocicleta original*

Parámetro	Parte	Medida (mm)
A	Largo total	108,7
B	Espesor de pared	3,6
C	Altura saliente uno	50
D	Largo del plano	89
E	Ancho del plano	55,6
F	Altura saliente dos	68,3
G	Ancho total	153
H	Ancho lateral izquierdo	44
I	Ancho lateral derecho	42

4.8.2.2 Medición de la cubierta lateral de motor de motocicleta digitalizada

La *Figura 71* muestra el modelo digitalizado de la cubierta lateral de motor de motocicleta, obtenido mediante el proceso de escaneo 3D.

Figura 71. *Acotación de la cubierta lateral de motocicleta digitalizada*



La *Tabla 27* presenta las medidas obtenidas en el modelo digitalizado de la cubierta lateral de motor de motocicleta, junto con la diferencia y el error porcentual respecto a la pieza original.

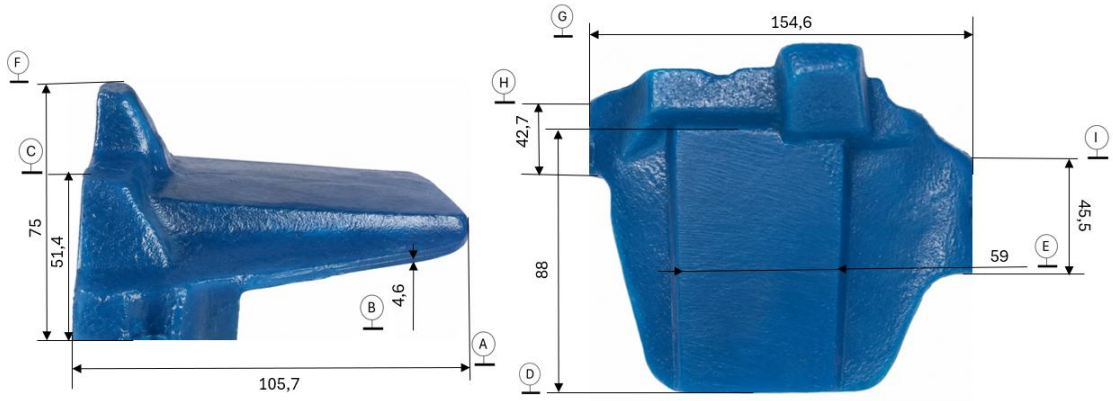
Tabla 27. *Medidas dimensionales de la cubierta lateral de motocicleta digitalizada y variación respecto a la pieza original*

Parámetro	Medida (mm)	Diferencia (mm)	Error porcentual (%)
A	108,5	0,2	0,18%
B	3,6	0,0	0,00%
C	49,9	0,1	0,20%
D	89,1	0,1	0,11%
E	55,5	0,1	0,18%
F	68,1	0,2	0,29%
G	153	0,0	0,0%
H	44,1	0,1	0,23%
I	42	0,0	0,00%

4.8.2.3 Medición de la cubierta lateral de motor de motocicleta en cera

La *Figura 72* muestra la cubierta lateral de motor de motocicleta elaborada en cera, con sus principales cotas dimensionales, esta etapa corresponde a una intermedia del proceso de fabricación, previa a la fundición en aluminio.

Figura 72. *Acotación de la cubierta lateral de motocicleta en cera*



La *Tabla 28* presenta las medidas obtenidas en la cubierta lateral de motor de motocicleta elaborada en cera. Los resultados evidencian que algunos parámetros mantienen variaciones bajas, como D y G, mientras que otros presentan diferencias más notorias, especialmente el parámetro B, con un error porcentual de 27,78%.

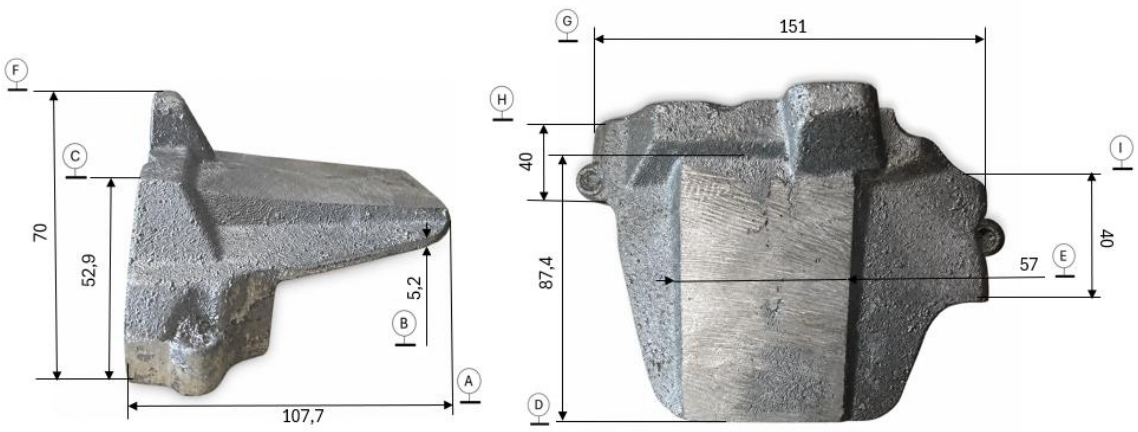
Tabla 28. *Medidas dimensionales de la cubierta lateral de motocicleta en cera y variación respecto a la pieza original*

Parámetro	Medida (mm)	Diferencia (mm)	Error porcentual (%)
A	105,7	3,0	2,76%
B	4,6	1,0	27,78%
C	51,4	1,4	2,80%
D	88	1,0	1,12%
E	59	3,4	6,12%
F	75	6,7	9,81%
G	154,6	1,6	1,05%
H	42,7	1,3	2,95%
I	45,5	3,5	8,33%

4.8.2.4 Medición de la cubierta lateral de motor de motocicleta fundida

La *Figura 73* muestra la cubierta lateral de motor de motocicleta obtenida mediante el proceso de fundición en aluminio. Esta pieza permite evaluar el resultado final del proceso de fabricación, identificando las dimensiones obtenidas después del colado, enfriamiento y desmoldeo.

Figura 73. *Acotación de la cubierta lateral de motocicleta fundida*



Los resultados de la *Tabla 29* muestran que la mayoría de los parámetros presentan variaciones, lo que indica una reproducción admisible de la geometría general del componente. Sin embargo, el parámetro B, correspondiente al espesor de pared, presenta el mayor error porcentual, con 44,44%. Esta variación puede deberse a la acumulación de aluminio durante el llenado del molde, irregularidades internas, o contracción no uniforme.

Tabla 29. *Medidas dimensionales de la cubierta lateral de motocicleta fundida y variación respecto a la pieza original*

Parámetro	Medida (mm)	Diferencia (mm)	Error porcentual (%)
A	107,7	1,0	0,92%
B	5,2	1,6	44,44%
C	52,9	2,9	5,80%
D	87,4	1,6	1,80%
E	57	1,4	2,52%
F	70	1,7	2,49%
G	151	2,0	1,31%
H	40	4,0	9,09%
I	40	2,0	4,76%

4.8.2.5 Comparación de medidas

La *Tabla 30* presenta la comparación de las medidas obtenidas en las diferentes etapas del proceso: pieza original, modelo digitalizado, reproducción en cera y pieza fundida en aluminio. La mayor variación se observa en el parámetro B, debido a que corresponde a un espesor pequeño, por lo que cualquier cambio dimensional genera un error porcentual elevado.

Tabla 30. *Comparación dimensional entre la cubierta lateral original, digitalizada, en cera y fundida*

Parámetro	Medidas reales (mm)	Medidas digitalizadas (mm)	Medidas cera (mm)	Medidas fundición (mm)	Diferencia (mm)	Error porcentual (%)
A	108,7	108,5	105,7	107,7	1,0	0,92%
B	3,6	3,6	4,6	5,2	1,6	44,44%
C	50	49,9	51,4	52,9	2,9	5,80%
D	89	89,1	88	87,4	1,6	1,80%
E	55,6	55,5	59	57	1,4	2,52%
F	68,3	68,1	75	70	1,7	2,49%
G	153	153	154,6	151	2,0	1,31%
H	44	44,1	42,7	40	4,0	9,09%
I	42	42	45,5	40	2,0	4,76%

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La selección de la biela y la cubierta lateral de motor de motocicleta permitió validar la metodología en piezas con diferentes características geométricas. La biela posee una geometría más definida y simétrica, mientras que la cubierta lateral presentó una mayor complejidad por sus superficies irregulares, espesores y salientes. La definición de las piezas permitió evaluar el comportamiento del proceso frente a dos tipos distintos de componentes automotrices.
- La validación mediante el proceso de digitalización 3D permitió obtener modelos digitalizados cercanos a las dimensiones reales de las piezas originales. En el caso de la biela, los errores porcentuales fueron mínimos en la mayoría de los parámetros, y en la cubierta lateral también se evidenció una alta similitud dimensional entre la pieza original y el modelo digitalizado. Esto demuestra que el escaneo 3D fue una etapa eficiente para generar archivos STL para las etapas posteriores del proceso.
- El proceso desarrollado para la fundición de autopartes de aluminio mediante la agrupación de digitalización 3D, fabricación aditiva con tecnologías FDM y SLA, elaboración de moldes, reproducción en cera y fundición por cera perdida. La impresión FDM en TPU contribuyó en la parte experimental del proyecto, mientras que la impresión en SLA con resina tipo ABS-Like logró modelos positivos con un mejor detalle geométrico. Este proceso permitió obtener piezas en aluminio, demostrando que la combinación de tecnologías digitales y procesos tradicionales de fundición pueden aplicarse para mejorar la producción de autopartes.

- El análisis comparativo permitió identificar las variaciones dimensionales de las piezas producidas durante todo el proceso. La biela fundida presentó una reproducción admisible respecto a la pieza original, aunque se observaron variaciones dimensionales asociadas a la contracción del aluminio, irregularidades del molde y acabado superficial. En la cubierta lateral de motor de motocicleta, la mayor variación se presentó en el espesor de pared, con un error porcentual elevado, esto debido a que contaba con una dimensión pequeña, donde una mínima diferencia genera un porcentaje de error alto.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda aplicar esta metodología en otras autopartes de geometría simple o moderada que no estén sometidas a altas cargas mecánicas, ya que el proceso desarrollado es adecuado para validación geométrica, prototipado y reproducción experimental, para otras aplicaciones requiere estudios adicionales de materiales.
- Es fundamental fortalecer el uso de tecnologías como la digitalización 3D, tomando en cuenta las variaciones dimensionales. Esto permitiría que la pieza final se acerque más a las medidas reales del componente original.
- Para la reducción de tiempos de producción es importante implementar la fabricación aditiva dentro de procesos de fundición artesanal o semiindustrial, ya que permiten mejorar la precisión y aportar al fortalecimiento de la manufactura local de autopartes. Para mejorar la calidad dimensional de las piezas fundidas, se debe considerar un porcentaje de compensación por contracción desde la etapa de modelado digital o elaboración del molde.
- Se recomienda documentar cada etapa del proceso mediante fotografías, tablas de mediciones y registro de fallas superficiales, ya que esta información permite repetir la metodología, comparar resultados y realizar mejoras progresivas en futuras fundiciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] "UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ," 2023.

[2] K. J. Hodder and R. J. Chalaturnyk, "Bridging additive manufacturing and sand casting: Utilizing foundry sand," *Addit. Manuf.*, vol. 28, pp. 649–660, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.06.008.

[3] "Infraestructura - Desarrollo Sostenible." Accessed: Nov. 24, 2025. [Online]. Available: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/

[4] "PLAN NACIONAL DE DESARROLLO 2025-2029." Accessed: Nov. 24, 2025. [Online]. Available: https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/2025/08/PlanNacionalDeDesarrollo25-29_EcuadorNoSeDetiene.pdf

[5] M. Dada and P. Popoola, "Recent advances in joining technologies of aluminum alloys: a review," *Discov. Mater.*, vol. 4, no. 1, p. 86, Dec. 2024, doi: 10.1007/s43939-024-00155-w.

[6] A. S. Al-Ezzi, E. Edan, and S. M. Anas, "Optimizing automotive body panel materials: a CES EduPack analysis of lightweight alloys for sustainable performance," *Discov. Mater.*, vol. 5, no. 1, p. 70, Apr. 2025, doi: 10.1007/s43939-025-00246-2.

[7] D. Chauhan, A. P. Singh, A. Chauhan, and R. Arora, "Sustainable supply chain: An optimization and resource efficiency in additive manufacturing for automotive spare part," *Sustainable Futures*, vol. 9, p. 100563, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.sftr.2025.100563.

[8] S. Bibi, M. Sajid, W. Ahmad, M. A. Ali, M. Jahanzaib, and S. Hussain, "Life Cycle Assessment and Activity-Based Costing for Low-Cost Aluminum die manufacturing: A comparative study of machining process, conventional and rapid investment casting," *Results in Engineering*, vol. 27, p. 106854, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.106854.

[9] B. Liu, J. Kang, X. Yang, B. Zhang, and Y. Bian, "Effects of hollow sand mold on the microstructure and mechanical properties of a low pressure aluminum alloy casting," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 28, pp. 4488–4497, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.12.270.

[10] Y. Mohseni *et al.*, "Investigating impacts of FDM printing parameters and geometrical features on void formation in 3D printed automotive components," *Mater. Today Proc.*, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.06.078.

[11] R. Kleinhans, M. Pintore, P. Erhard, R. Renz, and J. Tesfu, "Thermal Properties of 3D-Printed Molds for Light Metal Casting," *International Journal of Metalcasting*, vol. 19, no. 3, pp. 1690–1699, May 2025, doi: 10.1007/s40962-024-01411-8.

[12] V. Ivanov, A. Evtuhov, I. Dehtiarov, and J. Trojanowska, "Introduction to Manufacturing Engineering," pp. 1–14, 2025, doi: 10.1007/978-3-031-74360-3_1.

[13] P. Kosky, R. Balmer, W. Keat, and G. Wise, "Manufacturing Engineering," *Exploring Engineering*, pp. 259–291, 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-815073-3.00012-0.

[14] N. A. Sukindar *et al.*, "Evaluation of the surface roughness and dimensional accuracy of low-cost 3D-printed parts made of PLA–aluminum," *Heliyon*, vol. 10, no. 4, p. e25508, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.HELIYON.2024.E25508.

[15] E. ; Umaras *et al.*, "Dimensional Tolerances in Mechanical Assemblies: A Cost-Based Optimization Approach," *Applied Sciences 2023, Vol. 13, Page 9202*, vol. 13, no. 16, p. 9202, Aug. 2023, doi: 10.3390/APP13169202.

[16] A. Jandyal, I. Chaturvedi, I. Wazir, A. Raina, and M. I. Ul Haq, "3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0," *Sustainable Operations and Computers*, vol. 3, pp. 33–42, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.SUSOC.2021.09.004.

[17] J. Huang *et al.*, "Influence of the Cooling Temperature on the Surface Quality in Integrated Additive and Subtractive Manufacturing of Aluminum Alloy," *Materials 2024, Vol. 17, Page 5496*, vol. 17, no. 22, p. 5496, Nov. 2024, doi: 10.3390/MA17225496.

[18] A. U. Patwari, S. A. Bhuiyan, K. Noman, and W. Ul Navid, "Defects and remedies in casting processes: a combinatorial approach between manual and digital optimization technique for enhanced quality casting," *Discover Mechanical Engineering 2024 3:1*, vol. 3, no. 1, pp. 39-, Oct. 2024, doi: 10.1007/S44245-024-00067-2.

[19] M. Mukhtarkhanov, A. Perveen, and D. Talamona, "Application of Stereolithography Based 3D Printing Technology in Investment Casting,"

Micromachines (Basel)., vol. 11, no. 10, p. 946, Oct. 2020, doi: 10.3390/MI11100946.

[20] T. Sivarupan *et al.*, "A review on the progress and challenges of binder jet 3D printing of sand moulds for advanced casting," *Addit. Manuf.*, vol. 40, p. 101889, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.ADDMA.2021.101889.

[21] J. Zheng *et al.*, "Promoting sustainability in 3D printed sand casting through adaptive sand mold structures," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 40, p. e00881, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.SUSMAT.2024.E00881.

[22] A. Majid *et al.*, "Investigation of Thickness Effects on Cooling Rate and Hardness of Gray Cast Iron in Metal and Sand Molds," *Engineering Proceedings 2025, Vol. 84, Page 73*, vol. 84, no. 1, p. 73, Feb. 2025, doi: 10.3390/ENGPROC2025084073.

[23] A. Jandyal, I. Chaturvedi, I. Wazir, A. Raina, and M. I. Ul Haq, "3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0," *Sustainable Operations and Computers*, vol. 3, pp. 33–42, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.SUSOC.2021.09.004.

[24] J. Bryła and A. Martowicz, "Study on the Importance of a Slicer Selection for the 3D Printing Process Parameters via the Investigation of G-Code Readings," *Machines 2021, Vol. 9, Page 163*, vol. 9, no. 8, p. 163, Aug. 2021, doi: 10.3390/MACHINES9080163.

[25] M. Beyer, A. Burde, A. E. Roser, M. Beyer, S. Abazi, and F. M. Thieringer, "A Slicer-Independent Framework for Measuring G-Code Accuracy in Medical 3D Printing," *Journal of Imaging 2026, Vol. 12, Page 25*, vol. 12, no. 1, p. 25, Jan. 2026, doi: 10.3390/JIMAGING12010025.

[26] J. J. Freire, C. H. Vlahos, R. J. M. Bol, and B. Šavija, "Micromechanical Models for FDM 3D-Printed Polymers: A Review," *Polymers 2023, Vol. 15, Page 4497*, vol. 15, no. 23, p. 4497, Nov. 2023, doi: 10.3390/POLYM15234497.

[27] M. Wozniak, J. Krason, A. Kosucki, A. Rylski, and K. Siczek, "The Effect of 3D Printer Head Extruder Design on Dynamics and Print Quality," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 24, p. 13140, Dec. 2025, doi: 10.3390/app152413140.

[28] P. Wu, C. Qian, and C. E. Okwudire, "Design, modeling and feedforward control of a hybrid extruder for material extrusion additive manufacturing," *Addit. Manuf.*, vol. 92, p. 104378, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.addma.2024.104378.

[29] C. Riccio *et al.*, "Effects of Curing on Photosensitive Resins in SLA Additive Manufacturing," *Applied Mechanics 2021, Vol. 2, Pages 942-955*, vol. 2, no. 4, pp. 942–955, Nov. 2021, doi: 10.3390/APPLMECH2040055.

[30] L. V. Araújo *et al.*, "Analysis of Mechanical Properties and Printing Orientation Influence of Composite Resin for 3D Printing Compared to Conventional Resin," *Materials 2024, Vol. 17, Page 5626*, vol. 17, no. 22, p. 5626, Nov. 2024, doi: 10.3390/MA17225626.

[31] M. Müller, J. Urban, J. Svobodová, and R. K. Mishra, "Modification of the Mechanical Properties of Photosensitive Resin by Using Biobased Fillers During Stereolithography (SLA) 3D Printing," *Materials*, vol. 18, no. 12, p. 2699, Jun. 2025, doi: 10.3390/ma18122699.

[32] A. Afridi, A. Al Rashid, and M. Koç, "Recent advances in the development of stereolithography-based additive manufacturing processes: A review of applications and challenges," *Bioprinting*, vol. 43, p. e00360, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.bprint.2024.e00360.

[33] M. N. Ahmad, M. R. Ishak, M. Mohammad Taha, F. Mustapha, and Z. Leman, "A Review of Natural Fiber-Based Filaments for 3D Printing: Filament Fabrication and Characterization," *Materials 2023, Vol. 16, Page 4052*, vol. 16, no. 11, p. 4052, May 2023, doi: 10.3390/MA16114052.

[34] K. V. Durga Rajesh, N. Ganesh, S. Yaswanth Kalyan Reddy, H. Mishra, and T. M. V. P. S. Teja Naidu, "Experimental research on the mechanical characteristics of fused deposition modelled ABS, PLA and PETG specimens printed in 3D," *Mater. Today Proc.*, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.06.343.

[35] S. Ricci, A. Pagano, A. Ceccacci, G. Iannitti, and N. Bonora, "An Investigation of the Monotonic and Cyclic Behavior of Additively Manufactured TPU," in *AIAS 2024*, Basel Switzerland: MDPI, Feb. 2025, p. 18. doi: 10.3390/engproc2025085018.

[36] A. Piekarczuk, A. Mazurek, J. Szer, and I. Szer, "A Case Study of 3D Scanning Techniques in Civil Engineering Using the Terrestrial Laser Scanning Technique," *Buildings 2024, Vol. 14, Page 3703*, vol. 14, no. 12, p. 3703, Nov. 2024, doi: 10.3390/BUILDINGS14123703.

[37] S. F. Raza, M. Amjad, K. Ishfaq, S. Ahmad, and M. Abdollahian, "Effect of Three-Dimensional (3D) Scanning Factors on Minimizing the Scanning Errors Using a White LED Light 3D Scanner," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 5, p. 3303, Mar. 2023, doi: 10.3390/APP13053303/S1.

[38] A. Haleem *et al.*, "Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview," *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, vol. 3, pp. 161–171, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.IJCCE.2022.08.003.

[39] U. Filamento and R. Revisó Fecha Ing Luz Fernanda Domínguez Gómez Francisco Javier Hernández Ramos, “Especificaciones,” 2024, Accessed: Apr. 03, 2026. [Online]. Available: https://www.agelectronica.com/

[40] “CATÁLOGO RESINAS MAR 26.pdf - Google Drive.” Accessed: Apr. 03, 2026. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/17ObG5w0q5yNdQQ75rAtl1hG-GlpMI08u/view?pli=1

[41] “CAUCHO DE SILICON T25 CON CATALIZADOR DE 1KG | Pintulac.” Accessed: Apr. 03, 2026. [Online]. Available: https://www.pintulac.com.ec/caucho-de-silicon-t25-con-catalizador-de-1kg.html

[42] “Ficha Tecnica del Caucho Silicona”.

[43] “Cera Corrugada Para Base y Mordida Dentalia | Distribuidor Dental Cron.” Accessed: Apr. 03, 2026. [Online]. Available: https://dentalescron.com/product/cera-corrugada-para-base-y-mordida-dentalia/

[44] “Descubre Todo Sobre la Composición y Tipos de Ceras Dentales en Odontología ¡Imprescindible para Profesionales! - Clínica Dental Santana.” Accessed: Apr. 03, 2026. [Online]. Available: https://clinicadentalsantana.es/blog/composicion-de-las-ceras-dentales/#google_vignette

[45] “Cera de parafina | Evricom.” Accessed: Apr. 03, 2026. [Online]. Available: https://evricom.bg/es/tipos-de-cera/ceras-de-petroleo/cera-de-parafina/

[46] “Cera microcristalina | Evricom.” Accessed: Apr. 03, 2026. [Online]. Available: https://evricom.bg/es/tipos-de-cera/ceras-de-petroleo/cera-microcristalina/

[47] V. Chakarala, J. Schuster, and Y. P. Shaik, “Development and Characterization of Flax–Gypsum Composites,” *Journal of Composites Science*, vol. 8, no. 1, p. 27, Jan. 2024, doi: 10.3390/jcs8010027.

[48] “Yeso Ortodoncia Tipo 3 Whip Mix | Distribuidor Dental Cron.” Accessed: Apr. 03, 2026. [Online]. Available: https://dentalescron.com/product/yeso-ortodoncia-tipo-3-whip-mix/

[49] “UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE”.

[50] “REVOPOINT MIRACO PRO 3D SCANNER | Upgrades | Impresoras 3D | Krear 3D.” Accessed: Apr. 03, 2026. [Online]. Available: https://www.tiendakrear3d.com/producto/revopoint-miraco-pro-3d-scanner/

[51] "MIRACO 3D SCANNER Quick Start Guide V1.0." [Online]. Available: www.revopoint3d.com/pages/support-miraco

[52] "Impresora 3D Artillery Genius Pro." Accessed: Apr. 07, 2026. [Online]. Available: https://arrowti3d.com/impresora-3d-artillery-genius-pro

[53] "Anycubic Photon Mono X 6K - Impresora 3D resina | Monocromática 6K | Velocidad rápida de impresión | Impresión 3D ANYCUBIC." Accessed: Apr. 03, 2026. [Online]. Available: https://www.anycubic.es/products/photon-mono-x-6k

[54] "Ficha-tecnica-impresora-Photon-Mono-X-6K-Anycubic".

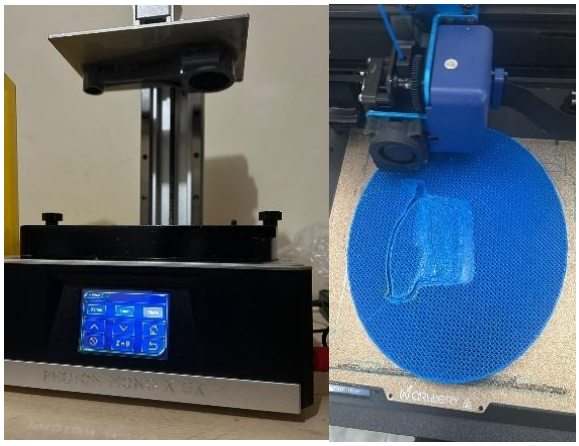
[55] I. De and L. A. Obra, "UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA." [Online]. Available: www.utn.edu.ec

[56] J. León *et al.*, "Mechanical Properties Analysis of an Al-Mg Alloy Connecting Rod with Submicrometric Structure," *Metals 2015, Vol. 5, Pages 1397-1413*, vol. 5, no. 3, pp. 1397–1413, Jul. 2015, doi: 10.3390/MET5031397.

[57] J. Sun *et al.*, "Gas entrainment behavior of aluminum alloy engine crankcases during the low-pressure-die-casting process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 266, pp. 274–282, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2018.11.016.

ANEXOS

Proceso de fabricación aditiva



Producción de piezas en cera con molde de caucho silicón



Proceso de cera pérdida en molde de yeso

