

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y LA CAPACIDAD DE PROCESO DE LA IMPRESORA 3D CREALITY ENDER-3 S1 PRO CON ABS

STIVEN RONALDO CHACÓN BARAJAS
JOSE ALFONSO ROJAS TOVAR

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, COLOMBIA
2025

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y LA CAPACIDAD DE PROCESO DE LA IMPRESORA 3D CREALITY ENDER-3 S1 PRO CON ABS

STIVEN RONALDO CHACÓN BARAJAS
JOSE ALFONSO ROJAS TOVAR

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniería Mecánica

Director (a):
Ing. John Alejandro Forero Casallas M.Sc

Línea de Investigación:
Materiales y procesos de manufactura

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, COLOMBIA
2025

PAGINA DE ACEPTACION

NOTA DE ACEPTACION

_____
_____
_____
_____

_____
EVALUADOR

_____
TUTOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a quienes caminaron conmigo aun cuando los pasos fueron inciertos; a quienes creyeron en mí incluso en los días en que dudaba de mis propias fuerzas.
De manera muy especial, lo dedico a mi madre, porque este esfuerzo no sería nada sin el amor y el ejemplo que me ha dado toda la vida. Este logro es reflejo de su sacrificio y entrega.

No dedico estas páginas a una sola meta alcanzada, sino a la suma de presencias que me impulsaron a no rendirme: la palabra de aliento en el momento exacto, la mirada que transmitía confianza y el apoyo que nunca me faltó.
Este proyecto es testimonio de que el esfuerzo personal cobra verdadero sentido cuando se comparte con quienes más amamos.

Stiven Chacón

Dedico este trabajo a mi querida familia, pilar fundamental en cada etapa de mi vida.
A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y porque nunca dudaron de mí; sus consejos y sacrificios han sido la base de cada logro alcanzado, con su ejemplo y cariño que me han enseñado a no rendirme y a seguir adelante con firmeza.

A mis hermanas, quienes con su apoyo, compañía y palabras de aliento en los momentos difíciles han sido también mis guías y referentes en el camino
A todos ellos, entrego esta parte de mi formación profesional con infinita gratitud y profundo cariño.

Jose Rojas

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin la suma de cada esfuerzo compartido, como primer lugar, agradezco a mi madre, quien ha sido el pilar fundamental de mi vida. Su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y su ejemplo de fortaleza me inspiraron a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Mamá, gracias por tu paciencia, tu cariño y tu fe en mí; este logro también es tuyo y quiero que sepas que te amo profundamente.

A mi familia en general, por acompañarme en cada paso de este camino y recordarme que los grandes resultados nacen de la constancia y el esfuerzo compartido. Para mis amigos y compañeros, a quienes he conocido a lo largo de este exhausto y grato camino, quienes con su apoyo, compañía y consejos hicieron que este proceso fuera más llevadero y enriquecedor.

Finalmente, me doy las gracias a mí mismo por confiar tanto y nunca desistir, agradezco a todas las experiencias, tanto las sencillas como las complejas, que me motivaron a seguir adelante y dieron sentido a este proyecto.

Stiven Chacón

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, quienes han sido la base y el motor que me ha impulsado a alcanzar esta meta. A mis padres, por su apoyo incondicional y por nunca dudar de mí; sus consejos, sacrificios y amor me han dado la fuerza necesaria para superar cada obstáculo y creer siempre en mis capacidades.

A mis hermanas, quienes han sido más que compañeras de vida: han sido mis guías, mi inspiración y mi refugio en los momentos difíciles. Su ejemplo, sus palabras de aliento y su confianza en mí me motivaron a continuar y a dar siempre lo mejor de mí mismo.

A mi tutor, John Forero, por su dedicación, paciencia y valiosa orientación a lo largo de este proceso. Su guía no solo fortaleció mi trabajo académico, sino que también me motivó a crecer en lo personal y profesional.

A mis compañeros y amigos, por compartir este recorrido con su apoyo, compañía y motivación, que hicieron más llevadero este esfuerzo.

Jose Rojas

CONTENIDO

Contenido

1.1.1 INTRODUCCION 18
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 21
2.1 HIPOTESIS 21
2.2 JUSTIFICACION 21
3. OBJETIVOS 23
3.1 OBJETIVO GENERAL 23
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 23
4. ANTECEDENTES 24
4.1 ESTADO DEL ARTE 24
4.1.1 Introducción 24
4.1.2 Revisión de literatura 25
4.1.3 Metodología experimental 25
4.1.4 Desarrollo del análisis estadístico 25
4.1.5 Resultados y discusión 26
4.1.6 Conclusiones 26
4.1.7 Aporte del artículo 26
4.1.8 Evolución del Control de Calidad en AM 27
4.1.9 Aporte del Estudio de Siraj & Bharti (2020) 27
4.1.10 Estudios Comparativos 28
4.1.11 Aplicaciones de los Índices de Capacidad 28
4.1.12 Vacíos de Investigación y Oportunidades 29
4.1.13 Estudios relacionados con PCA en impresión FDM con ABS 29
4.1.14 Estudios de precisión dimensional y PCA en impresoras de escritorio 29
4.1.15 Tendencias actuales y herramientas estadísticas en PCA 30
4.1.16 Implicaciones del análisis de capacidad en ABS para entornos industriales 30
4.2 MARCO TEORICO 31
4.2.1 Introducción a la Fabricación Aditiva 31
4.2.2 Tecnología FDM y Materiales 32
4.2.3 Precisión Dimensional y Parámetros Críticos 33
4.2.4 Análisis de Capacidad del Proceso (PCA) 34
4.2.5 Anisotropía en piezas FDM y su impacto mecánico 34
4.2.6 Estandarización y normativas aplicadas a la impresión 3D 35
4.2.7 Evaluación metrológica de piezas impresas 35
4.2.8 Comparación entre PLA y ABS en contextos de impresión doméstica 35
4.2.9 Relevancia del análisis estadístico para la validación de procesos FDM 36
5. METODOLOGÍA 37
5.1 DISEÑO DE PROBETAS 37
5.1.1 Mordaza Móvil y Cremallera 41
5.1.2 Mordaza fija y Mango 42
5.1.3 Tuerca de Ajuste 44
5.1.4 Carcasa 45
5.1.5 Pasador 47
5.2 ENSAYOS MECÁNICOS SEGUN NORMA ASTM APLICABLES AL ABS 48
5.3 PROCESO DE IMPRESIÓN 50
5.4 MEDICIÓN DIMENSIONAL 53
5.4.1 MEDICIÓN DIMENSIONAL CON PIE DE REY 0.01mm DIGITAL 54
5.4.2 MEDICIÓN DIMENSIONAL CON MICROMETRO 0.001mm ANÁLOGO 55

5.4.3 MEDICIÓN DIMENSIONAL CON ESCÁNER 3D FREESCAM COMBO SERIES 56
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS 58
6.1 RESULTADOS DIMENSIONALES 58
6.1.1 RESULTADOS DIMENSIONALES CON PIE DE REY (RESOLUCIÓN 0,01mm) DIGITAL 58
6.1.2 RESULTADOS DIMENSIONALES CON MICRÓMETRO (RESOLUCIÓN 0,01mm) ANÁLOGO 59
6.1.3 RESULTADOS DIMENSIONALES CON ESCÁNER LASER 3D FREE SCAN COMBO SERIES (RESOLUCIÓN 0.02mm) 60
6.2 ANÁLISIS CAPACIDAD DE PROCESO 62
6.2.1 ANÁLISIS CAPACIDAD DE PROCESO CON PIE DE REY (RESOLUCIÓN 0,01mm) DIGITAL 64
6.2.2 CAPACIDAD DE PROCESO CON MICROMETRO (RESOLUCIÓN 0,01mm) ANÁLOGO 67
6.2.1 CAPACIDAD DE PROCESO CON ESCÁNER LASER 3D FREE SCAN COMBO SERIES (RESOLUCIÓN 0.02mm) 70
6.3 GRÁFICOS DE CONTROL Y DISCUSIÓN 73
6.3.1 GRÁFICOS CAPACIDAD DE PROCESO CON PIE DE REY (RESOLUCIÓN 0,01mm) DIGITAL 73
6.3.2 GRÁFICOS CAPACIDAD DE PROCESO CON MICROMETRO (RESOLUCIÓN 0,01mm) ANÁLOGO 85
6.3.3 *GRÁFICOS* CAPACIDAD DE PROCESO CON ESCÁNER LASER 3D FREE SCAN COMBO SERIES (RESOLUCIÓN 0.02mm) 92
7. CONCLUSIONES 105
8. RECOMENDACIONES 107

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.Símbolos y abreviaturas 14
Tabla 2.Medidas críticas, piezas y su función..... 38
Tabla 3. *Ensayos mecánicos normalizados ASTM y valores de referencia para ABS* 50
Tabla 4. *Parámetros de Impresión*..... 51
Tabla 5. *Resultados resumidos de las mediciones con calibrador pie de rey* 55
Tabla 6. *Resultados resumidos de las mediciones con micrómetro*..... 56
Tabla 7. *Resultados resumidos de las mediciones con Escáner 3D*..... 57
Tabla 8. *Tabla de medida con pie de rey 0,01 Digital: Nominal-Tomada-Diferencia* 58
Tabla 9. *Tabla de medidas con Micrómetro 0,01 Análogo: Nominal, Tomada-Diferencia* 59
Tabla 10. *Tabla de medidas con Escáner 3D Freescan Combo Series: Nominal-Tomada-Diferencia* 61
Tabla 11. *Datos análisis capacidad de proceso para la mordaza móvil con pie de rey* ... 64
Tabla 12. *Datos análisis capacidad de proceso para la Tuerca de Ajuste con pie de rey* 65
Tabla 13. *Datos análisis capacidad de proceso para la Carcasa con pie de rey*..... 66
Tabla 14.Datos análisis capacidad de proceso para la Cremallera con pie de rey..... 66
Tabla 15. *Datos análisis capacidad de proceso para el mango con pie de rey* 67
Tabla 16. *Datos análisis capacidad de proceso para la Mordaza móvil con micrómetro*. 67
Tabla 17. *Datos análisis capacidad de proceso para la Tuerca de ajuste con micrómetro* 68
Tabla 18. *Datos análisis capacidad de proceso para la Carcasa con micrómetro*..... 68
Tabla 19. *Datos análisis capacidad de proceso para la Cremallera con micrómetro* 69
Tabla 20. *Datos análisis capacidad de proceso para el Mango con micrómetro*..... 69
Tabla 21. *Datos análisis capacidad de proceso para la Mordaza móvil con escáner 3D* 70
Tabla 22. *Datos análisis capacidad de proceso para la Tuerca de ajuste con escáner 3D* 71
Tabla 23. *Datos análisis capacidad de proceso para la Carcasa con escáner 3D* 71
Tabla 24. *Datos análisis capacidad de proceso para la Cremallera con escáner 3D*..... 72
Tabla 25. *Datos análisis capacidad de proceso para el Mango con escáner 3D*..... 72

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Partes de la Llave para tubos 40
Ilustración 2. *Isométrico Llave de tubos*..... 40
Ilustración 3. *Isométrico Llave de tubos*..... 40
Ilustración 4. *Isométrico Llave de tubos*..... 41
Ilustración 5. Modelado SolidWorks Mordaza Móvil-Cremallera 41
Ilustración 6. *Plano Mordaza Móvil-Cremallera*..... 42
Ilustración 7. *Modelado SolidWorks Mango-Mordaza Fija* 43
Ilustración 8. *Plano Mango-Mordaza Fija*..... 43
Ilustración 9. *Modelado Tuerca de Ajuste*..... 44
Ilustración 10. *Plano Tuerca de Ajuste* 45
Ilustración 11. *Modelo Carcasa* 46
Ilustración 12. *Plano Carcasa*..... 47
Ilustración 13. *isométrico Pasador*..... 47
Ilustración 14. *Plano Pasador*..... 48
Ilustración 15. *Informe Minitab para el Espesor de la mordaza móvil con pie de rey* 73
Ilustración 16. *Informe Minitab para el Largo de la mordaza móvil con pie de rey* 74
Ilustración 17. *Informe Minitab para el Ancho de la mordaza móvil con pie de rey* 74
Ilustración 18. *Informe Minitab para el Diámetro exterior de la tuerca de ajuste con pie de rey*..... 75
Ilustración 19. *Informe Minitab para el Diámetro interno de la tuerca de ajuste con pie de rey*..... 76
Ilustración 20. *Informe Minitab para el Espesor de la tuerca de ajuste con pie de rey* 76
Ilustración 21. *Informe grafico Minitab para el Ancho de la Carcasa con pie de rey* 77
Ilustración 22. *Informe grafico Minitab para el Largo de la Carcasa con pie de rey* 77
Ilustración 23. *Informe grafico Minitab para el Espesor de la Carcasa con pie de rey* 78
Ilustración 24. *Informe grafico Minitab para la Cavidad interna tuerca ancho de la Carcasa con pie de rey*..... 78
Ilustración 25. *Informe grafico Minitab para la Cavidad interna tuerca largo de la Carcasa con pie de rey*..... 79
Ilustración 26. *Informe grafico Minitab para la Cavidad interna tuerca-espesor de la Carcasa con pie de rey*..... 79
Ilustración 27. *Informe grafico Minitab para la Cavidad interna mordaza móvil-largo de la Carcasa con pie de rey*..... 80
Ilustración 28. *Informe grafico Minitab para la Cavidad interna mordaza móvil-espeso de la Carcasa con pie de rey*..... 80
Ilustración 29.*Informe grafico Minitab para el Ancho de la Cremallera con pie de rey* 81
Ilustración 30. *Informe grafico Minitab para el Espesor de la Cremallera con pie de rey* 82
Ilustración 31. *Informe grafico Minitab para el Ancho Superior del Mango con pie de rey*83
Ilustración 32. *Informe grafico Minitab para el Ancho Inferior del Mango con pie de rey*. 83
Ilustración 33. *Informe grafico Minitab para el Largo Mango con pie de rey* 84

Ilustración 34. *Informe grafico Minitab para el Espesor superior del Mango con pie de rey* 84
Ilustración 35.*. Informe grafico Minitab para el Espesor medio del Mango con pie de rey* 85
Ilustración 36. *Informe grafico Minitab para el Espesor de la Mordaza móvil con micrómetro* 86
Ilustración 37. *Informe grafico Minitab para el Diámetro exterior de la Tuerca de ajuste con micrómetro*..... 87
Ilustración 38. *Informe grafico Minitab para el Espesor de la Tuerca de ajuste con micrómetro* 87
Ilustración 39. *Informe grafico Minitab para el Espesor de la Carcasa con micrómetro* .. 88
Ilustración 40. *Informe grafico Minitab para el Ancho de la Cremallera con micrómetro* . 89
Ilustración 41. *Informe grafico Minitab para el Espesor de la Cremallera con micrómetro* 89
Ilustración 42. *Informe grafico Minitab para el Ancho superior del mango con micrómetro* 90
Ilustración 43. *Informe grafico Minitab para el Ancho inferior del mango con micrómetro*91
Ilustración 44. *Informe grafico Minitab para el Espesor superior del mango con micrómetro* 91
Ilustración 45. *Informe grafico Minitab para el Espesor inferior del mango con micrómetro* 92
Ilustración 46. *Informe Minitab para el Ancho de la mordaza móvil con escáner 3D*..... 93
Ilustración 47. *Informe Minitab para el Largo de la mordaza móvil con escáner 3D*..... 93
Ilustración 48. *Informe Minitab para el Espesor de la mordaza móvil con escáner 3D*.... 94
Ilustración 49. *Informe Minitab para el Diámetro exterior de la tuerca de ajuste con escáner 3D*..... 95
Ilustración 50. *Informe Minitab para el Diámetro interno de la tuerca de ajuste con escáner 3D*..... 95
Ilustración 51. *Informe Minitab para el Espesor de la tuerca de ajuste con escáner 3D*.. 96
Ilustración 52. *Informe grafico Minitab para el Ancho de la Carcasa con escáner 3D*..... 97
Ilustración 53. *Informe grafico Minitab para el Largo de la Carcasa con escáner 3D*..... 97
Ilustración 54. *Informe grafico Minitab para el Espesor de la Carcasa con escáner 3D*.. 98
Ilustración 55. *Informe grafico Minitab para la Cavidad interna tuerca ancho de la Carcasa con escáner 3D* 98
Ilustración 56. *Informe grafico Minitab para la Cavidad interna tuerca largo de la Carcasa con escáner 3D* 99
Ilustración 57. *Informe grafico Minitab para la Cavidad interna tuerca-espesor, de la Carcasa con escáner 3D* 99
Ilustración 58. *Informe grafico Minitab para la Cavidad interna mordaza móvil-largo de la Carcasa con escáner 3D* 100
Ilustración 59. *Informe grafico Minitab para la Cavidad interna mordaza móvil-espeso de la Carcasa con escáner 3D* 100
Ilustración 60. *Informe grafico Minitab para el Ancho de la Cremallera con escáner 3D*101

Ilustración 61. *Informe grafico Minitab para el Espesor de la Cremallera con escáner 3D* 101
Ilustración 62.. *Informe grafico Minitab para el Ancho Superior del Mango con escáner 3D* 102
Ilustración 63. *Informe grafico Minitab para el Ancho Inferior del Mango con escáner 3D* 103
Ilustración 64. *Informe grafico Minitab para el Largo del Mango con escáner 3D* 103
Ilustración 65. *Informe grafico Minitab para el Espesor superior del Mango con escáner 3D* 104
Ilustración 66. *Informe grafico Minitab para el Espesor inferior del Mango con escáner 3D* 104

LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
M	Media aritmética	mm	Valor promedio de las mediciones obtenidas en una muestra.
Σ	Desviación estándar	mm	Medida de la dispersión de los datos respecto a la media.
USL	Límite superior de especificación	mm	Valor máximo permitido en una dimensión según tolerancia.
LSL	Límite inferior de especificación	mm	Valor mínimo permitido en una dimensión según tolerancia.
Cp	Índice de capacidad potencial	adimensional	Relación entre el rango de tolerancia y la variabilidad del proceso.
Cpk	Índice de capacidad real	adimensional	Capacidad efectiva considerando el centrado del proceso.
Cpl	Índice de capacidad inferior	adimensional	Capacidad del proceso respecto al límite inferior de especificación.
Cpu	Índice de capacidad superior	adimensional	Capacidad del proceso respecto al límite superior de especificación.
Cpm	Índice de capacidad ajustado	adimensional	Evalúa la capacidad considerando desviación respecto al objetivo nominal.

Ppk	Índice de desempeño del proceso	adimensional	Similar al Cpk, pero considerando variación global del proceso.
PQL%	Porcentaje de pérdida de calidad	%	Estimación del material fuera de tolerancia o pérdida funcional.
Tbed	Temperatura de la cama	°C	Temperatura de la superficie de impresión.
Textr	Temperatura del extrusor	°C	Temperatura de la boquilla de extrusión.
h	Altura de capa	mm	Grosor de cada capa depositada en el proceso FDM.
v	Velocidad de impresión	mm/s	Rapidez con que la boquilla deposita el material fundido.
ρ	Porcentaje de relleno (*infill*)	%	Cantidad de material dentro de la pieza, respecto a su volumen total.
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno	—	Termoplástico utilizado como material de impresión.
FDM	Fused Deposition Modeling	—	Tecnología de impresión 3D basada en deposición fundida.
STL	*Stereolithography*	—	Formato de archivo 3D para impresión.
G-code	Código geométrico	—	Instrucciones que controlan la impresora 3D.
CAD	*Computer-Aided Design*	—	Diseño asistido por computadora.

Vernier	Calibrador digital (Pie de rey)	mm	Instrumento de medición con precisión de 0,01 mm.
Mic.	Micrómetro	mm	Instrumento de medición de alta precisión (0,01 mm).
SW	SolidWorks	—	Software CAD utilizado para modelado 3D.
Minitab	Minitab	—	Software estadístico utilizado en el análisis de datos.

Tabla 1.Símbolos y abreviaturas

GLOSARIO

ABS (ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO): Termoplástico ampliamente utilizado en impresión 3D por su resistencia mecánica, estabilidad térmica y durabilidad.

ANISOTROPÍA: Condición en la que un material presenta propiedades mecánicas diferentes dependiendo de la dirección en la que se mida.

CAPACIDAD DE PROCESO (PROCESS CAPABILITY): Medida estadística que evalúa la habilidad de un proceso para producir resultados dentro de límites de tolerancia establecidos.

CPK (ÍNDICE DE CAPACIDAD DE PROCESO CENTRADA): Indicador que mide qué tan cerca está un proceso de cumplir las especificaciones considerando la variabilidad y el centrado.

CP (ÍNDICE DE CAPACIDAD DE PROCESO): Indicador estadístico que mide el rango de variación del proceso en relación con las especificaciones, sin considerar el centrado.

CPM / CPMK: Índices de capacidad de proceso que incluyen la variación y el grado de alineación con el valor nominal objetivo.

DIMENSIÓN CRÍTICA: Medida fundamental en una pieza, cuya variación puede afectar significativamente su funcionalidad o desempeño.

FDM (FUSED DEPOSITION MODELING): Técnica de fabricación aditiva basada en la extrusión de filamentos termoplásticos capa por capa para formar piezas.

RESUMEN

Para la realización de este proyecto se tendrá como objetivo principal evaluar la calidad y confiabilidad de la impresión 3D mediante el uso del ABS en la impresora Creality Ender-3 S1 Pro. Para lograr este objetivo, se optó por orientarlo con un enfoque donde abordará la capacidad de fabricación, llegando a proporcionar una evaluación del rendimiento de la impresión 3D con este tipo de material (ABS) y equipo específico en cuestión.

Se llegará a lograr este proceso de la siguiente manera, donde se realizará un análisis detallado para evaluar la precisión dimensional del método de fabricación que se realizará, donde se emplearán índices estadísticos como lo son Cp, Cpk, Cpm, Cpl y Cpu, los cuales ayudaran para la obtención de mediciones como la estabilidad y repetibilidad de la fabricación. Con este estudio se logrará identificar las fuentes de variabilidad en la impresión 3D, permitiendo tomar decisiones a la hora de aplicar mejoras en los parámetros para aumentar la exactitud y fiabilidad de los resultados obtenidos. Además, se evaluará la consistencia a lo largo del tiempo, lo cual es esencial para garantizar la precisión en la fabricación de piezas con tolerancias estrictas, permitiendo llegar a unas conclusiones de si este método es aplicable para la exactitud y precisión que se requiere.

Para la finalización de este estudio, los resultados obtenidos de estas evaluaciones brindan la posibilidad de establecer parámetros óptimos para la impresión 3D con ABS, que podrán ser aplicados en contextos académicos e industriales. Tenemos en cuenta que este proyecto no solo contribuirá al conocimiento y aprendizaje sobre el comportamiento del material en la impresión 3D, sino que también sentará las bases y guías para futuras investigaciones junto con mejoras en la fabricación aditiva en la Universidad Distrital, promoviendo la innovación en la industria local y en el ámbito académico.

PALABRAS CLAVE: IMPRESIÓN 3D, ABS, CREALITY ENDER-3 S1 PRO, CAPACIDAD DE PROCESO, PRECISIÓN DIMENSIONAL, FABRICACIÓN ADITIVA, EVALUACIÓN DE CALIDAD

ABSTRACT

The main objective of this project is to evaluate the quality and reliability of 3D printing using ABS on the Creality Ender-3 S1 Pro printer. To achieve this objective, it was decided to focus on manufacturability, providing an evaluation of 3D printing performance with this type of material (ABS) and the specific equipment in question.

This process will be achieved as follows: a detailed analysis will be performed to assess the dimensional accuracy of the manufacturing method. Statistical indices such as Cp, Cpk, Cpm, Cpl, and Cpu will be used to obtain measurements such as manufacturing stability and repeatability. This study will identify the sources of variability in 3D printing, allowing decisions to be made when implementing parameter improvements to increase the accuracy and reliability of the results obtained. In addition, consistency over time will be evaluated, which is essential to ensure precision in the manufacturing of parts with tight tolerances, allowing conclusions to be drawn as to whether this method is applicable to the required accuracy and precision.

By the end of this study, the results obtained from these evaluations will provide the possibility of establishing optimal parameters for 3D printing with ABS, which can be applied in academic and industrial contexts. We consider that this project will not only contribute to knowledge and learning about the material's behavior in 3D printing, but will also lay the foundation and guidelines for future research and improvements in additive manufacturing at the District University, promoting innovation in local industry and academia.

KEYWORDS: 3D PRINTING, ABS, CREALITY ENDER-3 S1 PRO, PROCESS CAPABILITY, DIMENSIONAL ACCURACY, ADDITIVE MANUFACTURING, QUALITY ASSESSMENT

1. INTRODUCCION

La evolución de la tecnología ha dado lugar a nuevas formas de fabricación que han transformado la manera en que se diseñan, desarrollan y producen piezas y productos funcionales. Entre estas tecnologías, la fabricación aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D, ha generado un impacto significativo en los sectores industrial, académico y de innovación, al permitir la creación de objetos complejos directamente a partir de modelos digitales tridimensionales. Este enfoque ha demostrado ventajas notables frente a los métodos de manufactura tradicionales, como la reducción del desperdicio de material, la disminución en los tiempos de desarrollo de productos y una mayor libertad en el diseño geométrico.

Dentro del amplio espectro de tecnologías de impresión 3D, el modelado por deposición fundida (Fused Deposition Modeling, FDM) es una de las técnicas más empleadas en diversos contextos. Esta tecnología se basa en la extrusión de un filamento termoplástico fundido, que se deposita capa por capa para formar la pieza final. Su popularidad se debe a la facilidad de operación, disponibilidad de materiales y constante evolución de los equipos, lo cual ha permitido su adopción en áreas como la ingeniería, el diseño industrial, la educación y el desarrollo de prototipos funcionales.

Entre los materiales más utilizados en el proceso FDM se encuentra el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), un polímero termoplástico que ofrece un equilibrio entre resistencia mecánica, estabilidad térmica y durabilidad. Estas propiedades hacen del ABS una opción adecuada para aplicaciones que exigen cierto nivel de robustez estructural. No obstante, su procesamiento presenta retos técnicos importantes debido a su comportamiento térmico, como la contracción al enfriarse, la tendencia al warping y la sensibilidad a las condiciones ambientales. Estos fenómenos pueden afectar la adhesión entre capas, provocar deformaciones geométricas y generar desviaciones en las dimensiones finales del producto fabricado.

Por otro lado, la calidad de una pieza impresa en 3D no solo depende del material utilizado, sino también de los parámetros de impresión configurados. Variables como la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión, el porcentaje de relleno, la altura de capa y la orientación de las capas tienen una influencia directa sobre la precisión dimensional y el comportamiento geométrico de la pieza. Debido

a la naturaleza capa por capa del proceso FDM, las piezas impresas pueden presentar anisotropía, es decir, diferentes propiedades según el eje en que se evalúen. Este comportamiento afecta tanto el rendimiento funcional como la exactitud dimensional, lo que puede comprometer la compatibilidad de la pieza con otras partes en un sistema o conjunto mecánico.

En este sentido, se vuelve fundamental evaluar de manera rigurosa la capacidad del proceso de impresión, entendida como su habilidad para producir piezas dentro de límites de tolerancia preestablecidos de forma repetitiva y consistente. El análisis estadístico de capacidad del proceso (Process Capability Analysis, PCA) permite cuantificar esta habilidad mediante índices como Cp, Cpk, Cpm y Cpmk, los cuales proporcionan una medición objetiva de la variabilidad, la alineación respecto al valor objetivo y la estabilidad del proceso. Aplicar estas herramientas en el contexto de la impresión 3D con ABS permite identificar las fuentes de variabilidad, evaluar la repetibilidad del sistema y establecer parámetros óptimos para mejorar la calidad del producto final.

La impresora 3D Creality Ender-3 S1 Pro representa una solución tecnológica que incorpora características técnicas que permiten el trabajo con materiales exigentes como el ABS. Dispone de un sistema de extrusión directa, cama calefactada y nivelación automática, lo que favorece la adhesión inicial del material y la estabilidad del proceso. Sin embargo, para garantizar su desempeño en aplicaciones que requieren precisión dimensional, es indispensable validar experimentalmente su comportamiento bajo condiciones de impresión controladas, especialmente cuando se busca aplicar la tecnología en ámbitos educativos, técnicos o de desarrollo funcional.

El presente trabajo de grado tiene como objetivo evaluar la capacidad del proceso de impresión 3D en la Creality Ender-3 S1 Pro utilizando ABS como material base, enfocándose en el análisis estadístico de precisión dimensional. Para ello, se fabricarán probetas bajo configuraciones estables, se medirán dimensiones críticas con instrumentos de metrología de precisión y se aplicarán herramientas estadísticas para caracterizar el desempeño del sistema de impresión. La metodología adoptada permitirá establecer un marco técnico que ayude a validar la confiabilidad del proceso, identificar oportunidades de mejora y fomentar la implementación adecuada de esta tecnología en proyectos que exijan rigor técnico.

Esta investigación busca aportar al conocimiento técnico de la impresión 3D con ABS integrando conceptos de manufactura, metrología y control estadístico. Los resultados obtenidos podrán ser utilizados como referencia en futuras investigaciones, así como en actividades de formación, desarrollo tecnológico y optimización de procesos. En definitiva, este trabajo pretende contribuir al uso responsable, eficiente y técnicamente fundamentado de la tecnología FDM en entornos donde la calidad del producto final es un aspecto crítico para su funcionalidad.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 HIPOTESIS

Hipótesis principal: La impresora 3D Creality Ender-3 S1 Pro, utilizando ABS como material, presenta una capacidad de proceso adecuada para fabricar piezas con precisión dimensional dentro de los límites de tolerancia establecidos, según los índices Cp, Cpk, Cpm y Cpmk.

Hipótesis nula: La impresora 3D Creality Ender-3 S1 Pro no presenta una capacidad de proceso suficiente para cumplir con las tolerancias dimensionales requeridas al imprimir en ABS, de acuerdo con el análisis estadístico del proceso.
Los capítulos son las principales divisiones del documento. En estos, se desarrolla el tema del documento. Cada capítulo debe corresponder a uno de los temas o aspectos tratados en el documento y por tanto debe llevar un título que indique el contenido del capítulo.

Los capítulos son las principales divisiones del documento. En estos, se desarrolla el tema del documento. Cada capítulo debe corresponder a uno de los temas o aspectos tratados en el documento y por tanto debe llevar un título que indique el contenido del capítulo

2.2 JUSTIFICACION

La fabricación aditiva, especialmente a través de la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM), ha transformado la manera en que se producen piezas funcionales y prototipos. Esta técnica permite crear geometrías complejas con relativa facilidad, a partir de materiales termoplásticos como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), ampliamente utilizado por su resistencia térmica, buena estabilidad dimensional y facilidad de adquisición.

No obstante, a pesar de sus ventajas, el proceso de impresión 3D con ABS presenta limitaciones técnicas que pueden comprometer la calidad dimensional de

las piezas. Factores como la contracción del material durante el enfriamiento, la orientación de las capas, la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión y el porcentaje de relleno influyen directamente en la precisión final del producto fabricado. Estas variaciones pueden ser críticas cuando se requiere cumplir con tolerancias geométricas estrictas.

La impresora Creality Ender-3 S1 Pro es un equipo que incorpora mejoras técnicas como extrusión directa, nivelación automática y cama calefactada, características que teóricamente permiten imprimir con ABS de forma más estable. Sin embargo, existe poca documentación técnica que analice de forma estadística y sistemática la precisión dimensional que puede alcanzar esta impresora bajo condiciones controladas, especialmente en términos de repetibilidad y estabilidad del proceso.

Por tanto, surge la necesidad de evaluar cuantitativamente la capacidad del proceso de impresión FDM utilizando ABS en este modelo de impresora, aplicando herramientas estadísticas como Cp, Cpk, Cpm, Cpu y Cpl, que permiten medir la variabilidad, alineación y desempeño general del proceso frente a tolerancias establecidas. Esta evaluación puede ayudar a establecer parámetros confiables de impresión y aportar evidencia técnica para respaldar el uso de esta tecnología en contextos que exigen precisión dimensional, como el desarrollo de prototipos funcionales o piezas de uso técnico.

Pregunta de investigación: ¿Cuál es la capacidad del proceso de impresión FDM con ABS en la impresora Creality Ender-3 S1 Pro, en términos de precisión dimensional y repetibilidad, bajo condiciones de operación controladas?

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la capacidad del proceso de impresión 3D de la impresora Creality Ender-3 S1 Pro utilizando ABS, mediante un análisis estadístico de la precisión dimensional de las piezas fabricadas.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fabricar probetas normalizadas bajo condiciones controladas (temperatura de extrusión, velocidad de impresión, porcentaje de relleno).

- Realizar ensayos mecánicos siguiendo normas ASTM.

- Medir dimensiones críticas (ancho, espesor, longitud) con instrumentos de precisión (Laboratorio de metrología: calibrador digital, micrómetro, escáner 3D).

- Aplicar análisis estadístico para determinar la capacidad del proceso.

- Comparar resultados con literatura técnica y establecer recomendaciones de impresión.

4. ANTECEDENTES

Existen varias normas para la citación bibliográfica. Algunas áreas del conocimiento prefieren normas específicas para citar las referencias bibliográficas en el texto y escribir la lista de bibliografía al final de los documentos. Esta plantilla brinda la libertad para que el autor de la tesis utilice la norma bibliográfica común para su disciplina. Sin embargo, se solicita que la norma seleccionada se utilice con rigurosidad, sin olvidar referenciar “todos” los elementos tomados de otras fuentes (referencias bibliográficas, patentes consultadas, software empleado en el manuscrito, en el tratamiento a los datos y resultados del trabajo, consultas a personas (expertos o público general), entre otros).

4.1 ESTADO DEL ARTE

Con respecto al artículo “Process capability analysis of a 3D printing process Imran Siraj & Pushpendra S. Bharti “, nos presenta un análisis detallado de la capacidad del proceso de impresión 3D mediante la técnica FDM, con énfasis en la aplicación de seis índices de capacidad: Cp, Cpk, Cpl, Cpu, Cpm y Cpmk. Se realizó una experimentación sistemática para evaluar la estabilidad del proceso de fabricación en función de sus resultados dimensionales. El enfoque es estadístico y busca ofrecer una base cuantitativa para evaluar y mejorar la calidad del proceso en entornos industriales y académicos.

4.1.1 Introducción

En esta sección, los autores destacan la expansión del uso de la impresión 3D (3DP) en sectores como la manufactura, la medicina y el ámbito social. Señalan que la tecnología FDM, aunque popular, enfrenta desafíos relacionados con la precisión dimensional. Plantean que la variabilidad inherente al proceso hace necesaria la aplicación de herramientas estadísticas, específicamente el análisis de capacidad del proceso (PCA), para controlar la calidad y mejorar la producción. Esta sección justifica la relevancia del estudio y establece la base conceptual del trabajo.

4.1.2 Revisión de literatura

Se realiza una revisión exhaustiva de investigaciones previas que han intentado abordar la calidad en impresión 3D. Se mencionan métodos como el análisis causa-efecto, gráficos de control, diseño de experimentos (DOE) y método Taguchi. Sin embargo, los autores identifican una carencia: la mayoría de estos estudios no aplica todos los seis índices de capacidad bajo condiciones experimentales uniformes. Este vacío en la literatura es el que el artículo intenta llenar. También se discuten investigaciones en contextos médicos e ingenieriles donde se evalúa la precisión dimensional con diversos métodos de escaneo y medición.

4.1.3 Metodología experimental

La metodología se basa en la producción de 50 probetas con material PLA utilizando tecnología FDM. Se aplican condiciones experimentales constantes para eliminar variables externas. Las probetas son diseñadas según la norma ASTM D638-10 para ensayos de tracción. Se utiliza el software Cura para la conversión de archivos CAD a formato G-code. Las dimensiones críticas evaluadas son longitud, ancho y ancho central. La medición se hace con calibradores digitales INSIZE y se analiza con el software Minitab y Excel.

4.1.4 Desarrollo del análisis estadístico

Los autores definen y aplican seis índices de capacidad: Cp, Cpk, Cpl, Cpu, Cpm y Cpmk. Estos índices permiten medir tanto la variabilidad del proceso como su alineación respecto al valor objetivo. Se incluyen las fórmulas matemáticas y su interpretación. Se construyen gráficos de dispersión y se calcula también el porcentaje de pérdida de calidad (Pql%). Esta sección representa el aporte técnico principal del artículo, ya que permite analizar con precisión los desvíos del proceso y establecer criterios de mejora.

4.1.5 Resultados y discusión

Los valores de Cp obtenidos indican que algunas dimensiones cumplen los requisitos mínimos de capacidad, pero otras no alcanzan el estándar de 1.33. Cpk es aún menor, lo que indica que el proceso está descentrado. En particular, las dimensiones centrales presentan una mayor desviación respecto al objetivo. Se identifican causas posibles como desalineación del sistema, errores en el montaje o calibración insuficiente. Se presentan gráficos que corroboran los resultados numéricos. También se menciona la importancia de corregir los sesgos en la configuración para mejorar la repetibilidad del proceso.

4.1.6 Conclusiones

El estudio concluye que, aunque el proceso FDM presenta potencial de control y repetibilidad, requiere ajustes importantes para alcanzar una calidad aceptable. La aplicación de todos los índices de capacidad ofrece una evaluación completa y rigurosa del proceso. El artículo recomienda como futura línea de investigación el análisis del efecto individual de los parámetros de impresión (temperatura, velocidad, relleno) sobre los índices de capacidad, así como la aplicación de esta metodología a otros materiales y condiciones de impresión.

4.1.7 Aporte del artículo

El artículo representa una contribución significativa al análisis estadístico de la impresión 3D, al ser uno de los pocos trabajos que aplica de forma simultánea seis índices de capacidad en un entorno experimental controlado. Su enfoque metodológico riguroso puede ser replicado y adaptado a otros materiales, configuraciones de impresión y condiciones de trabajo. Además, establece un precedente para que la impresión 3D sea analizada desde una perspectiva metrológica y de calidad, lo cual es clave para su consolidación como método productivo profesional.

4.1.8 Evolución del Control de Calidad en AM

La evolución del control de calidad en la manufactura aditiva ha transitado desde enfoques empíricos hasta modelos estadísticos complejos. Estudios iniciales abordaron problemas de precisión dimensional y calidad superficial mediante ajustes manuales o ensayos repetitivos (Wu et al., 2018). Posteriormente, se integraron metodologías estadísticas como el diseño de experimentos y el análisis multivariable para comprender la interacción entre parámetros de impresión.

4.1.9 Aporte del Estudio de Siraj & Bharti (2020)

El artículo de Siraj & Bharti (2020) constituye un hito dentro del análisis estadístico de la impresión FDM. A diferencia de otros trabajos que se enfocan exclusivamente en Cp y Cpk, los autores aplican seis índices de capacidad para evaluar el rendimiento global del proceso. Utilizando 50 muestras impresas en PLA bajo condiciones controladas y medidas conforme a la norma ASTM D638-10, identificaron patrones de desviación en longitud, ancho y espesor central de las probetas.

Sus resultados mostraron que, mientras algunas dimensiones se encontraban dentro de los márgenes de tolerancia, otras presentaban desalineación respecto al valor objetivo, evidenciado por bajos valores de Cpk y Cpm. Este enfoque detallado permitió no solo diagnosticar problemas de precisión, sino también proponer acciones correctivas basadas en evidencia cuantitativa.

Este mismo trabajo de Siraj & Bharti (2020) se distingue dentro de la literatura técnica al aplicar los seis índices clásicos de capacidad del proceso (Cp, Cpk, Cpl, Cpu, Cpm y Cpmk) sobre un entorno FDM controlado. En su estudio, se imprimieron 50 probetas tipo ASTM D638-10 utilizando PLA, bajo condiciones constantes. La novedad de su metodología radica en:

- Mantener constantes los parámetros de impresión.
- Evaluar tres dimensiones críticas: longitud, ancho y espesor central.
- Utilizar software de análisis estadístico (Minitab y Excel) para la caracterización de los resultados.

Los valores obtenidos para Cp indicaron una capacidad potencial aceptable en dos de las tres dimensiones, pero el valor de Cpk reveló un problema de descentrado en el proceso, es decir, una tendencia del sistema a no producir piezas centradas respecto al valor objetivo. Esto refuerza la utilidad de aplicar múltiples índices de capacidad para obtener un diagnóstico más completo que el proporcionado solo por Cp y Cpk (Siraj & Bharti, 2020).

4.1.10 Estudios Comparativos

Otros investigadores han abordado el análisis de precisión dimensional en impresoras FDM con diferentes enfoques. Singh (2014) evaluó el uso de PCA en componentes plásticos y destacó la necesidad de establecer entornos controlados para reducir la variabilidad. Ogden et al. (2015) aplicaron esta técnica en contextos médicos, mostrando cómo pequeñas alteraciones en la reconstrucción de modelos 3D pueden afectar significativamente la fidelidad dimensional.

En aplicaciones biomédicas, Olszewski et al. (2014) y Wu Ai-Min et al. (2015) aplicaron análisis comparativos entre modelos impresos y modelos reales escaneados mediante CBCT o tomografías. Sus conclusiones coinciden con las de Siraj & Bharti, en cuanto a la sensibilidad del proceso FDM a variables como temperatura, alineación y condiciones ambientales.

4.1.11 Aplicaciones de los Índices de Capacidad

Jeang (2010) y Chen & Tsai (2017) introdujeron modelos para la optimización de procesos mediante el uso de Cpm y Cpmk, demostrando que estos índices son más representativos cuando se desea minimizar la variabilidad respecto a un valor objetivo específico. Esto es especialmente relevante para la impresión de piezas funcionales, donde una leve desviación puede comprometer el desempeño.

4.1.12 Vacíos de Investigación y Oportunidades

A pesar de los avances mencionados, aún existen vacíos en el análisis de impresoras FDM de bajo costo, como la Creality Ender-3 S1 Pro. La mayoría de los estudios se centran en impresoras industriales o materiales distintos al ABS. En este sentido, la presente propuesta busca llenar este vacío mediante la aplicación del análisis de capacidad del proceso sobre ABS en una plataforma accesible, promoviendo el uso riguroso de herramientas estadísticas incluso en contextos no industriales.

4.1.13 Estudios relacionados con PCA en impresión FDM con ABS

Aunque el estudio de Siraj & Bharti utilizó PLA, existen investigaciones similares aplicadas específicamente al ABS. Por ejemplo, Singh (2014) llevó a cabo un análisis de capacidad en piezas FDM impresas con ABS, concluyendo que la temperatura de extrusión y la velocidad de impresión son las variables más sensibles en la variación dimensional. En su estudio se utilizó Cpk como índice principal, obteniendo valores cercanos a 1.0 para piezas con geometría sencilla, lo cual indicaba estabilidad moderada, pero margen de mejora.

Otro trabajo significativo es el de Rathore et al. (2022), quienes combinaron el análisis de capacidad con un diseño de experimentos tipo Taguchi, para optimizar las propiedades mecánicas del ABS. Sus hallazgos muestran que la orientación de impresión y el porcentaje de relleno tienen un efecto directo sobre la resistencia mecánica y la variabilidad del proceso. A través de sus índices de capacidad, identificaron que el Cpk del espesor era menor a 1, reflejando desviaciones sistemáticas provocadas por contracción térmica del material.

4.1.14 Estudios de precisión dimensional y PCA en impresoras de escritorio

Zhou et al. (2020) compararon impresoras FDM de bajo y medio costo utilizando ABS como material. Aunque no aplicaron PCA en sentido estricto, sus métricas dimensionales y análisis de desviación promedio pueden interpretarse como

herramientas pre-PCA. Encontraron que las impresoras de gama baja presentan una mayor dispersión en medidas críticas, especialmente en el eje Z, lo que valida la necesidad de aplicar PCA como herramienta formal de diagnóstico.

Por su parte, Zein et al. (2019) emplearon escáneres 3D para comparar piezas impresas con sus modelos CAD, aplicando análisis de desviación de forma y dimensión. Aunque su enfoque fue más metrológico que estadístico, sugieren que la implementación de PCA permitiría establecer criterios de aceptación más objetivos para aplicaciones funcionales.

4.1.15 Tendencias actuales y herramientas estadísticas en PCA

Hoy en día, el análisis de capacidad del proceso se aplica en la industria para controlar la calidad de forma predictiva, evitando la dependencia de la inspección post-impresión. Además de los índices tradicionales (Cp, Cpk), se están comenzando a aplicar indicadores como el Ppk (Performance index) y herramientas como ANOVA, regresión lineal múltiple y análisis de componentes principales (PCA multivariante).

Estas herramientas permiten considerar simultáneamente múltiples dimensiones y propiedades, por lo que se perfilan como una evolución natural del trabajo iniciado por Siraj & Bharti (2020). Investigaciones actuales también exploran cómo integrar sensores durante la impresión para recoger datos en tiempo real, lo cual permitiría aplicar PCA de forma dinámica (Zhang & Yang, 2009).

4.1.16 Implicaciones del análisis de capacidad en ABS para entornos industriales

Aplicar PCA en la impresión de ABS permite determinar no solo si un proceso es repetible, sino también si es viable para producción a escala. En industrias como la automotriz o biomédica, donde las tolerancias son estrechas, un proceso con Cpk < 1 se considera no conforme. Por tanto, los resultados obtenidos mediante estos análisis son clave para definir si una impresora como la Ender-3 S1 Pro puede ser utilizada más allá del prototipado (Olszewski et al., 2014).

Además, al trabajar con ABS —material más sensible a la variación térmica—, el análisis de capacidad se vuelve indispensable para validar cualquier ajuste de parámetros, diseño de boquillas o modificaciones en la cama de impresión.

4.2 MARCO TEORICO

4.2.1 Introducción a la Fabricación Aditiva

La Fabricación Aditiva (AM, por sus siglas en inglés) ha venido cambiando y revolucionado sus métodos tradicionales de manufactura ya que ha logrado la creación de geometrías que pueden llegar a ser complejas directamente desde modelos digitales, mediante la adición progresiva de material capa por capa, esto con el factor de diseño a gusto propio, probando diferentes modos y alternativas al momento de su creación. Esta tecnología, también llamada común mente como manufactura por capas, llega a presentar una ruptura con los métodos sustractivos convencionales, como lo vemos de manera directa y cercana como lo son el fresado o el torneado, puesto que no requiere de herramientas de corte ni moldes para su fabricación directa, reduciendo significativamente el desperdicio de material, diseño de las piezas antes de su fabricación y el tiempo de desarrollo de productos (Srinivasan et al., 2020).

El Modelado por Deposición Fundida (FDM) ha llegado a ser de las tecnologías más extendidas dentro de la AM debido a su accesibilidad, bajo costo que puede tener y facilidad de uso común entre la gente. Este proceso consiste en la extrusión de un filamento termoplástico fundido que se deposita de manera controlada sobre una superficie de construcción, donde va a formar capas que se solidifican inmediatamente. Su aplicación se ha extendido desde la creación de prototipos hasta la fabricación de piezas funcionales en sectores como la ingeniería, medicina, automotriz y aeroespacial (Saenz et al., 2021).

4.2.2 Tecnología FDM y Materiales

En el proceso FDM se llega a utilizar principalmente polímeros termoplásticos como materia prima. El Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) ha sido uno de los materiales más empleados en este campo, esto se debe a su equilibrio entre rigidez, resistencia al impacto y facilidad de procesamiento, permitiendo estar en un campo amplio para su uso. Por otro lado, el ABS se caracteriza por ser un copolímero amorfo, lo que nos permite una resistencia a productos químicos y con buena estabilidad dimensional, esto lo convierte en ser ideal para aplicaciones que requieren robustez mecánica y precisión geométrica (Srinivasan et al., 2020).

Sin embargo, esta misma evolución de los materiales utilizados en sector AM, se ha llegado hasta el punto donde se desarrollan compuestos que combinan polímeros con cargas metálicas, como lo son el acero inoxidable (SS), teniendo el fin de mejorar propiedades muy específicas como lo puede ser la conductividad térmica, la resistencia al desgaste o la rigidez de este. Un estudio realizado por (Mogan et al., 2024) evidenció que al incorporar polvo de acero inoxidable en concentraciones de 5% y 10% en peso al ABS, se logró un aumento elongación, teniendo como obstáculo una ligera disminución en la resistencia a la tracción, esto permitió resaltar la necesidad de buscar un equilibrio óptimo entre las propiedades mecánicas y funcionales en el entorno para el desarrollo de nuevos filamentos compuestos.

Propiedades Mecánicas del ABS Impreso.

Las propiedades mecánicas de las piezas impresas por FDM no solo tienen el reto de depender del material base, también están afectados por los parámetros de impresión que se lleguen a emplear durante el proceso. Estos parámetros son la altura de capa, la densidad de relleno, el patrón de rasterizado y la orientación de impresión, siendo variables críticas para afectar directamente la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad, la dureza superficial y la ductilidad (Saenz et al., 2021).

De (Srinivasan et al., 2020) se logra destacar que el grosor de capa y la densidad de relleno son parámetros altamente influyentes en los procesos de impresión. Esto

se debe a que una mayor densidad de relleno incrementa la resistencia del componente en cuestión, pero también conlleva mayores tiempos de fabricación junto con el consumo de material, evidenciando que afecta la eficiencia del proceso. Asimismo, la orientación de las capas genera una respuesta mecánica anisotrópica, siendo común que la resistencia sea mayor en la dirección de deposición y menor en dirección transversal, lo que representa un desafío para aplicaciones que demandan uniformidad estructural.

En contextos más exigentes, como ambientes criogénicos, también se ha observado un comportamiento diferencial del ABS. Según el estudio de (Saenz et al., 2021), la resistencia del ABS aumenta significativamente a temperaturas de 77 K, pero se vuelve más frágil. Esta información resulta útil para aplicaciones específicas, como componentes de sistemas de enfriamiento o estructuras sometidas a bajas temperaturas.

4.2.3 Precisión Dimensional y Parámetros Críticos

La precisión dimensional en piezas impresas por FDM es un aspecto clave cuando se requiere ensamblaje con otros componentes o se opera bajo tolerancias estrictas. Esta precisión está influenciada por múltiples variables, entre las que destacan la altura de capa, el flujo del extrusor, la velocidad de impresión, la temperatura de la boquilla y de la cama de impresión, así como el tipo de material utilizado (Srinivasan et al., 2020).

Errores comunes como la contracción, el warping (deformación por tensiones térmicas) y la delaminación pueden comprometer seriamente la exactitud de las dimensiones, afectando la funcionalidad final del producto. La implementación de técnicas estadísticas y experimentales, como el diseño de experimentos (DoE), permite identificar y optimizar los parámetros críticos que afectan la calidad dimensional. (Siraj & Bharti, 2020) recomiendan el uso de herramientas como el análisis de causa y efecto, así como pruebas repetidas bajo condiciones controladas para garantizar la confiabilidad del proceso.

4.2.4 Análisis de Capacidad del Proceso (PCA)

El Análisis de Capacidad del Proceso (PCA) es una herramienta esencial en la ingeniería de calidad que permite determinar si un proceso es capaz de producir piezas dentro de los límites de especificación establecidos. En la manufactura aditiva, donde la variabilidad puede ser considerable debido a factores térmicos, geométricos y materiales, el PCA ofrece una metodología cuantitativa para evaluar la estabilidad y precisión del proceso (Siraj & Bharti, 2020).

Los índices Cp y Cpk miden la capacidad potencial y real del proceso, respectivamente, mientras que Cpm y Cpmk introducen penalizaciones por sesgo respecto al valor objetivo. La aplicación de estos índices en impresoras FDM ha permitido identificar patrones de variabilidad y ajustar los parámetros de operación para lograr procesos más robustos. Este enfoque resulta especialmente útil en entornos de producción donde se requiere repetibilidad y confiabilidad en piezas impresas en serie.

4.2.5 Anisotropía en piezas FDM y su impacto mecánico

Una de las características más particulares de las piezas fabricadas mediante FDM es la anisotropía inducida por capas. A diferencia de los materiales convencionales, donde las propiedades mecánicas suelen ser isotrópicas, las piezas impresas en 3D presentan una notable diferencia de resistencia entre los ejes XY (planos) y el eje Z (vertical). Esta diferencia surge por la manera en que se depositan y fusionan las capas, siendo más débiles en la dirección perpendicular al plano de impresión (Ngo et al., 2018).

Diversos estudios han demostrado que las uniones inter-capa son el punto crítico en ensayos de tracción y flexión, lo que implica que cualquier evaluación mecánica debe considerar la orientación de impresión como variable principal (Zhou et al., 2020).

4.2.6 Estandarización y normativas aplicadas a la impresión 3D

Para garantizar resultados confiables en investigación y desarrollo, es necesario aplicar normativas internacionales, como la ASTM D638 para ensayos de tracción en plásticos o la ISO 22514 para análisis de capacidad del proceso. El cumplimiento de estas normas no solo permite la reproducibilidad de los ensayos, sino que facilita la comparación con otros estudios técnicos (Siraj & Bharti, 2020). En el caso particular del análisis de capacidad, los índices Cp, Cpk, Cpm y Cpmk solo tienen validez comparativa cuando los datos provienen de mediciones con instrumentos calibrados y con condiciones de proceso controladas (Kotz & Johnson, 2002).

4.2.7 Evaluación metrológica de piezas impresas

La metrología dimensional en impresión 3D es una herramienta crítica para validar la conformidad de las piezas respecto a su diseño CAD original. Esta puede realizarse a través de instrumentos tradicionales como el pie de rey, pero también mediante escáneres 3D que permiten análisis por superposición con el modelo digital (Zein et al., 2019).

Además de evaluar desviaciones en magnitudes lineales, los análisis de forma, planitud, paralelismo y concentricidad han sido aplicados para piezas impresas en ABS, especialmente cuando se busca sustituir piezas funcionales de productos industriales.

4.2.8 Comparación entre PLA y ABS en contextos de impresión doméstica

Aunque el PLA se considera más fácil de imprimir, el ABS ofrece ventajas mecánicas significativas, como mayor tenacidad, mejor comportamiento ante impactos y mayor estabilidad térmica. No obstante, estas ventajas requieren condiciones térmicas más controladas durante el proceso, ya que el ABS es más propenso a deformaciones por contracción (Mogan et al., 2024).

Por esta razón, muchos estudios como el de Rathore et al. (2022) han propuesto estrategias como el uso de adhesivos, carcasas cerradas y calentamiento uniforme para mejorar la estabilidad dimensional del ABS en impresoras abiertas como la Ender-3 S1 Pro.

4.2.9 Relevancia del análisis estadístico para la validación de procesos FDM

El uso de estadísticas descriptivas y herramientas como el análisis de varianza (ANOVA), la desviación estándar y el error relativo permite comprender no solo la calidad de una muestra puntual, sino el comportamiento general del sistema de impresión. Siraj & Bharti (2020) demostraron que solo mediante análisis estadístico avanzado es posible identificar la dirección en que se debe centrar un proceso, especialmente cuando se observa una dispersión significativa respecto al valor objetivo.

El empleo de software como Minitab o Excel, combinado con metodologías como el diseño factorial o el análisis multivariable, permite reducir la variabilidad de los resultados y mejorar la capacidad global del sistema.

5. METODOLOGÍA

Para este caso de estudio, se utilizó una herramienta de uso común en el ámbito de la construcción, como lo llega a ser una llave para tubos, la cual es una herramienta utilizada para sujetar, apretar o dependiendo de su necesidad, ayuda también para aflojar objetos metálicos redondeados, como lo pueden ser tubos, pernos y varillas.

Para este caso la llave estará compuesta de una mordaza de gancho superior y talón inferior, las cuales estarán soportadas por un mango plano. De la misma manera tendrá como es de conocimiento general un apartado de dientes pequeños o ranuras cumpliendo la función de ayudar a sujetar la pieza en cuestión, podríamos identificarla como mandíbula, ese recorrido lo lograremos.

5.1 DISEÑO DE PROBETAS

Piezas	Dimensión crítica	Función
Mordaza móvil	Ancho, largo y espesor	Encargada de abrir o cerrar la llave y ajustar el agarre de la pieza a sujetar
Tuerca de ajuste	Diámetro exterior, diámetro interno y espesor	Mueve la mordaza móvil y regula la apertura de la llave.
Carcasa	Ancho, largo, espesor, cavidad interna tuerca ancho, cavidad interna tuerca largo, cavidad interna tuerca espesor, cavidad interna mordaza móvil Largo, cavidad interna mordaza móvil y espesor	Cuerpo principal de la llave, donde se apoyan y ensamblan la mordaza móvil y la tuerca de ajuste
Mango (o cuerpo de la llave)	Ancho superior, ancho inferior, largo, espesor superior y espesor medio	Sujeta la llave y soporte al aplicar la fuerza necesaria al girarla.
Cremallera	Ancho y espesor	Permite el desplazamiento controlado de la mordaza móvil al engranar con la tuerca de ajuste.

Tabla 2.Medidas críticas, piezas y su función

En este estudio, se utilizó el programa SolidWorks para realizar el modelado de la llave de tubos como una herramienta funcional en estas partes móviles. Esto se realizó con el fin de llegar a evaluar la capacidad del proceso de FDM en el aspecto dimensional, logrando reproducciones precisas y exactas de la geometría puesta en el diseño requerido, uno de los propósitos es querer encontrar qué tan complejo llega a ser si se desea lograr tolerancias funcionales, yendo más allá de probetas convencionales.

Para conseguirlo, se tiene que definir unas tolerancias críticas en el diseño a cada pieza de ensamblaje, ya que dependerán de la precisión dimensional que se logre en el proceso de impresión con la impresora Creality, cumpliendo con las expectativas ya sean mínimas requeridas en el proceso.

La base principal son los aspectos críticos, puesto que cuentan con una relevancia dimensional considerable, además de que representan diferentes tipos de geometrías, como lo son interiores, exteriores, longitudinales y roscadas.

En este caso se utilizó como material base el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), un termoplástico empleado comúnmente en el área del modelado por deposición fundida (FDM), esto de la mano a que es de fácil acceso, resistente al impacto y la temperatura, cuenta con durabilidad prolongada, permitiendo que el material no tienda a desgastarse de manera pronta en comparación a otros plásticos y por supuesto, sin dejar de lado que llega a ser un material el cual permite variar de diferentes maneras la estructura de la geometría en cuestión, logrando acabados lisos y brillantes, siendo resultados deseables por su ergonomía para esta aplicación junto con la industria en general(Llave de tubos).

Para tener en cuenta las dimensiones de cada pieza, se tienen en cuenta las dimensiones de cada pieza impresa, para esto se toman 7 partes, las cuales al momento de ensamblar comprenderán toda la llave para tubos, estas son:

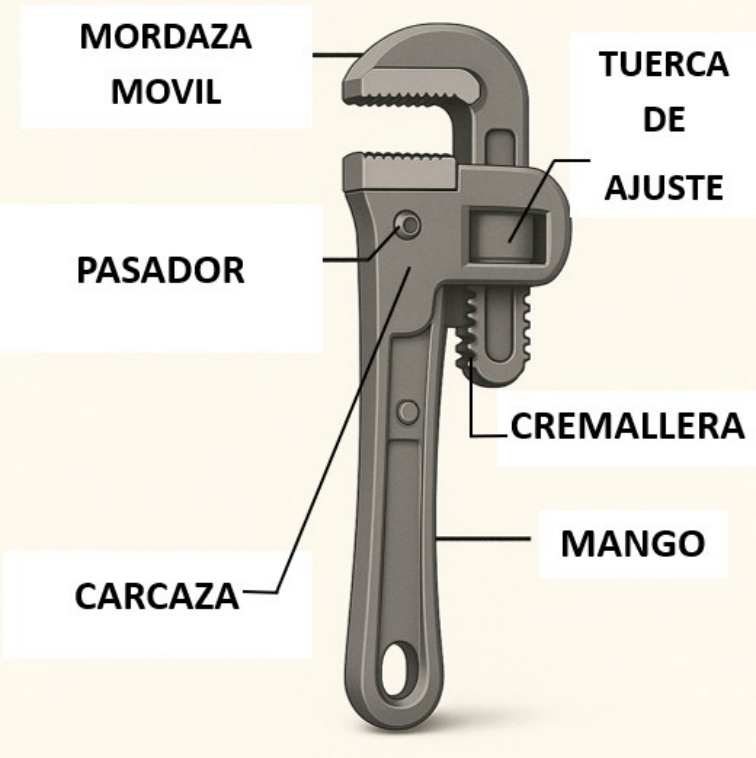


Ilustración 1. Partes de la Llave para tubos

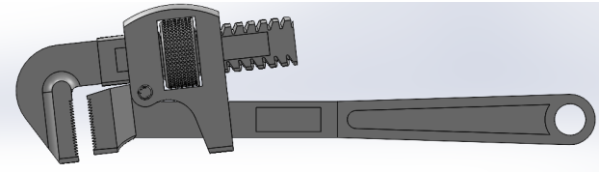


Ilustración 2. *Isométrico Llave de tubos*

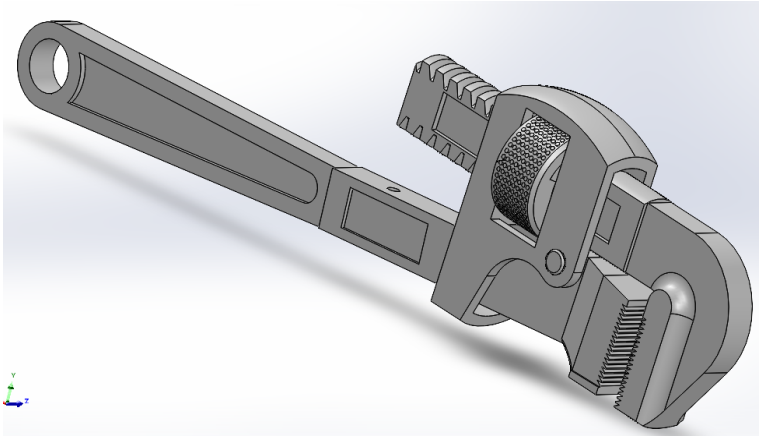


Ilustración 3. *Isométrico Llave de tubos*

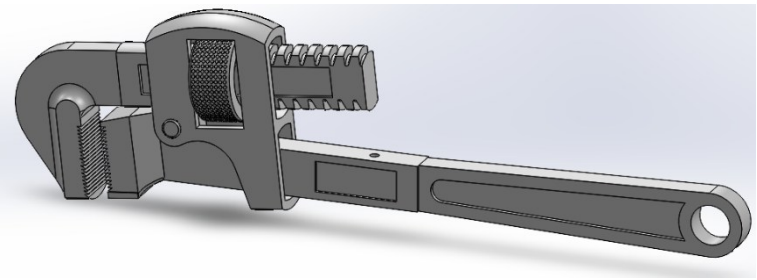


Ilustración 4. *Isométrico Llave de tubos*

5.1.1 Mordaza Móvil y Cremallera

En el ensamble de la llave para tubos se requiere una pieza móvil que proporcione el ajuste necesario para sujetar y acoplarse, mediante la cremallera, al elemento que se desea fijar, esto funciona por medio del paso roscado presente en la cremallera, ajustándose por medio de la tuerca de ajuste.

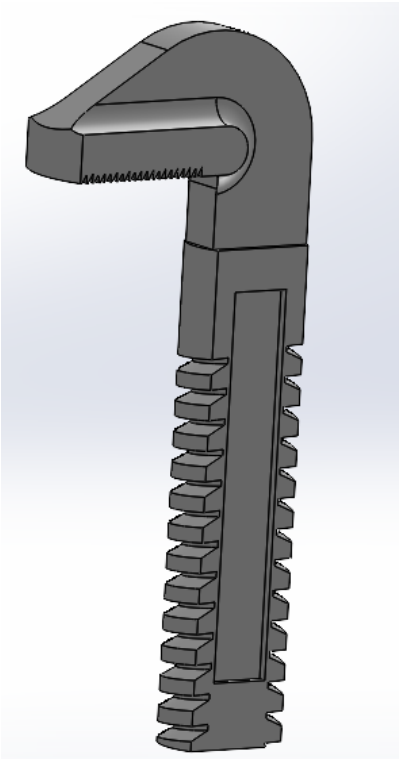


Ilustración 5. Modelado SolidWorks Mordaza Móvil-Cremallera

Con el fin de garantizar los estándares mínimos y realizar un debido análisis dimensional, se modelo en el programa solid works la mordaza móvil junto con la

sección de cremallera (ver figura 5), donde se definieron las dimensiones correspondientes a la pieza en cuestión, detallado en el plano (ver figura 6) (ver detallado en anexo A), en este mismo se representan los parámetros que debe cumplir la pieza al momento de su impresión.

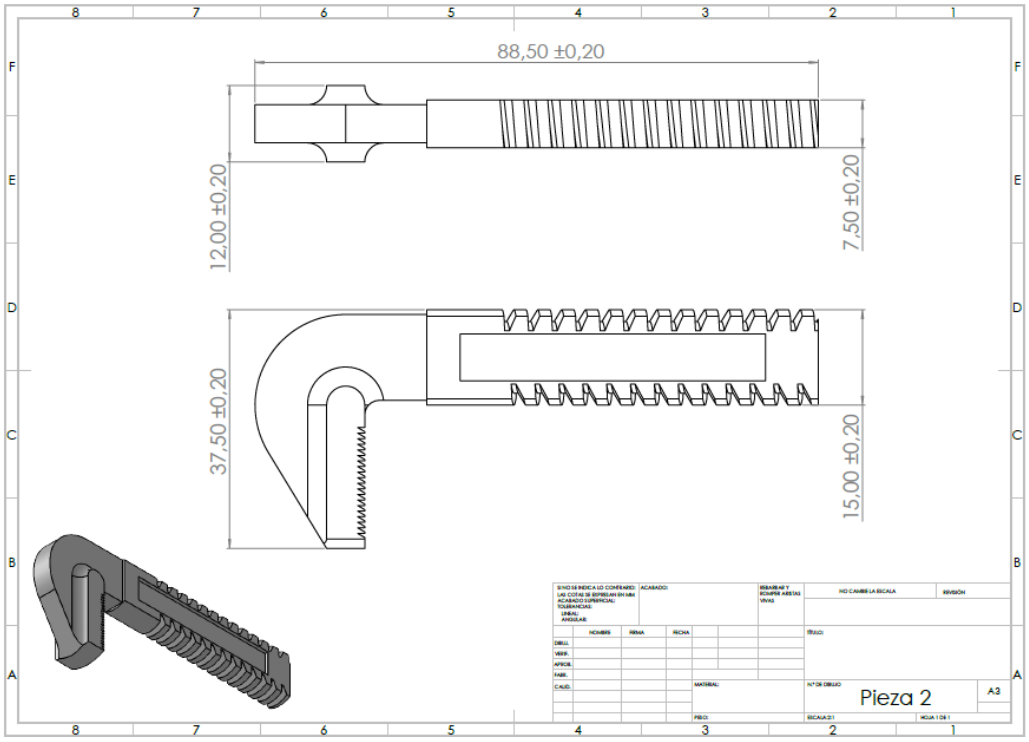


Ilustración 6. *Plano Mordaza Móvil-Cremallera*

5.1.2 Mordaza fija y Mango

La parte fija de la llave, será la encargada de brindar rigidez estructural, puesto que en el mango es el elemento donde se realizar la fuerza necesaria para ajustar o aflojar el objeto de trabajo. Para este propósito, necesitaremos de una mordaza ubicada en la parte superior del mango, permitiendo darle el agarre a la pieza fijada en conjunto con la parte móvil. Esta incorpora una abertura por donde atraviesa el pasador, permitiendo la unión de la carcasa con la parte fija de la llave.

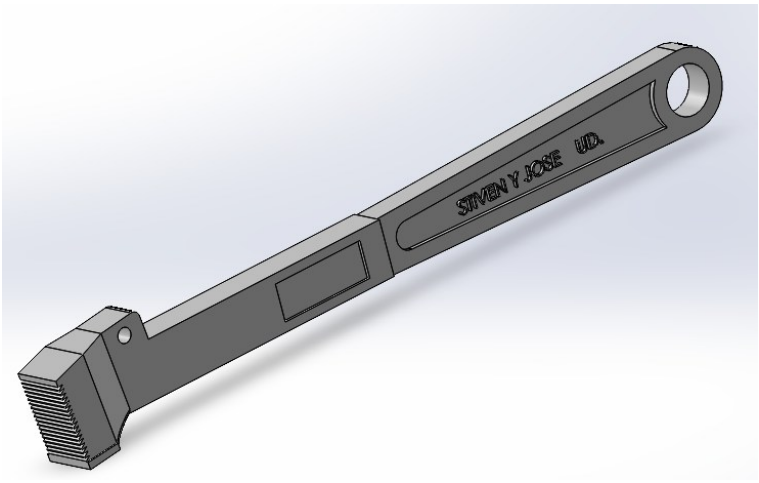


Ilustración 7. *Modelado SolidWorks Mango-Mordaza Fija*

Al igual que en el caso de la mordaza móvil y la cremallera, esta pieza debe cumplir con unos parámetros dimensionales mínimos, donde al momento de ensamblarla, brinde estabilidad y ergonomía en su funcionamiento. Dichos requisitos se encuentran definidos a continuación. (ver ilustración 8) (ver detallado en anexo A)

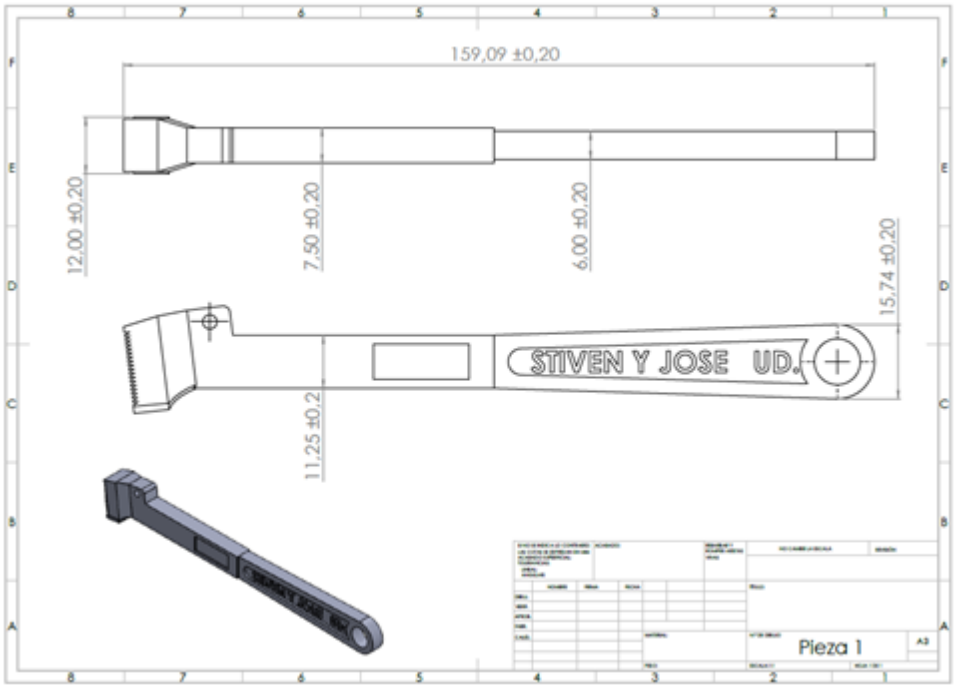


Ilustración 8. *Plano Mango-Mordaza Fija*

5.1.3 Tuerca de Ajuste

El sistema de cremallera se caracteriza por permitir el movimiento libre de la mordaza móvil y, al mismo tiempo, proporcione el ajuste necesario para la sujeción de ambas mordazas. La tuerca de ajuste cumple la función de guiar, mediante su roscado interno, el desplazamiento controlado de la parte móvil, dándole aseguramiento en la firmeza del agarre, esto se hace con el fin de evitar que retroceda la parte móvil y pierda fuerza de agarre. (ver figura 9)

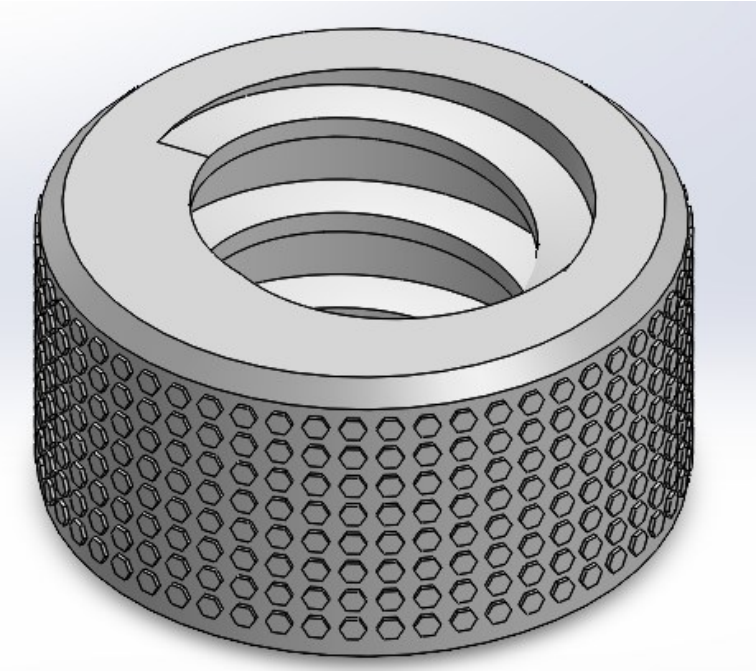


Ilustración 9. *Modelado Tuerca de Ajuste*

La tuerca debe cumplir con algunos parámetros que garanticen un ajuste optimo en el montaje para cualquier elemento, entre ellos se encuentra el paso roscado interno, la altura necesaria para ajustarse al espacio de la carcasa y el diámetro externo para no ser una pieza estorbosa. Así mismo el patrón en forma de panales se da para darle mayor agarre al momento deslizar la tuerca. Las dimensiones críticas de esta pieza se presentan en el plano correspondiente (ver figura 10) (ver detallado en anexo A) el cual establece los valores que deben cumplirse durante la impresión para garantizar un funcionamiento correcto.

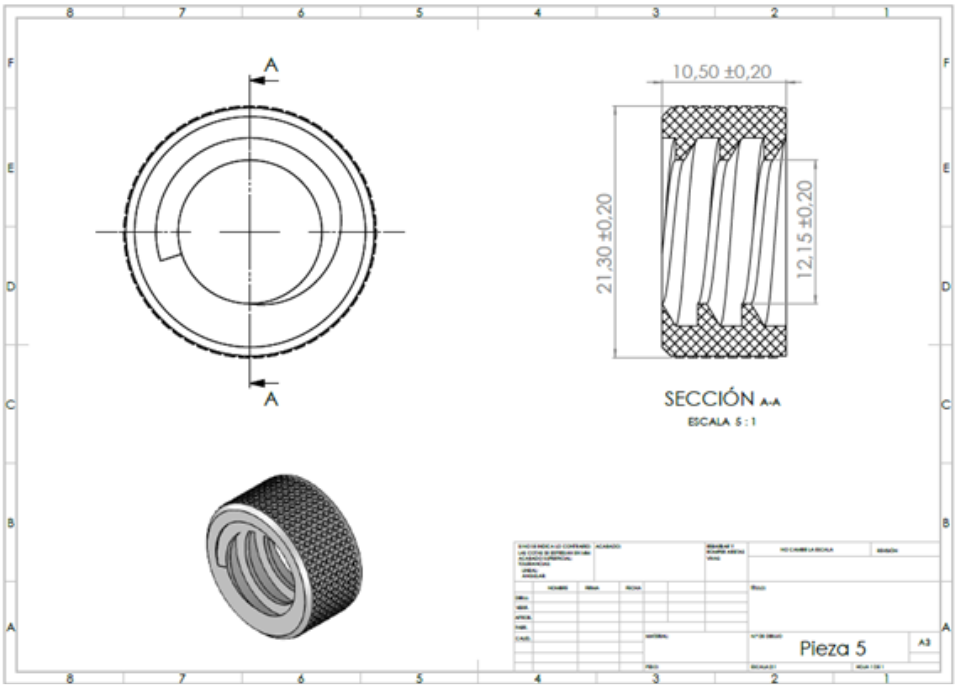


Ilustración 10. *Plano Tuerca de Ajuste*

5.1.4 Carcasa

La carcasa es aquella que permite a la llave unir ambas mordazas, de esta de manera se introduce la parte móvil a través de la sección con extrusión horizontal, donde se ubicará la tuerca de ajuste, de esta manera, la cremallera quedará sujeta y puede desplazarse de forma controlada dentro del sistema.

Una vez establecido lo anterior, la parte fija se posiciona al costado izquierdo de la parte móvil y queda asegurada por medio de un pasador, de manera que atraviesa los agujeros ubicados en la parte fija y en la carcasa, esto para unir ambas piezas y darles estabilidad (ver figura 11)

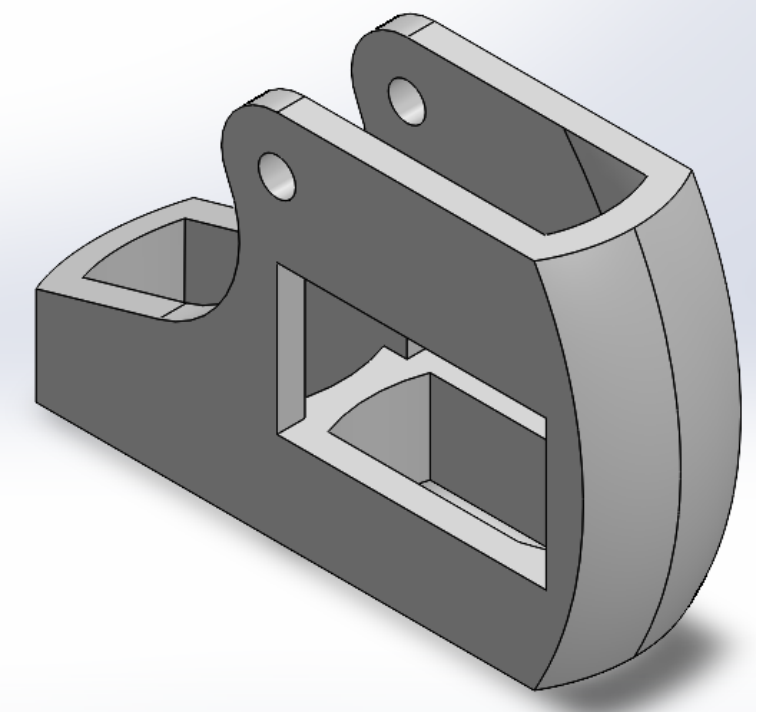


Ilustración 11. *Modelo Carcasa*

Esta carcasa, debe cumplir con diversas consideraciones dimensionales, entre ellas se encuentra el espacio necesario para que puedan entrar ambas mordazas, la sección destinada a la rosca que debe permitir un movimiento suave y seguro, así como los orificios de paso de los pasadores, los cuales aseguran la estabilidad total de la llave. (ver figura 12) (ver detallado en anexo A)

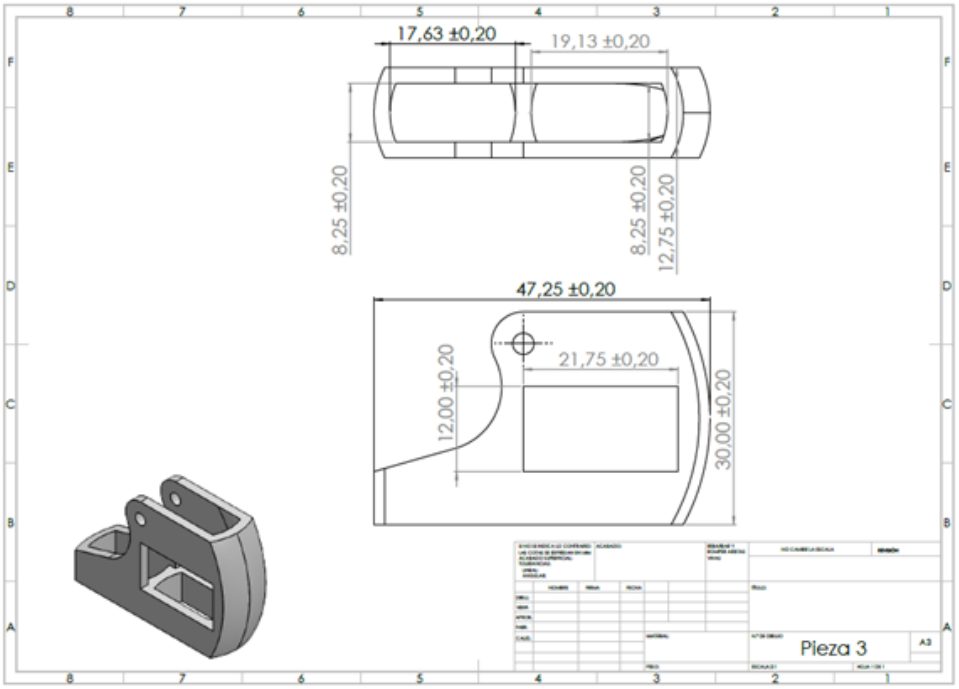


Ilustración 12. *Plano Carcasa*

5.1.5 Pasador

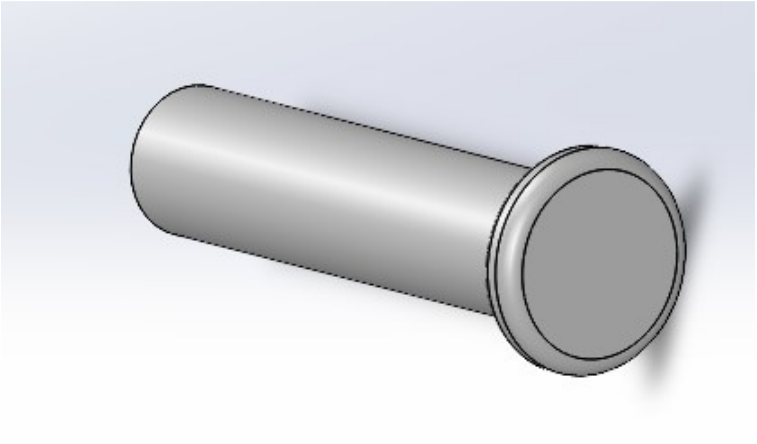


Ilustración 13. *isométrico Pasador*

El pasado será aquel elemento que le brindará estabilidad y unión entre la carcasa y el mango, esto de forma que mantendrá ambas partes unidas.

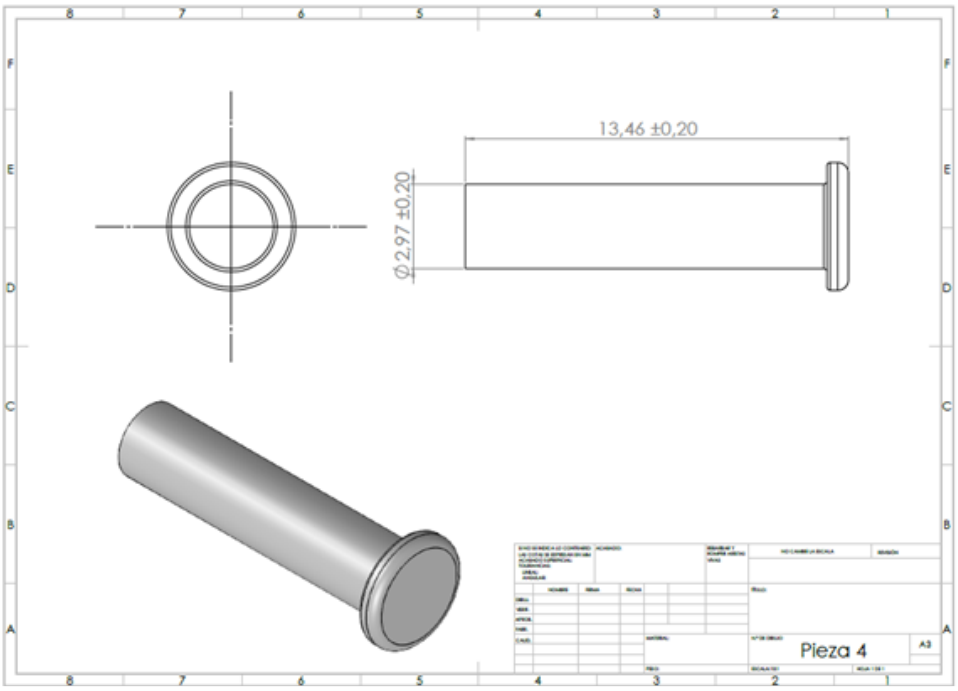


Ilustración 14. *Plano Pasador*

5.2 ENSAYOS MECÁNICOS SEGUN NORMA ASTM APLICABLES AL ABS

Con el fin de dar cumplimiento al objetivo de realizar ensayos mecánicos siguiendo normas ASTM, se identificaron los estándares internacionales aplicables a polímeros termoplásticos como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Asimismo, se evaluaron a profundidad todas y cada una de las variables en estudios previos de comportamientos mecánicos, se documentaron los procedimientos estandarizados que dichas normas establecen y se recopilaron valores de referencia reportados en la literatura técnica y en fichas de materiales.

De esta manera, el trabajo se mantiene en relación con los requisitos de estandarización internacional, asegurando que la caracterización mecánica del ABS impreso en 3D pueda compararse con estudios previos y futuras investigaciones que apliquen estos mismos protocolos (ASTM International, 2014; Callister & Rethwisch, 2020).

La aplicación de ensayos mecánicos normalizados resulta esencial para validar el comportamiento del ABS en procesos de impresión 3D, ya que permite comparar

los resultados obtenidos con parámetros de referencia internacionalmente aceptados. Las normas ASTM proporcionan metodologías estandarizadas que aseguran la repetibilidad y confiabilidad de los datos, eliminando sesgos derivados de variaciones experimentales no controladas.

En este contexto, la elección de normas ASTM aplicables al ABS justifica la pertinencia del estudio, al garantizar que las propiedades mecánicas evaluadas (como resistencia a la tracción, dureza y módulo elástico) puedan ser cotejadas con valores reportados en la literatura técnica y en fichas de materiales. De esta manera, se fortalece la validez del análisis y se asegura la posibilidad de extrapolar los resultados hacia aplicaciones industriales y académicas.

NORMAS ASTM APLICABLES AL ABS

A continuación, se presentan las principales normas ASTM empleadas para la evaluación de propiedades mecánicas en plásticos como el ABS:

Norma ASTM	Ensayo	Propiedades evaluadas	Forma de la probeta	Valores típicos de ABS*
ASTM D638-14	Tracción	Resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, elongación a la rotura	Probeta tipo "dog-bone" (hueso de perro)	Resistencia: 40–50 MPa; Módulo: 1.8–2.5 GPa; Elongación: 10–50 %
ASTM D790-17	Flexión en 3 puntos	Resistencia a la flexión, módulo de flexión	Barra rectangular (127 × 12.7 × 3.2 mm aprox.)	Resistencia: 60–80 MPa; Módulo: 2–2.5 GPa
ASTM D256-10 / ASTM D6110-18	Impacto	Tenacidad al impacto	Probeta con entalla en V	150–300 J/m
ASTM D2240-15	Dureza Shore D	Dureza superficial	Muestra plana ≥ 6 mm de espesor	70–80 Shore D

Tabla 3. *Ensayos mecánicos normalizados ASTM y valores de referencia para ABS*

Es importante resaltar que los valores presentados en la Tabla 3. corresponden a datos de referencia reportados en literatura técnica y fichas de materiales de ABS, por lo cual pueden variar en función del fabricante, el grado del polímero y las condiciones de impresión 3D empleadas. La inclusión de estas normas ASTM garantiza que el análisis metodológico se mantenga alineado con los estándares internacionales de caracterización mecánica.

5.3 PROCESO DE IMPRESIÓN

El proceso se llevará a cabo gracias a la impresora 3d creality ender-3 s1 pro, una impresora FDM de escritorio ampliamente utilizada en entornos académicos y semiindustriales, ubicada en la Universidad Distrital Francisco José de caldas – Sede tecnológica, donde se logrará imprimir las partes requeridas (Llave para tubos) con el fin de evaluar la capacidad del proceso para el ABS. La impresora cuenta con un extrusor directo (llamado "Sprite"), una boquilla capaz de soportar altas temperaturas y demás componentes que permitirán hacer la deposición

fundida de diferentes materiales como lo son el ABS, PLA, PETG y TPU. Esta misma tendrá las siguientes especificaciones: (ver tabla 4)

Especificación	Valor
Volumen de construcción	220 mm × 220 mm × 270 mm
Dimensiones externas	490 mm × 455 mm × 625 mm
Diámetro del filamento	1.75 mm
Diámetro de la boquilla	0.4 mm (intercambiable hasta 0.6 mm)
Temperatura máxima de boquilla	240 °C
Temperatura máxima de cama	70 °C
Velocidad de impresión	hasta 35 mm/s (óptimo recomendado: 60 mm/s)
Altura de capa	0.20 mm
Porcentaje de relleno	100 % (por tratarse de una herramienta funcional)
Orientación	horizontal con apoyo parcial, evitando soportes en zonas críticas
Tipo de extrusor	Direct Drive “Sprite” Dual Gear
Nivelación de cama	Automática CR-Touch (sensor óptico)
Plataforma de impresión	Cama magnética PEI texturizada
Interfaz	Pantalla táctil a color de 4.3 pulgadas
Conectividad	Tarjeta SD, puerto USB-C
Software de laminado	Cura, Creality Slicer, PrusaSlicer
Sistema operativo	Firmware Marlin personalizado (Open Source)

Tabla 4. *Parámetros de Impresión*

La impresora en cuestión fue seleccionada gracias a su gran compatibilidad con filamentos como lo son el ABS, esto debido a la capacidad que tiene para alcanzar temperaturas elevadas junto con su fácil calibración. Otro punto a su favor es que el extrusor directo facilita la extrusión uniforme de materiales técnicos, llegando a ser crucial para mantener la consistencia dimensional en piezas funcionales como lo son en nuestro caso la llave para tubos.

Para determinar los índices de la capacidad de proceso (índices Cp, Cpk, Cpm, Cpmk) en la llave, se tendrá que definir una muestra respectiva y suficiente para

llegar a estimar la medida y variabilidad del proceso. Basados en este hecho, consultando a través de diferentes medio y portales (Montgomery, D. C. (2009). Introduction to Statistical Quality Control) recomienda n ≥ 15 como mínimo para análisis exploratorio o procesos en fase de estudio en la industria, siendo la cantidad mínima aceptada para PCA preliminar, esto sujeto a limitaciones de tiempo, costos del material y un buen análisis.

Para llegar a confirmar esta cifra, se hace un cálculo basado en el error estándar, esto con el fin de justificar el tamaño de la muestra, de manera que se utiliza el error estándar de la media (EEM), permitiendo indicar que tan precisa puede llegar a ser la estimación del promedio para las mediciones. Esta fórmula será la siguiente:

$$EEM = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

σ: Desviación estándar

EEM: Error estándar de la media

$\sqrt{n}$: Número de muestras

En donde se tiene como primera prueba piloto una toma de muestra de 5 piezas: por tanto, se define como σ=0.12 mm (donde es la desviación estándar) para tener como punto de apoyo que el error estándar no puede superar una tolerancia critica mínima de hasta 0.03 mm, esto con el objetivo de tener buena precisión en la estimación promedio.

Por tanto, tenemos que:

$$0.03 = \frac{0.12}{\sqrt{n}} \quad \text{===>} \quad \sqrt{n} = \frac{0.12}{0.03} \quad \text{===>} \quad \sqrt{n} = 4$$

$$\text{====>} \quad n = 16$$

Con base en este análisis se puede apreciar que basta con un número de 16 muestras, esto con el fin de tener una estimación promedio con un error máximo

de hasta 0.03mm (esto se logra comprobar con el escáner laser) siendo una tolerancia razonable al estar enfocándonos en el área de en la impresión 3D, para el caso con ABS. Esto para todas aquellas medidas críticas consideradas en los planos para cada elemento. Esta cantidad se basa en recomendaciones establecidas por Montgomery (2009) donde se llega a sugerir un tamaño mínimo de 15 muestras para obtener estimaciones que brinden confiabilidad de la media y la variabilidad del proceso en análisis preliminares de Cp, Cpk, Cpm y Cpmk, siendo soportado por el análisis anteriormente calculado.

Según investigaciones como lo son el artículo de investigación (Siraj & Bharti, 2020), se llegaron a usar 50 piezas debido a la baja complejidad de impresión para las probetas y cantidad de recursos a su disposición, pero se reconoce que análisis preliminares pueden hacerse con una cantidad menor ($n \geq 15$) teniendo en cuenta tiempos de impresión, disponibilidad de la máquina de impresión, junto con los recursos disponibles para el análisis de esta llave para tubos.

Desde otros puntos de vista, como lo son en estudios de validación de procesos FDM con ABS (Singh, 2014; Rathore, 2022), se llegan a utilizar entre 12 y 20 muestras, con el fin de evaluar de manera precisa y directa cada dimensión critica por separado definida por ellos mismos.

5.4 MEDICIÓN DIMENSIONAL

Con el propósito de evaluar la exactitud dimensional del proceso de manufactura aditiva, se definieron un conjunto de dimensiones críticas en la probeta. La pieza seleccionada corresponde a una llave para tubos, dividida en siete partes que, una vez ensambladas, constituyen el sistema completo. Cada una de estas partes fue sometido a un análisis dimensional independiente, con el fin de comparar las dimensiones obtenidas mediante la impresión 3D con las dimensiones nominales establecidas en el modelo CAD.

Las partes consideradas para la verificación dimensional fueron:

- Mordaza móvil
- Tuerca de ajuste

- Carcasa
- Cremallera
- Mango

En cada parte se identificaron y midieron las dimensiones críticas previamente definidas, utilizando los instrumentos de medición seleccionados (calibrador pie de rey 0,01mm, micrómetro 0,01mm y escáner 3D) y posteriormente se hace la comparación de las medidas obtenidas con las nominales del diseño CAD.

5.4.1 MEDICIÓN DIMENSIONAL CON PIE DE REY 0.01mm DIGITAL

Se realizo la verificación de las dimensiones críticas de cada una de las partes anteriormente mencionadas, a continuación, se muestran cuáles son las medidas seleccionadas para el análisis de cada pieza:

- Mordaza móvil--ancho, largo y espesor.
- Tuerca de ajuste--diámetro exterior, diámetro interior y espesor.
- Carcasa--ancho, largo, espesor, cavidad interna de la tuerca ancho, cavidad interna de la tuerca largo, cavidad interna de la tuerca espesor, cavidad interna de la mordaza móvil largo, cavidad interna de la mordaza móvil espesor.
- Cremallera--ancho y espesor
- Mango--ancho superior, ancho inferior, largo, espesor superior y espesor inferior.

A continuación, en la tabla 5, se presentan algunos de los resultados obtenidos en el proceso como fueron las primeras 5 lecturas.

PARTE	DIMENSIONES	LECTURA 1	LECTURA 2	LECTURA 3	LECTURA 4	LECTURA 5
Mordaza movil	Ancho	37,62	37,51	37,72	37,65	37,47
	Largo	88,33	88,27	88,27	88,62	88,62
	Espesor	12,00	11,99	11,91	11,97	11,72
Tuerca de ajuste	Diametro exterior	21,12	21,08	21,18	21,15	21,12
	Diametro interior	11,96	12,05	12,14	12,11	12,07
	Espesor	10,71	10,76	10,63	10,83	10,60
Carcasa	Ancho	47,05	47,02	46,94	46,98	46,93
	Largo	30,12	30,16	30,08	30,18	29,92
	Espesor	12,77	12,70	12,82	12,87	12,80
	Cavidad interna tuerca ancho	21,72	21,80	21,77	21,77	21,66
	Cavidad interna tuerca largo	11,96	11,88	11,97	12,09	11,99
	Cavidad interna tuerca espesor	8,13	8,03	8,15	8,19	8,08
	Cavidad interna mordaza movil Largo	17,53	17,54	17,50	17,43	17,52
	Cavidad interna mordaza movil Espesor	8,24	8,38	8,20	8,19	7,98
Cremallera	Ancho	15,04	15,01	15,03	15,01	15,02
	Espesor	8,10	7,90	7,88	7,90	7,96
Mango	Ancho Superior	11,19	11,29	11,05	11,10	11,05
	Ancho Inferior	15,58	15,64	15,56	15,61	15,61
	Largo	158,88	158,72	158,48	159,06	158,86
	Espesor superior	11,38	11,40	11,36	11,33	11,35
	Espesor inferior	7,78	7,65	7,66	7,63	7,73

Tabla 5. *Resultados resumidos de las mediciones con calibrador pie de rey*
Nota: Las tablas completas con todas las lecturas se incluyen en el Anexo B

5.4.2 MEDICIÓN DIMENSIONAL CON MICROMETRO 0.01mm ANÁLOGO

De igual manera, se realizó la verificación dimensional de las partes usando un micrómetro, con el objetivo de obtener una mayor precisión en algunas dimensiones críticas como lo son:

- Mordaza Superior--Espesor
- Tuerca de ajuste –-Diámetro exterior y espesor
- Carcaza--Espesor

- Cremallera--Ancho y espesor
- Mango--Ancho superior, ancho inferior, espesor superior y espesor inferior

PARTE	DIMENSIONES	LECTURA 1	LECTURA 2	LECTURA 3	LECTURA 4	LECTURA 5
Mordaza Movil	Espesor	12,02	12,01	12,03	12,02	12,00
Tuerca de ajuste	Diametro exterior	21,14	21,14	21,14	21,16	21,16
	Espesor	10,70	10,70	10,69	10,70	10,67
Carcasa	Espesor	12,78	12,78	12,79	12,78	12,78
Cremallera	Ancho	15,06	15,07	15,08	15,07	15,07
	Espesor	8,12	7,92	7,30	7,50	8,00
Mango	Ancho Superior	11,17	11,17	11,16	11,16	11,16
	Ancho Inferior	15,59	15,59	15,59	15,60	15,57
	Espesor superior	11,40	11,39	11,41	11,41	11,40
	Espesor inferior	7,79	7,80	7,79	7,79	7,78

Tabla 6. *Resultados resumidos de las mediciones con micrómetro*

En la Tabla 6 se muestran las primeras lecturas obtenidas como parte de resumen. Las tablas completas se encuentran en el Anexo B.

5.4.3 MEDICIÓN DIMENSIONAL CON ESCÁNER 3D FREESCAM COMBO SERIES

Para la medición dimensional final, se realiza un proceso de escaneo 3D de las piezas. Este proceso permite obtener una tercera base de datos que ayuda a tener un mejor abordaje en la sección de análisis de la capacidad del proceso, además que permite tener un esquema CAD diferente al del diseño creado. Se tienen en cuenta las siguientes dimensiones criticas:

- Mordaza móvil--ancho, largo y espesor.
- Tuerca de ajuste--diámetro exterior, diámetro interior y espesor.
- Carcaza--ancho, largo, espesor, cavidad interna de la tuerca ancho, cavidad interna de la tuerca largo, cavidad interna de la tuerca espesor, cavidad interna de la mordaza móvil largo, cavidad interna de la mordaza móvil espesor.

- Cremallera--ancho y espesor
- Mango--ancho superior, ancho inferior, largo, espesor superior y espesor inferior.

A continuación, en la tabla 7, se presentan algunos de los resultados obtenidos con las primeras mediciones.

PARTE	DIMENSIONES	LECTURA 1	LECTURA 2	LECTURA 3	LECTURA 4
Mordaza movil	Ancho	36,29	36,22	36,38	36,27
	Largo	87,15	87,21	87,09	87,18
	Espesor	11,85	11,87	11,92	11,87
Tuerca de ajuste	Diametro exterior	21,06	20,97	20,98	21,06
	Diametro interior	12,32	12,29	12,28	12,46
	Espesor	11,47	11,57	11,52	11,49
Carcasa	Ancho	46,68	46,53	46,59	46,74
	Largo	29,84	29,81	29,83	29,97
	Espesor	12,9	12,98	12,85	12,82
	Cavidad interna tuerca ancho	21,29	21,24	21,27	21,23
	Cavidad interna tuerca largo	12,19	12,15	12,02	12,29
	Cavidad interna tuerca espesor	8,34	8,33	8,23	8,29
	Cavidad interna mordaza movil Largo	16,59	16,68	16,55	16,59
	Cavidad interna mordaza movil Espesor	8,48	8,44	8,54	8,54
Cremallera	Ancho	14,69	14,66	14,68	14,74
	Espesor	7,63	7,60	7,63	7,74
Mango	Ancho Superior	11,29	11,42	11,33	11,38
	Ancho Inferior	15,65	15,78	15,60	15,71
	Largo	156,73	156,79	156,75	156,68
	Espesor superior	11,64	11,66	11,59	11,69
	Espesor inferior	7,49	7,53	7,39	7,51

Tabla 7. *Resultados resumidos de las mediciones con Escáner 3D*

Nota: Las tablas completas con todas las lecturas se incluyen en el Anexo B.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1 RESULTADOS DIMENSIONALES

6.1.1 RESULTADOS DIMENSIONALES CON PIE DE REY (RESOLUCIÓN 0,01mm) DIGITAL

En la Tabla 8 se presentan los resultados de las mediciones obtenidas con el calibrador pie de rey. en esta se incluyen las dimensiones nominales tomadas del plano, las lecturas en las piezas y la diferencia entre ambas mediciones.

PARTE	DIMENSIONES	NOMINAL	LECTURA 1	DIFERENCIA
Mordaza movil	Ancho	37,50	37,62	-0,12
	Largo	88,50	88,33	0,17
	Espesor	12,00	12,00	0,00
Tuerca de ajuste	Diametro exterior	21,30	21,12	0,18
	Diametro interior	12,15	11,96	0,19
	Espesor	10,50	10,7	-0,20
Carcasa	Ancho	47,25	47,05	0,20
	Largo	30,00	30,12	-0,12
	Espesor	12,75	12,77	-0,02
	Cavidad interna tuerca ancho	21,75	21,72	0,03
	Cavidad interna tuerca largo	12,00	11,96	0,04
	Cavidad interna tuerca espesor	8,25	8,13	0,12
	Cavidad interna mordaza movil Largo	17,63	17,53	0,10
	Cavidad interna mordaza movil Espesor	8,25	8,24	0,01
Cremallera	Ancho	15,00	15,04	-0,04
	Espesor	7,50	7,81	-0,31
Mango	Ancho Superior	11,25	11,19	0,06
	Ancho Inferior	15,74	15,58	0,16
	Largo	159,09	158,88	0,21
	Espesor superior	12,00	11,38	0,62
	Espesor medio	7,50	7,78	-0,28

Tabla 8. *Tabla de medida con pie de rey 0,01 Digital: Nominal-Tomada-Diferencia*

Los datos obtenidos en su totalidad se encuentran en el Anexo B, esta tabla solo muestra como está compuesta la tabla con las 15 probetas.

Los resultados mostraron que, en la mayoría de las medidas, las dimensiones se encuentran dentro de la tolerancia de ±0,20 mm mostradas en el plano, corroborando una buena relación entre el diseño y lo impreso. Sin embargo, se vieron unas variaciones principalmente en los espesores de la cremallera y el mango donde se ve que excede las tolerancias de diseño.

6.1.2 RESULTADOS DIMENSIONALES CON MICRÓMETRO (RESOLUCIÓN 0,01mm) ANÁLOGO

Para este proceso se realiza la medición con un micrómetro, donde ayuda a obtener más información para realizar mejor el análisis esperado. La Tabla 9 presenta los valores nominales, las lecturas obtenidas y la diferencia entre ambas medidas.

PARTE	DIMENSIONES	NOMINAL	LECTURA 1	DIFERENCIA
Mordaza Movil	Espesor	12	12,02	-0,02
Tuerca de ajuste	Diametro exterior	21,3	21,14	0,16
	Espesor	10,5	10,70	-0,20
Carcasa	Espesor	12,75	12,78	-0,03
Cremallera	Ancho	15	15,06	-0,06
	Espesor	7,5	8,12	-0,62
Mango	Ancho Superior	11,25	11,17	0,08
	Ancho Inferior	15,74	15,59	0,15
	Espesor superior	12	11,40	0,60
	Espesor inferior	7,5	7,79	-0,29

Tabla 9. *Tabla de medidas con Micrómetro 0,01 Análogo: Nominal, Tomada-Diferencia*

En la Tabla 9 se muestran el registro de los datos para cada probeta de estudio, esta tabla con los datos completos se encuentra en el Anexo B.

Los resultados mostraron que, en la mayoría de las medidas, las dimensiones se encuentran dentro de la tolerancia de ±0,20 mm que nos muestra el plano, corroborando una buena relación entre el diseño y lo impreso. Sin embargo, se vieron unas variaciones principalmente en los espesores de la cremallera y el mango donde se ve que excede las tolerancias de diseño.

Los resultados indican varias medidas que cumplen con la tolerancia de ±0,20 mm dadas en el plano. Al igual que el proceso del pie de rey, se evidencian unas medidas fuera de estas tolerancias. Estas mediciones constituyen un insumo esencial para el análisis de capacidad del proceso que se realizara más adelante.

6.1.3 RESULTADOS DIMENSIONALES CON ESCÁNER LASER 3D FREE SCAN COMBO SERIES (RESOLUCIÓN 0.02mm)

Para este proceso se realiza la medición con un micrómetro, donde nos ayuda a obtener más información para realizar mejor el análisis esperado. La Tabla 10 presenta los valores nominales, las lecturas obtenidas y la diferencia entre ambas medidas.

PARTE	DIMENSIONES	NOMINAL	LECTURA 1	DIFERENCIA
Mordaza movil	Ancho	37,50	36,29	1,21
	Largo	88,50	87,15	1,35
	Espesor	12,00	11,85	0,15
Tuerca de ajuste	Diametro exterior	21,30	21,06	0,24
	Diametro interior	12,15	12,32	-0,17
	Espesor	10,50	11,47	-0,97
Carcasa	Ancho	47,25	46,68	0,57
	Largo	30,00	29,84	0,16
	Espesor	12,75	12,9	-0,15
	Cavidad interna tuerca ancho	21,75	21,29	0,46
	Cavidad interna tuerca largo	12,00	12,19	-0,19
	Cavidad interna tuerca espesor	8,25	8,34	-0,09
	Cavidad interna mordaza movil Largo	17,63	16,59	1,04
	Cavidad interna mordaza movil Espesor	8,25	8,48	-0,23
Cremallera	Ancho	15,00	14,69	0,31
	Espesor	7,50	7,63	-0,13
Mango	Ancho Superior	11,25	11,29	-0,04
	Ancho Inferior	15,74	15,65	0,09
	Largo	159,09	156,73	2,36
	Espesor superior	12,00	11,64	0,36
	Espesor medio	7,50	7,49	0,01

Tabla 10. *Tabla de medidas con Escáner 3D Freescan Combo Series: Nominal-Tomada-Diferencia*

En la Tabla 10 se muestra el registro de los datos en la tabla para cada probeta de estudio, esta tabla con los datos completos se encuentra en el Anexo B.

Los resultados mostraron que, en algunas medidas se encuentran cumpliendo con las tolerancias expuestas en el plano del diseño, también se observa que hay algunas medidas que presentan una gran variación esto pudo ocurrir en el momento de sacar las medidas en el archivo CAD ya que al ser un mallado se complica escoger el punto exacto donde se quiere tomar la medida. Estos resultados nos muestran que el proceso de impresión 3D cumple con las

tolerancias de ±0,20 mm que era el objetivo, también esta información también da mucho aporte para el análisis del proceso que se quiere llegar a realizar.

6.2 ANÁLISIS CAPACIDAD DE PROCESO

Para el análisis de la capacidad de proceso, se procederá para un muestreo de 15 llaves de tubos, donde a lo largo de su impresión se mantiene el mismo ambiente de control, puesto que los parámetros del proceso se mantuvieron constantes para la impresión de material con ABS.

Como lo describe Imran Siraj y Pushpendra S. Bharti en su texto “Process capability analysis of a 3D printing process- 2020" propone que “... PCI, Cp y Cpk son las herramientas básicas y ampliamente utilizadas para determinar características unidimensionales y multidimensionales de cualquier proceso u operación que puedan tener tolerancias simétricas o asimétricas y tipos de distribución menor-mejor, mayor-mejor y nominal-mejor.".

Los índices de capacidad de proceso (Cp y Cpk) brindan la información necesaria para analizar y evaluar aptitud de un proceso de manufactura en relación con los límites de tolerancia especificados, donde se usa el Cp para medir la capacidad potencial del proceso en la comparación de medidas como lo serán, altura, espesor y el ancho de las piezas en cuestión bajo ciertas tolerancias. Por el otro lado se tiene que el Cpk ayudará a complementar la información mencionada anteriormente, ya que sirve para incorporar el efecto de sesgo o desplazamiento de la media respecto al valor objetivo, mostrando la variabilidad que llega a tener junto con que tan bien se encuentra alineado el proceso con el punto de referencia establecido. De manera resumida se obtiene que, mientras Cp indica lo que el proceso podría lograr en condiciones ideales, Cpk muestra lo que realmente está logrando, teniendo en cuenta tanto la dispersión como la ubicación de la media dentro de los límites de especificación.

Para la llave de tubos tendremos que tomar en cuenta las 5 secciones o partes de la llave de tubos, estas serán: Cremallera, mordaza móvil, Mango, Tuerca de ajuste y Carcasa. Para cada una de ellas se le realizará el Cp bajo los tres métodos de toma de datos, como lo son con el pie de rey, micrómetro y escáner 3D, para cada

uno de estos métodos se analiza sobre cada medida que se tomará a consideración como se ha venido representando en los puntos anteriores, para esto tomaremos cada sección y la analizaremos respectivamente con apoyo del programa Minitab, el cual organizará la información dimensional tomada anteriormente, brindando aquello que se requiere por medio de un análisis estadístico.

De esta manera se obtiene que:

1. $Cp = (USL - LSL) / (6\sigma)$

2. $Cpk = \min[(USL - \mu) / (3\sigma), (\mu - LSL) / (3\sigma)]$

3. $Cpl = (\mu - LSL) / (3\sigma)$

4. $Cpu = (USL - \mu) / (3\sigma)$

5. $Cpm = (USL - LSL) / (6 * \sqrt{(\sigma^2 + (\mu - Target)^2)})$, penaliza la desviación respecto al objetivo (Target = valor nominal).

Donde:

- Cp = process capability index
- Cpl= capability index – lower side
- Cpu= capability index – upper side
- Cpm= taguchi capability index

- Cpk= process capability index adjusted for centering
- μ = promedio de las mediciones
- σ = desviación estándar
- USL y LSL = límites de especificación (ej. ±0.30 mm del valor nominal, salvo que tu diseño tenga tolerancias específicas)

6.2.1 ANÁLISIS CAPACIDAD DE PROCESO CON PIE DE REY (RESOLUCIÓN 0,01mm) DIGITAL

6.2.1.1 MORDAZA MÓVIL

Para la mordaza móvil se tomará en cuenta las siguientes medidas nominales: ancho de 37,50 ±0.2 mm, largo de 88,50 ±0.2 mm y espesor de 12,00 ±0.2 mm, bajo estas condiciones se obtiene bajo el programa de minitab los siguientes resultados: (ver tabla 11)

Dimensión	**Valor nominal (mm)**	**USL (mm)**	**LSL (mm)**	**Media (μ) (mm)**	**σ (mm)**	**Cp**	**Cpk**	**Cpl**	**Cpu**	**Cpm**
Ancho	37,5	37,7	37,3	37,60	0,11	0,45	0,22	0,69	0,22	0,44
Largo	88,5	88,7	88,3	88,37	0,15	0,45	0,17	0,17	0,74	0,34
Espesor	12	12,2	11,8	11,94	0,098	0,73	0,53	0,53	0,93	0,61

Tabla 11. *Datos análisis capacidad de proceso para la mordaza móvil con pie de rey*

6.2.1.2 TUERCA DE AJUSTE

Para la tuerca de ajuste se tomará en cuenta las siguientes medidas nominales: Diámetro exterior de 21,30±0.2 mm, diámetro interior de 12,15 ±0.2 mm y espesor de 10,50 ±0.2 mm, bajo estas condiciones se obtiene bajo el programa de Minitab los siguientes resultados: (ver tabla 12)

Dimensión	**Nominal (mm)**	**USL (mm)**	**LSL (mm)**	**Media μ (mm)**	**σ (mm)**	**Cp**	**Cpk**	**Cpl**	**Cpu**	**Cpm**
Diámetro exterior	21.30	21.50	21.10	**21.16**	0.11	0.55	0.16	0.17	0.93	0.38
Diámetro interior	12.15	12.35	11.95	**11.99**	0.09	0.71	0.16	0.16	1.27	0.37
Espesor	10.50	10.70	10.30	**10.70**	0.11	0.49	0.00	0.99	0.00	0.29

Tabla 12. *Datos análisis capacidad de proceso para la Tuerca de Ajuste con pie de rey*

6.2.1.3 CARCASA

Para la carcasa se tomará en cuenta las siguientes medidas nominales: Ancho de 47,25±0.2 mm, largo de 30,00±0.2 mm, espesor de 12,75±0.2 mm, cavidad interna tuerca ancho de 21,75±0.2 mm, cavidad interna tuerca largo de 12,00±0.2 mm, cavidad interna tuerca-espesor de 8,25±0.2 mm, cavidad interna mordaza móvil-largo de 17,63±0.2 mm y cavidad interna mordaza móvil-espesor de 8,25±0.2 mm, bajo estas condiciones se obtiene bajo el programa de Minitab los siguientes resultados: (ver tabla 13)

Dimensión	**Nominal (mm)**	**USL (mm)**	**LSL (mm)**	**Media μ (mm)**	**σ (mm)**	**Cp**	**Cpk**	**Cpl**	**Cpu**	**Cpm**
Ancho	47.25	47.45	47.05	**47.03**	0.10	0.58	-0.03	-0.03	1.18	0.40
Largo	30.00	30.20	29.80	**30.11**	0.11	0.49	0.20	0.79	0.20	0.40
Espesor	12.75	12.95	12.55	**12.77**	0.10	0.58	0.51	0.65	0.51	0.64

Cavidad tuerca — ancho	21.75	21.95	21.55	**21.73**	0.087	1.01	0.93	0.93	1.09	0.78
Cavidad tuerca — largo	12.00	12.20	11.80	**11.96**	0.088	0.95	0.77	0.77	1.13	0.71
Cavidad tuerca — espesor	8.25	8.45	8.05	**8.13**	0.08	0.88	0.31	0.31	1.44	0.49
Cavidad mordaza — largo	17.63	17.83	17.43	**17.53**	0.07	1.13	0.60	0.60	1.66	0.58
Cavidad mordaza — espesor	8.25	8.45	8.05	**8.19**	0.11	0.76	0.56	0.56	0.96	0.55

Tabla 13. *Datos análisis capacidad de proceso para la Carcasa con pie de rey*

6.2.1.4 CREMALLERA

Para la cremallera se tomará en cuenta las siguientes medidas nominales: ancho de 15,00±0.2 mm y espesor de 7,50 ±0.2 mm, bajo estas condiciones se obtiene bajo el programa de minitab los siguientes resultados: (ver tabla 14)

Dimensión	**Nominal (mm)**	**USL (mm)**	**LSL (mm)**	**Media μ (mm)**	**σ (mm)**	**Cp**	**Cpk**	**Cpl**	**Cpu**	**Cpm**
Ancho	15.00	15.20	14.80	**15.04**	0.07	1.02	0.78	1.25	0.78	0.79
Espesor	7.50	7.70	7.30	**7.88**	0.12	0.82	-0.75	2.38	-0.75	0.17

Tabla 14.Datos análisis capacidad de proceso para la Cremallera con pie de rey

6.2.1.5 MANGO

Para el mango se tomará en cuenta las siguientes medidas nominales: Ancho Superior de 11,25±0.2 mm, ancho Inferior de 15,74±0.2 mm, largo de 159,09±0.2 mm, espesor superior de 12,00±0.2 mm y espesor medio de 7,50±0.2 mm, bajo

estas condiciones se obtiene bajo el programa de minitab los siguientes resultados: (ver tabla 15)

Dimensión	Nominal (mm)	USL (mm)	LSL (mm)	Media μ (mm)	σ (mm)	Cp	Cpk	Cpl	Cpu	Cpm
Ancho superior	11.25	11.45	11.05	11.16	0.086	0.70	0.40	0.40	1.01	0.55
Ancho inferior	15.74	15.94	15.54	15.58	0.097	0.75	0.16	0.16	1.33	0.36
Largo	159.09	159.29	158.89	158.90	0.24	0.28	0.03	0.03	0.54	0.23
Espesor superior	12.00	12.20	11.80	11.36	0.06	1.53	-3.35	-3.35	6.40	0.10
Espesor medio	7.50	7.70	7.30	7.73	0.092	0.64	-0.10	1.38	-0.1	0.27

Tabla 15. *Datos análisis capacidad de proceso para el mango con pie de rey*

6.2.2 CAPACIDAD DE PROCESO CON MICROMETRO (RESOLUCIÓN 0,01mm) ANÁLOGO

6.2.2.1 MORDAZA MÓVIL

Para la mordaza móvil se tomará en cuenta las siguientes medidas nominales: espesor de 12,00 ±0.2 mm, bajo estas condiciones se obtiene bajo el programa de minitab los siguientes resultados: (ver tabla 16)

Dimensión	Valor nominal (mm)	LSL (mm)	USL (mm)	Media (μ) (mm)	σ (mm)	Cp	Cpl	Cpu	Cpk	Cpm
Espesor	12	11,8	12,2	12.017	0,011	4.58	4.97	4.18	4.18	3.23

Tabla 16. *Datos análisis capacidad de proceso para la Mordaza móvil con micrómetro*

6.2.2.2 TUERCA DE AJUSTE

Para la tuerca de ajuste se tomará en cuenta las siguientes medidas nominales: diámetro exterior de 21,30 ±0.2 mm y espesor de 10,50 ±0.2 mm, bajo estas condiciones se obtiene bajo el programa de minitab los siguientes resultados: (ver tabla 17)

Dimensión	Valor nominal (mm)	LSL (mm)	USL (mm)	Media (μ) (mm)	σ (mm)	Cp	Cpl	Cpu	Cpk	Cpm
Diámetro exterior	21,3	21,1	21,5	21,14	0,012	5.85	1.27	10.43	1.27	0.42
Espesor	10,5	10,3	10,7	10,69	0,011	6.58	12.96	0.20	0.20	0.34

Tabla 17. *Datos análisis capacidad de proceso para la Tuerca de ajuste con micrómetro*

6.2.2.3 CARCASA

Para la carcasa se tomará en cuenta las siguientes medidas nominales: espesor de 12,75 ±0.2 mm, bajo estas condiciones se obtiene bajo el programa de minitab los siguientes resultados: (ver tabla 18)

Dimensión	Valor nominal (mm)	LSL (mm)	USL (mm)	Media (μ) (mm)	σ (mm)	Cp	Cpl	Cpu	Cpk	Cpm
Espesor general	12,75	12,55	12,95	12,78	0,010	0.54	6.48	4.60	4.60	1.88

Tabla 18. *Datos análisis capacidad de proceso para la Carcasa con micrómetro*

6.2.2.4 CREMALLERA

Para la cremallera se tomará en cuenta las siguientes medidas nominales: ancho de 15,00 ±0.2 mm y espesor de 7,50 ±0.2 mm, bajo estas condiciones se obtiene bajo el programa de minitab los siguientes resultados: (ver tabla 19)

Dimensión	Valor nominal (mm)	LSL (mm)	USL (mm)	Media (μ) (mm)	σ (mm)	Cp	Cpl	Cpu	Cpk	Cpm
Ancho	15	14,8	15,2	15,06	0,009	7.52	9.90	5.14	5.14	1.04
Espesor	7,5	7,3	7,7	7,86	0,2	0.49	1.38	-0.40	-0.40	0.16

Tabla 19. *Datos análisis capacidad de proceso para la Cremallera con micrómetro*

6.2.2.5 MANGO

Para el mango se tomará en cuenta las siguientes medidas nominales: ancho superior de 11,25 ±0.2 mm, ancho inferior de 15,74 ±0.2 mm, espesor superior de 12,00±0.2 mm y espesor inferior de 7,50 ±0.2 mm, bajo estas condiciones se obtiene bajo el programa de minitab los siguientes resultados: (ver tabla 20)

Dimensión	Valor nominal (mm)	LSL (mm)	USL (mm)	Media (μ) (mm)	σ (mm)	Cp	Cpl	Cpu	Cpk	Cpm
Ancho superior	11,25	11,05	11,45	11,16	0,0096	7.02	4.19	9.85	4.19	0.82
Ancho inferior	15,74	15,54	15,94	15,59	0,013	5.01	1,25	8.77	1.25	0.44
Espesor superior	12	11,8	12,2	11,40	0,011	5.26	-10.49	21.02	-10.49	0.11
Espesor medio	7,5	7,3	7,7	7,79	0,010	8.77	21.52	-3.98	-3.98	0.23

Tabla 20. *Datos análisis capacidad de proceso para el Mango con micrómetro*

6.2.1 CAPACIDAD DE PROCESO CON ESCÁNER LASER 3D FREE SCAN COMBO SERIES (RESOLUCIÓN 0.02mm)

6.2.1.1 MORDAZA MÓVIL

Para la mordaza móvil se tomará en cuenta las siguientes medidas nominales: ancho de 37,50 ±0.2 mm, largo de 88,50 ±0.2 mm y espesor de 12,00 ±0.2 mm, bajo estas condiciones se obtiene bajo el programa de minitab los siguientes resultados: (ver tabla 21)

Dimensión	Valor nominal (mm)	USL (mm)	LSL (mm)	Media (μ) (mm)	σ (mm)	Cp	Cpk	Cpl	Cpu	Cpm
Ancho	37,5	37,7	37,3	36.29	0,051	1,32	-6.62	-6.62	9.25	0.06
Largo	88,5	88,7	88,3	87.14	0,053	1.25	-7.24	-7.24	9.75	0.05
Espesor	12	12,2	11,8	11.84	0,046	1.39	0.33	0.33	2.44	0.42

Tabla 21. *Datos análisis capacidad de proceso para la Mordaza móvil con escáner 3D*

6.2.1.2 TUERCA DE AJUSTE

Para la tuerca de ajuste se tomará en cuenta las siguientes medidas nominales: Diámetro exterior de 21,30±0.2 mm, diámetro interior de 12,15 ±0.2 mm y espesor de 10,50 ±0.2 mm, bajo estas condiciones se obtiene bajo el programa de Minitab los siguientes resultados: (ver tabla 22)

Dimensión	Nominal (mm)	USL (mm)	LSL (mm)	Media μ (mm)	σ (mm)	Cp	Cpk	Cpl	Cpu	Cpm
Diámetro exterior	21.30	21.50	21.10	**21.049**	0.052	1.46	-0.37	-0.37	3.29	0.26
Diámetro interior	12.15	12.35	11.95	**12.31**	0.068	0.88	0.17	1.60	0.17	0.38
Espesor	10.50	10.70	10.30	**11.47**	0.057	1.37	-5.29	8.03	-5.29	0.07

Tabla 22. *Datos análisis capacidad de proceso para la Tuerca de ajuste con escáner 3D*

6.2.1.3 CARCASA

Para la carcasa se tomará en cuenta las siguientes medidas nominales: Ancho de 47,25±0.2 mm, largo de 30,00±0.2 mm, espesor de 12,75±0.2 mm, cavidad interna tuerca ancho de 21,75±0.2 mm, cavidad interna tuerca largo de 12,00±0.2 mm, cavidad interna tuerca-espesor de 8,25±0.2 mm, cavidad interna mordaza móvil-largo de 17,63±0.2 mm y cavidad interna mordaza móvil-espesor de 8,25±0.2 mm, bajo estas condiciones se obtiene bajo el programa de Minitab los siguientes resultados: (ver tabla 23)

Dimensión	Nominal (mm)	USL (mm)	LSL (mm)	Media μ (mm)	σ (mm)	Cp	Cpk	Cpl	Cpu	Cpm
Ancho	47.25	47.45	47.05	**46.65**	0.080	0.79	-1.55	-1.55	3.12	0.11
Largo	30.00	30.20	29.80	**29.85**	0.07	0.81	0.21	0.21	1.41	0.41
Espesor	12.75	12.95	12.55	**12.89**	0.04	1.73	0.5	2.95	0.5	0.45
Cavidad tuerca — ancho	21.75	21.95	21.55	**21.28**	0.04	1.91	-2.50	-2.50	6.33	0.14
Cavidad tuerca — largo	12.00	12.20	11.80	**12.16**	0.058	1.06	0.18	1.94	0.18	0.38
Cavidad tuerca — espesor	8.25	8.45	8.05	**8.32**	0.067	0.97	0.59	1.36	0.59	0.65
Cavidad mordaza — largo	17.63	17.83	17.43	**16.59**	0.051	0.97	-4.09	-4.09	6.04	0.06
Cavidad mordaza — espesor	8.25	8.45	8.05	**8.49**	0.067	0.96	-0.20	2.12	-0.20	0.27

Tabla 23. *Datos análisis capacidad de proceso para la Carcasa con escáner 3D*

6.2.1.4 CREMALLERA

Para la cremallera se tomará en cuenta las siguientes medidas nominales: ancho de 15,00±0.2 mm y espesor de 7,50 ±0.2 mm, bajo estas condiciones se obtiene bajo el programa de minitab los siguientes resultados: (ver tabla 24)

Dimensión	Nominal (mm)	USL (mm)	LSL (mm)	Media μ (mm)	σ (mm)	Cp	Cpk	Cpl	Cpu	Cpm
Ancho	15.00	15.20	14.80	**14.69**	0.053	1.35	-0.69	-0.69	3.39	0.22
Espesor	7.50	7.70	7.30	**7.62**	0.04	1.35	0.53	2.17	0.53	0.51

Tabla 24. *Datos análisis capacidad de proceso para la Cremallera con escáner 3D*

6.2.1.5 MANGO

Para el mango se tomará en cuenta las siguientes medidas nominales: Ancho Superior de 11,25±0.2 mm, ancho Inferior de 15,74±0.2 mm, largo de 159,09±0.2 mm, espesor superior de 12,00±0.2 mm y espesor medio de 7,50±0.2 mm, bajo estas condiciones se obtiene bajo el programa de minitab los siguientes resultados: (ver tabla 25)

Dimensión	Nominal (mm)	USL (mm)	LSL (mm)	Media μ (mm)	σ (mm)	Cp	Cpk	Cpl	Cpu	Cpm
Ancho superior	11.25	11.45	11.05	11.30	0.071	0.82	0.61	1.03	0.61	0.78
Ancho inferior	15.74	15.94	15.54	15.63	0.077	0.75	0.36	0.36	1.12	0.52
Largo	159.09	159.29	158.89	156.72	0.045	1.50	-16.30	-16.30	19.31	0.03
Espesor superior	12.00	12.20	11.80	11.67	0.07	0.86	-0.55	-0.55	2.28	0.20
Espesor medio	7.50	7.70	7.30	7.48	0.055	0.98	0.91	0.91	1.06	1.21

Tabla 25. *Datos análisis capacidad de proceso para el Mango con escáner 3D*

6.3 GRÁFICOS DE CONTROL Y DISCUSIÓN

6.3.1 GRÁFICOS CAPACIDAD DE PROCESO CON PIE DE REY (RESOLUCIÓN 0,01mm) DIGITAL

6.3.1.1 MORDAZA MÓVIL

Para el caso de la mordaza, tiene buena estabilidad, pero el ancho y el largo presentan sesgo, reduciendo la capacidad real. El espesor es la dimensión más confiable.

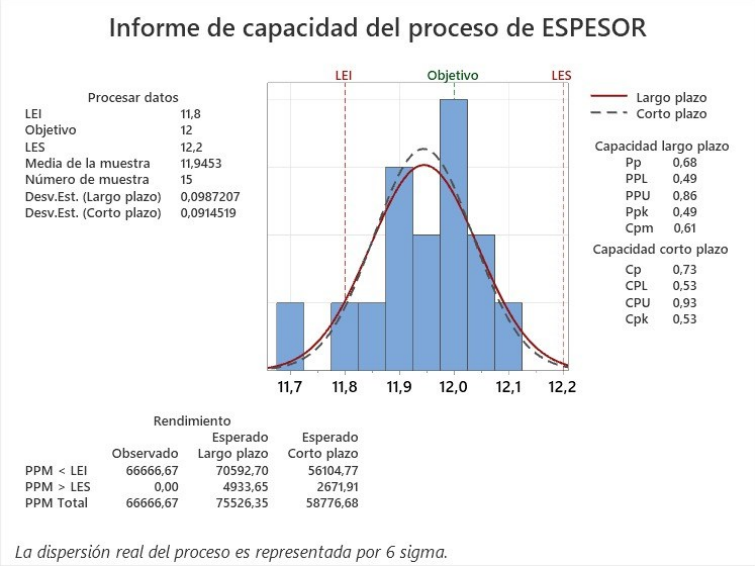


Ilustración 15. *Informe gráfico Minitab para el Espesor de la mordaza móvil con pie de rey*

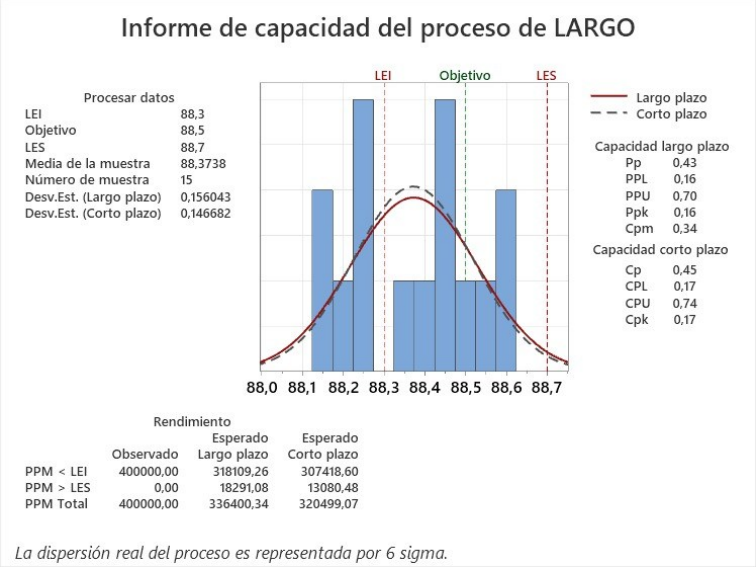


Ilustración 16. *Informe gráfico Minitab para el Largo de la mordaza móvil con pie de rey*

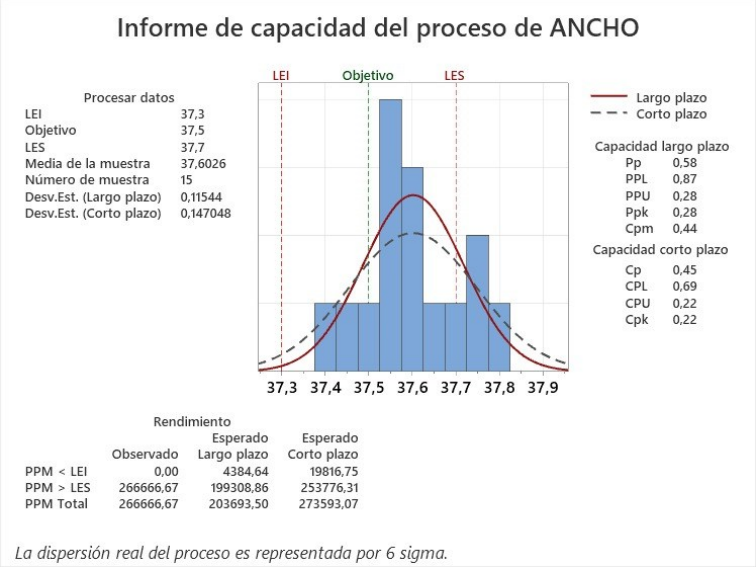


Ilustración 17. *Informe gráfico Minitab para el Ancho de la mordaza móvil con pie de rey*

Los histogramas (ver figura 15,16 y 17) muestran la evidencia de un proceso con variabilidad baja en todas las dimensiones, esto con un problema principal ubicado en el centrado del ancho y del largo, lo que reduce los Cpk pese a tener Cp aceptables, apoyándose de que el espesor es la dimensión más estable y confiable,

con índices por encima de 1,3 → proceso aceptable para control de calidad, se llegaría a demostrar que para mejorar su proceso se tendría que ajustar parámetros de impresión para centrar el proceso en ancho y largo.

6.3.1.2 TUERCA DE AJUSTE

Para la tuerca de ajuste se puede ver que, analizando los histogramas, se denota la principal dificultad ubicada en el diámetro exterior, donde la media se desplaza hacia el límite inferior reduciendo el Cpk, contrario al diámetro interior y el espesor, donde presentan resultados satisfactorios, con curvas ajustadas a la normal y Cpk cercanos o iguales a 1,0. (ver figura 18,19 y 20)

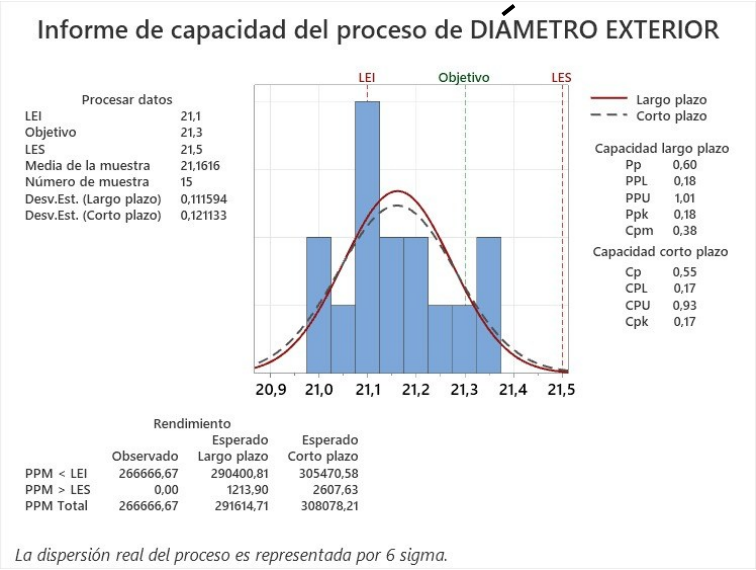


Ilustración 18. *Informe gráfico Minitab para el Diámetro exterior de la tuerca de ajuste con pie de rey*

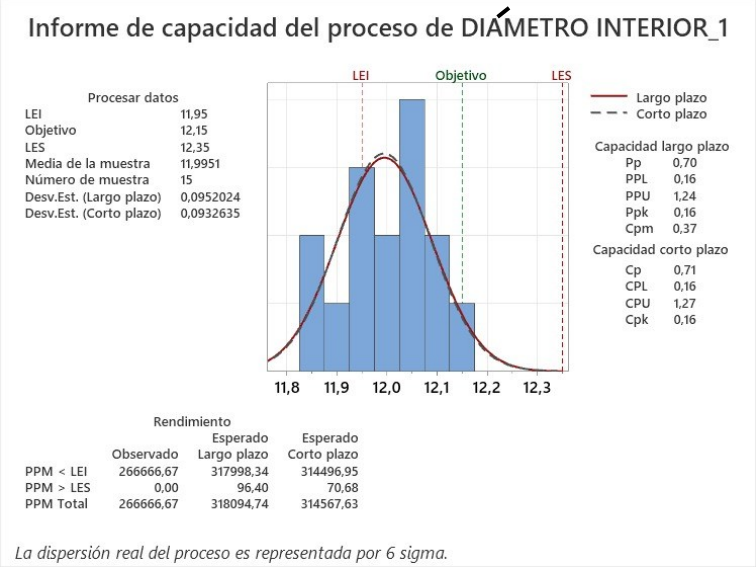


Ilustración 19. *Informe gráfico Minitab para el Diámetro interno de la tuerca de ajuste con pie de rey*

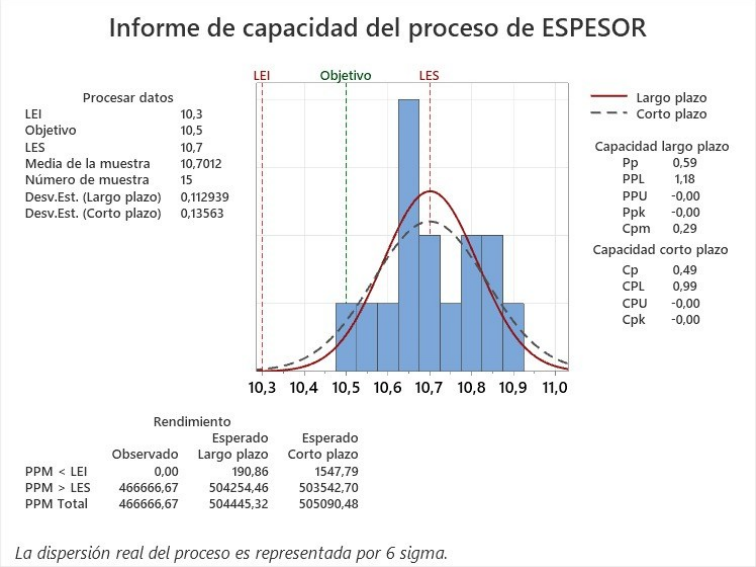


Ilustración 20. *Informe gráfico Minitab para el Espesor de la tuerca de ajuste con pie de rey*

6.3.1.3 CARCASA

Para la carcasa se puede analizar gráficamente un comportamiento donde la carcasa es la pieza más conflictiva, con varias dimensiones (espesor general y cavidad tuerca-espesor) con Cp y Cpk muy bajos, puesto que la única dimensión

con desempeño cercano a lo aceptable es la cavidad tuerca-largo, que muestra un buen equilibrio entre Cp y Cpk. Viendo en general, los histogramas (ver figura 21, 22, 23, 24, 25, 26,27 y 28) indican variabilidad controlada pero centrado deficiente, lo que baja los Cpk.

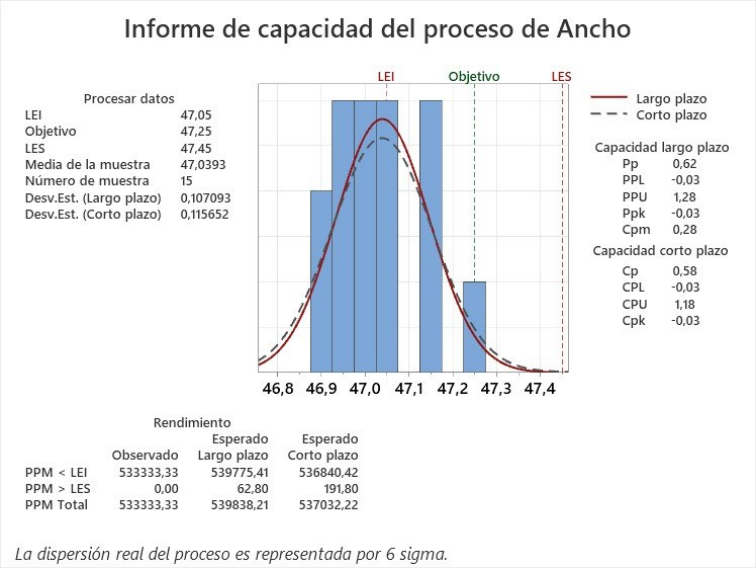


Ilustración 21. *Informe gráfico Minitab para el Ancho de la Carcasa con pie de rey*

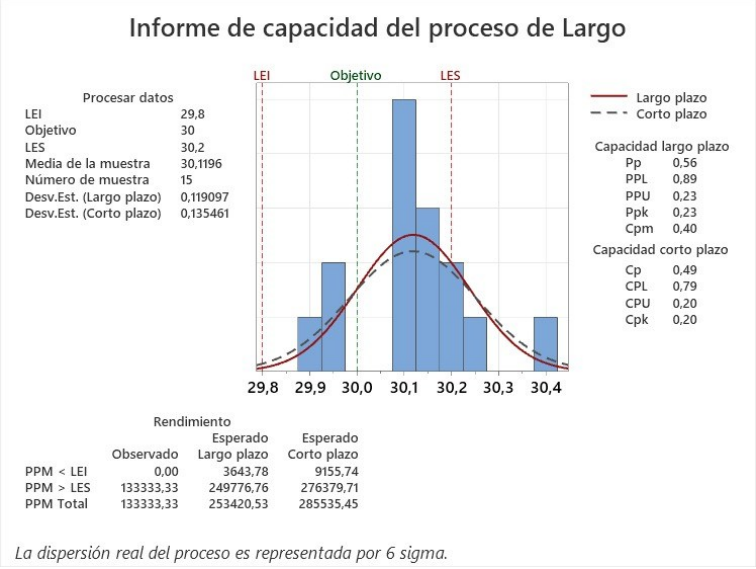


Ilustración 22. *Informe gráfico Minitab para el Largo de la Carcasa con pie de rey*

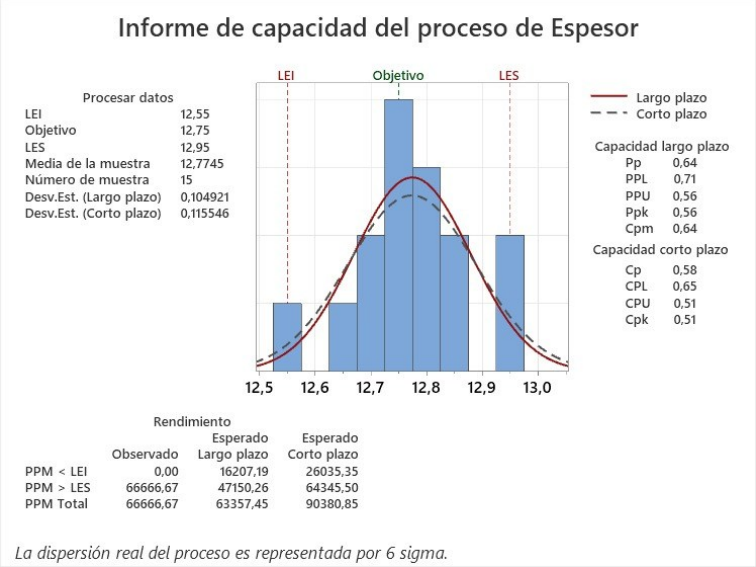


Ilustración 23. *Informe gráfico Minitab para el Espesor de la Carcasa con pie de rey*

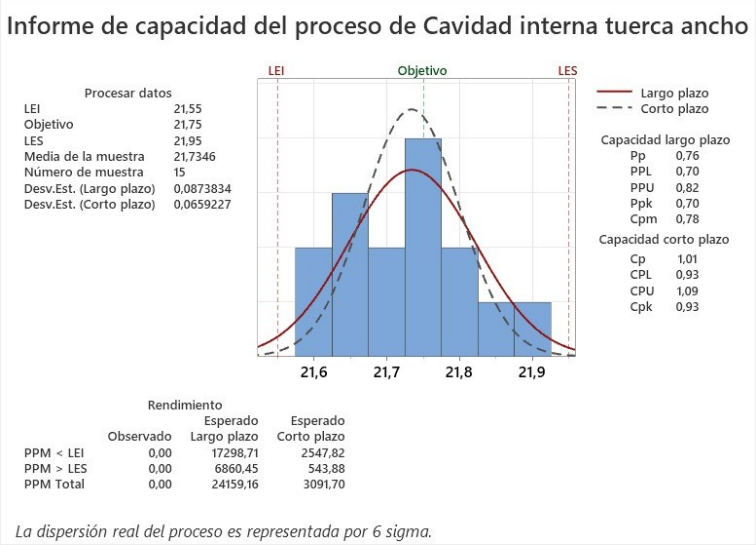


Ilustración 24. *Informe gráfico Minitab para la Cavidad interna tuerca ancho de la Carcasa con pie de rey*

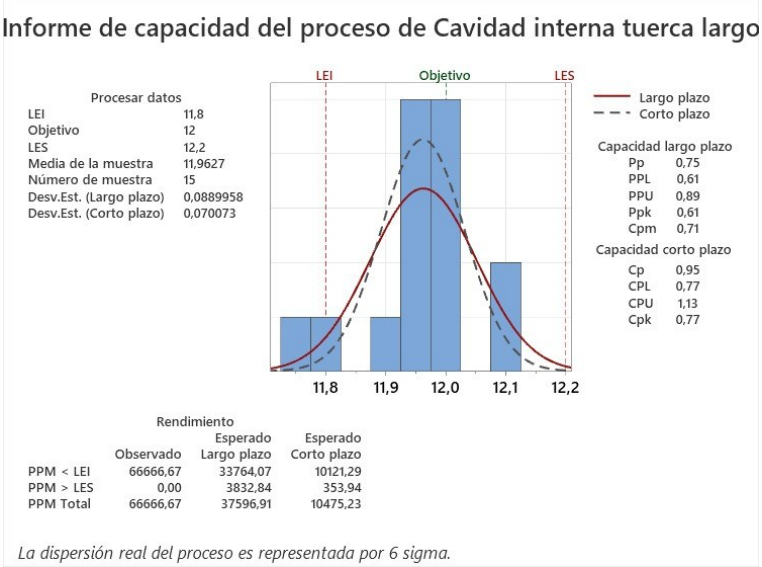


Ilustración 25. *Informe gráfico Minitab para la Cavidad interna tuerca largo de la Carcasa con pie de rey*

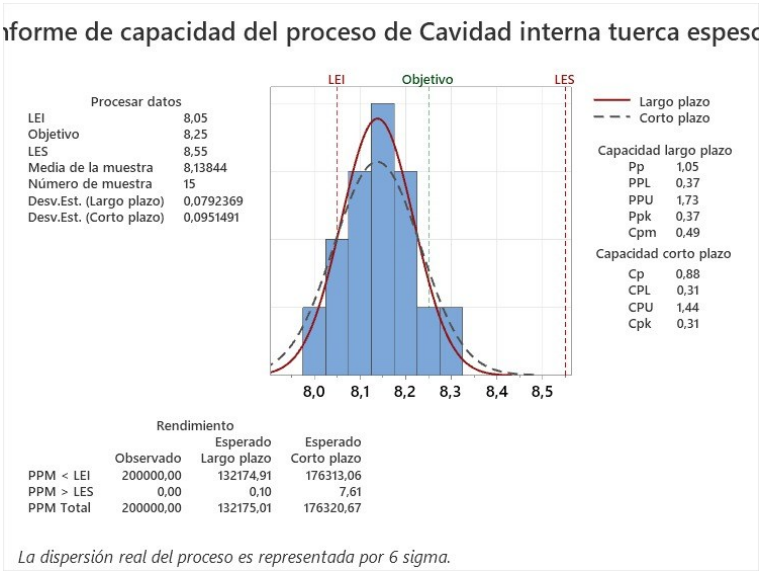


Ilustración 26. *Informe gráfico Minitab para la Cavidad interna tuerca-espesor de la Carcasa con pie de rey*

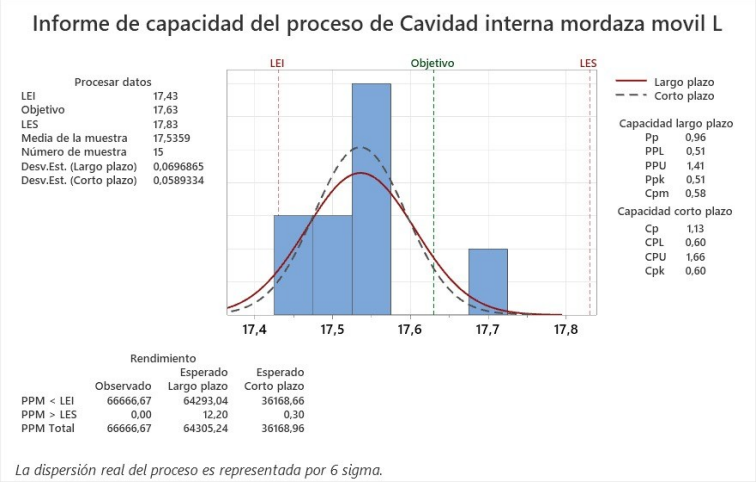


Ilustración 27. *Informe gráfico Minitab para la Cavidad interna mordaza móvil-largo de la Carcasa con pie de rey*

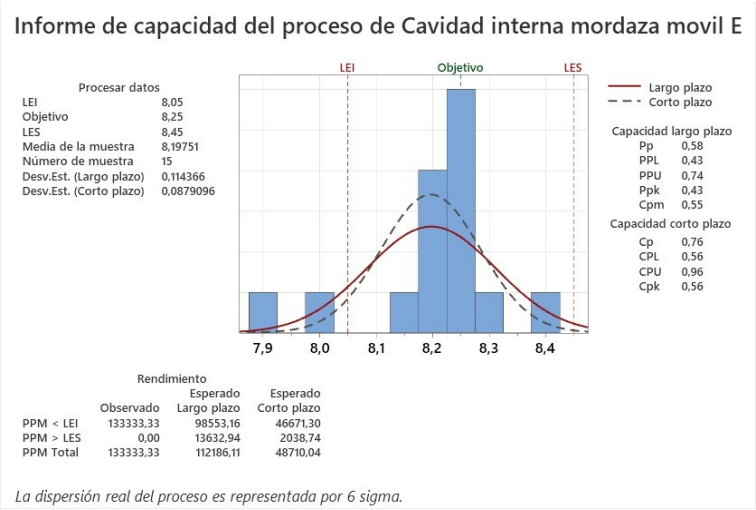
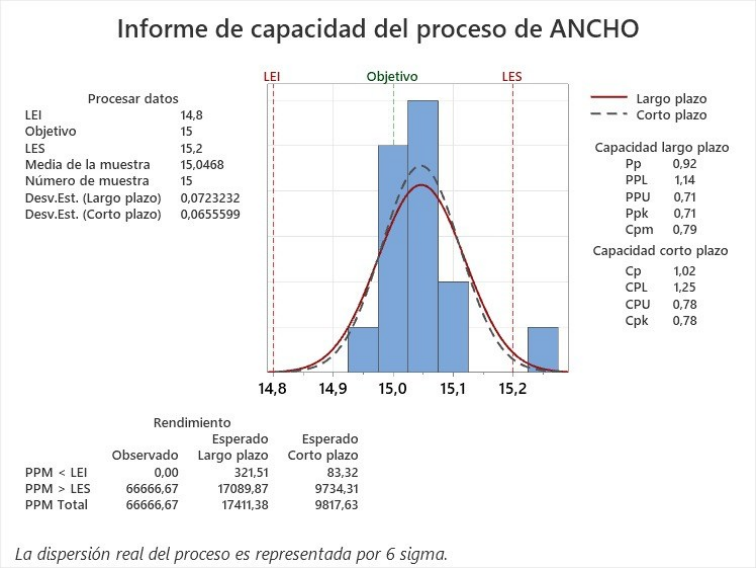


Ilustración 28. *Informe gráfico Minitab para la Cavidad interna mordaza móvil-espeso de la Carcasa con pie de rey*

Para mejorar esto se debería ajustar parámetros de extrusión (flow rate, compensación dimensional en slicer. Una vez realizado esto se revisa la orientación de impresión y soportes para mejorar espesores, teniendo a consideración ampliar tolerancias de diseño para dimensiones internas (cavidades) si la aplicación lo permite.

6.3.1.4 CREMALLERA

Para la cremallera presenta mejor comportamiento global en la llave para tubos, esto mismo soportado en que el espesor presenta excelente estabilidad y capacidad (Cp y Cpk satisfactorios), esto de la mano con el ancho, donde tiene Cp aceptable, pero requiere un pequeño ajuste de centrado (elevar Cpk), por lo que la intervención recomendada es de ajuste dimensional (slicer/calibración) más que de control de variabilidad. (ver figura 29 y 30)



Procesar datos	
LEI	14,8
Objetivo	15
LES	15,2
Media de la muestra	15,0468
Número de muestra	15
Desv.Est. (Largo plazo)	0,0723232
Desv.Est. (Corto plazo)	0,0655599

Capacidad largo plazo	
Pp	0,92
PPL	1,14
PPU	0,71
Ppk	0,71
Cpm	0,79

Capacidad corto plazo	
Cp	1,02
CPL	1,25
CPU	0,78
Cpk	0,78

Rendimiento	Observado	Esperado Largo plazo	Esperado Corto plazo
PPM < LEI	0,00	321,51	83,32
PPM > LES	66666,67	17089,87	9734,31
PPM Total	66666,67	17411,38	9817,63

Ilustración 29.*Informe gráfico Minitab para el Ancho de la Cremallera con pie de rey*

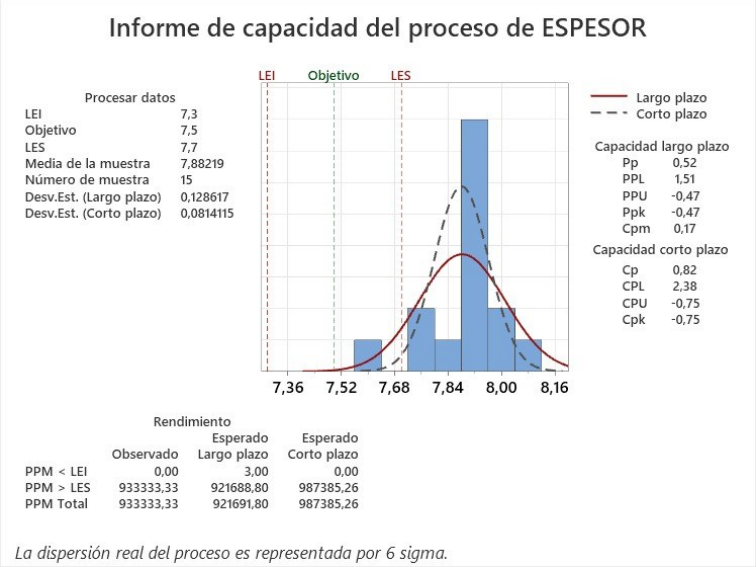


Ilustración 30. *Informe gráfico Minitab para el Espesor de la Cremallera con pie de rey*

6.3.1.5 MANGO

Para el mango se puede ver un comportamiento mixto, donde se tiene dimensiones satisfactorias en el ancho superior y espesores (superior y medio), con histogramas centrados y Cp ≥ 1,1, pero por otro lado se ve dimensiones problemáticas, como el ancho inferior (Cpk = 0,75) y especialmente el largo (Cpk = 0,36), donde la tolerancia estrecha combinada con la gran longitud amplifica los defectos del proceso. Estos gráficos de control (ver figura 31, 32, 33, 34 y 35) confirman que el proceso es estable (sin causas especiales), pero la variabilidad inherente en dimensiones largas y el desplazamiento en el ancho inferior limitan la capacidad real.

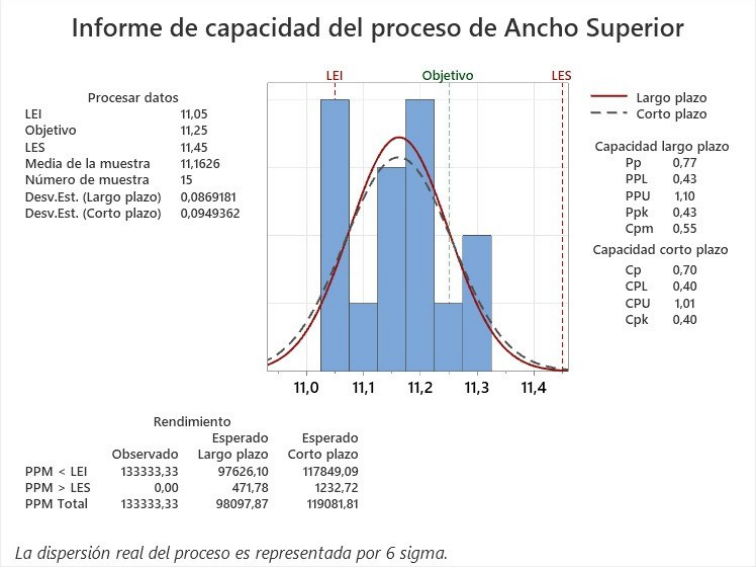


Ilustración 31. *Informe gráfico Minitab para el Ancho Superior del Mango con pie de rey*

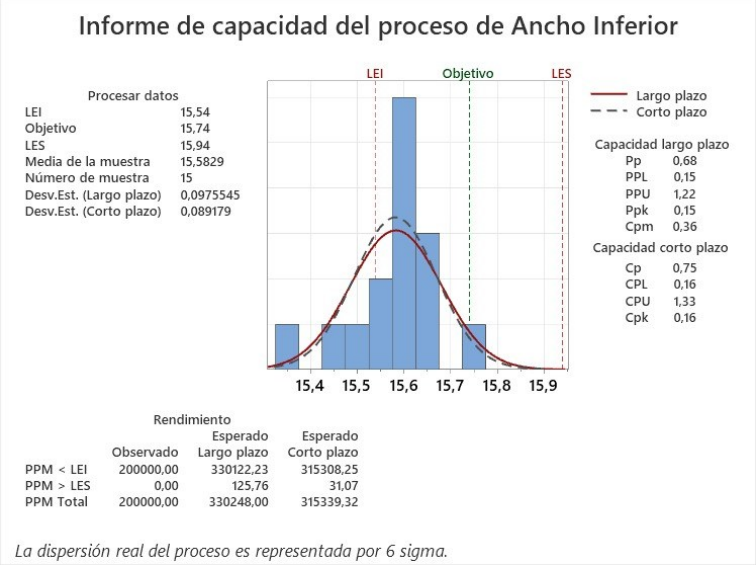


Ilustración 32. *Informe gráfico Minitab para el Ancho Inferior del Mango con pie de rey*

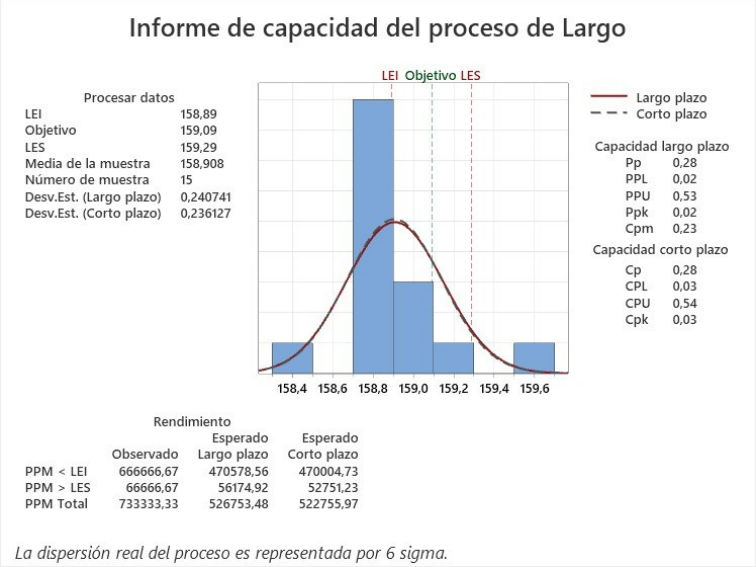


Ilustración 33. *Informe gráfico Minitab para el Largo Mango con pie de rey*

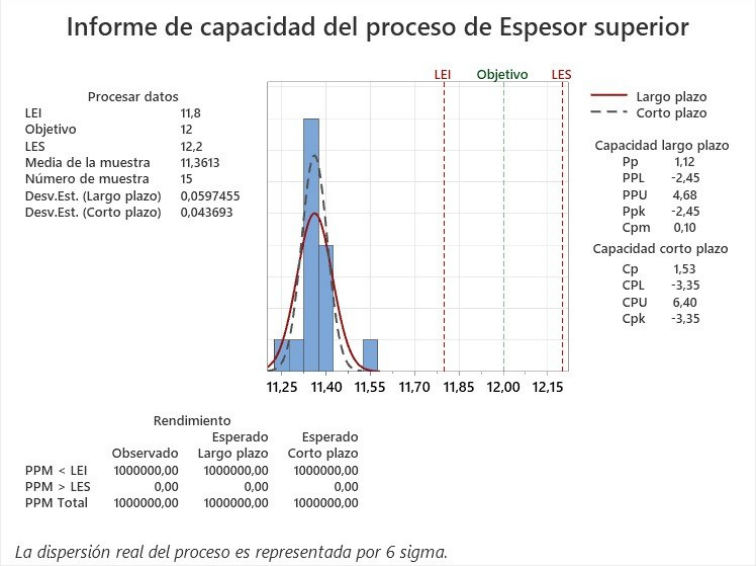


Ilustración 34. *Informe gráfico Minitab para el Espesor superior del Mango con pie de rey*

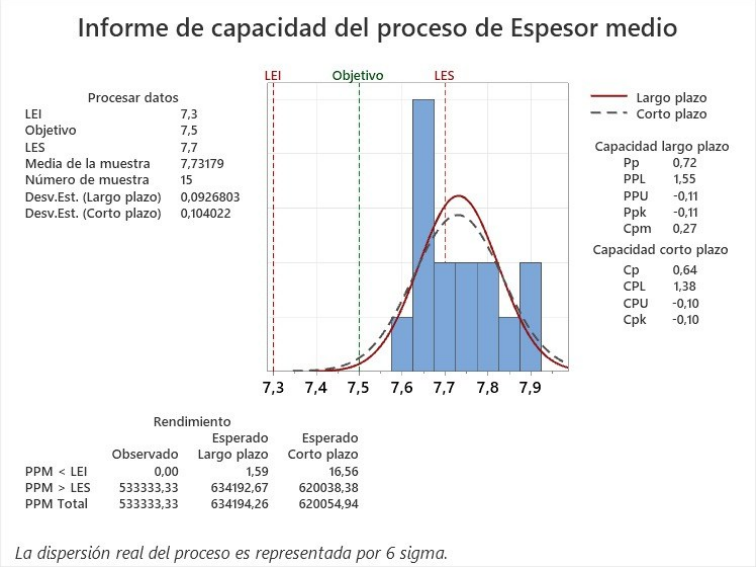


Ilustración 35.. *Informe gráfico Minitab para el Espesor medio del Mango con pie de rey*

Para mejorar estos detalles se podría tomar a consideración reducir la velocidad de impresión y usar cerramiento para minimizar deformaciones en el largo, esto de la mano de aplicar compensación dimensional en XY para el ancho inferior y por último llega a mantener parámetros actuales para espesores, ya que presentan excelente capacidad.

6.3.2 GRÁFICOS CAPACIDAD DE PROCESO CON MICROMETRO (RESOLUCIÓN 0,01mm) ANÁLOGO

6.3.2.1 MORDAZA MÓVIL

Para el análisis gráfico se puede denotar una distribución ajustada de manera adecuada a la curva normal, puesto que las mediciones se concentran alrededor de 11,95 – 12,00 mm, mostrando poca dispersión en la prueba, esto de la mano el espesor de la mordaza móvil medido con micrómetro es una de las dimensiones más confiables del conjunto, mostrando una estabilidad y centrado, lo que confirma que, al menos en este parámetro crítico, la Creality Ender-3 S1 Pro trabajando con ABS logra resultados de calidad industrial. (ver figura 36)

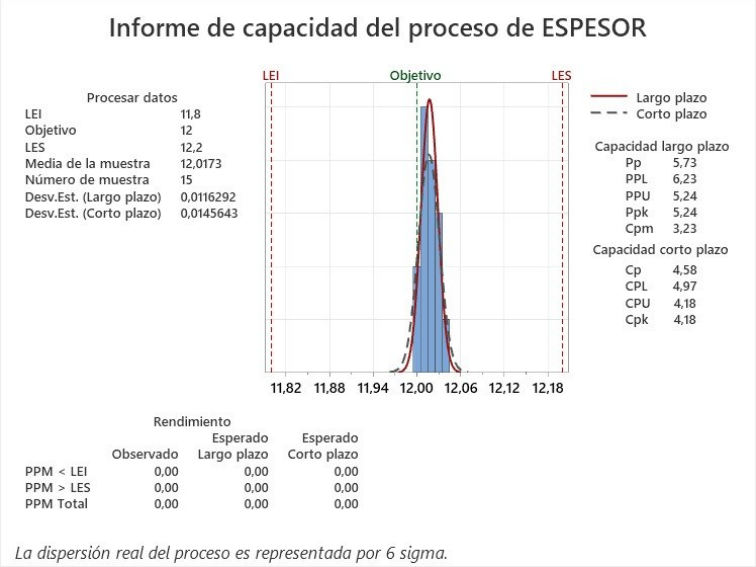


Ilustración 36. *Informe gráfico Minitab para el Espesor de la Mordaza móvil con micrómetro*

6.3.2.2 TUERCA DE AJUSTE

En el análisis grafico (ver figura 37 y 38) se puede denotar que, las mediciones con el micrómetro para la tuerca de ajuste, presenta un comportamiento con excelente control de variabilidad en ambas dimensiones (σ muy baja), presentando un ligero sesgo en el diámetro exterior que reduce su Cpk, aunque sigue dentro de tolerancia y mostrando un espesor altamente confiable, con histograma y gráfico de control que respaldan una capacidad superior.

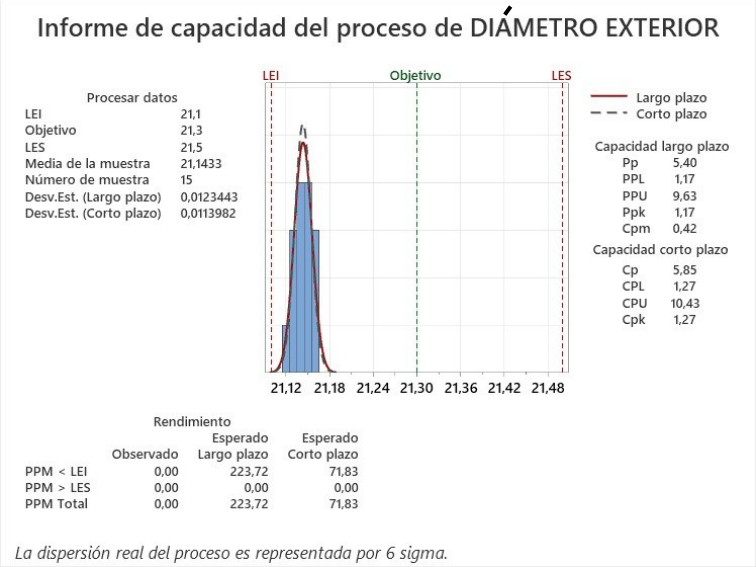


Ilustración 37. *Informe gráfico Minitab para el Diámetro exterior de la Tuerca de ajuste con micrómetro*

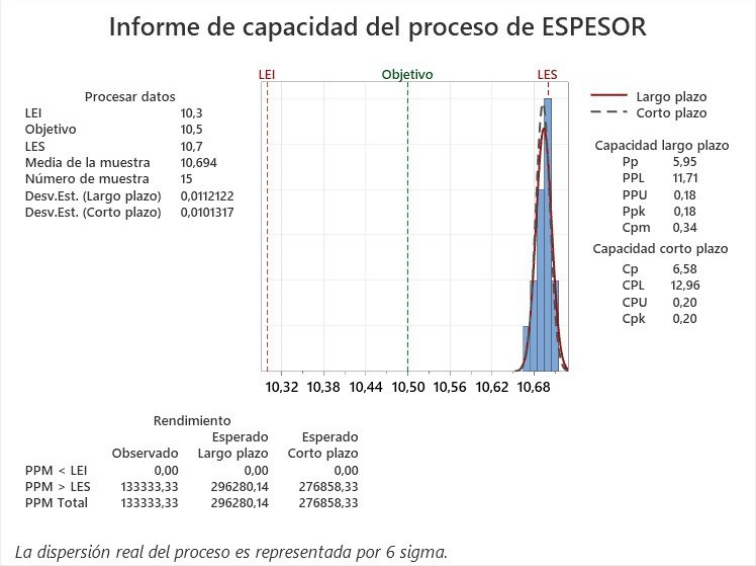


Ilustración 38. *Informe gráfico Minitab para el Espesor de la Tuerca de ajuste con micrómetro*

6.3.2.3 CARCASA

El análisis gráfico para el espesor de la carcasa (ver figura 39), medido con micrómetro evidencia un proceso estable pero descentrado. La impresora logra baja variabilidad (σ pequeña), sin embargo, la media desplazada hacia valores inferiores disminuye el índice Cpk.

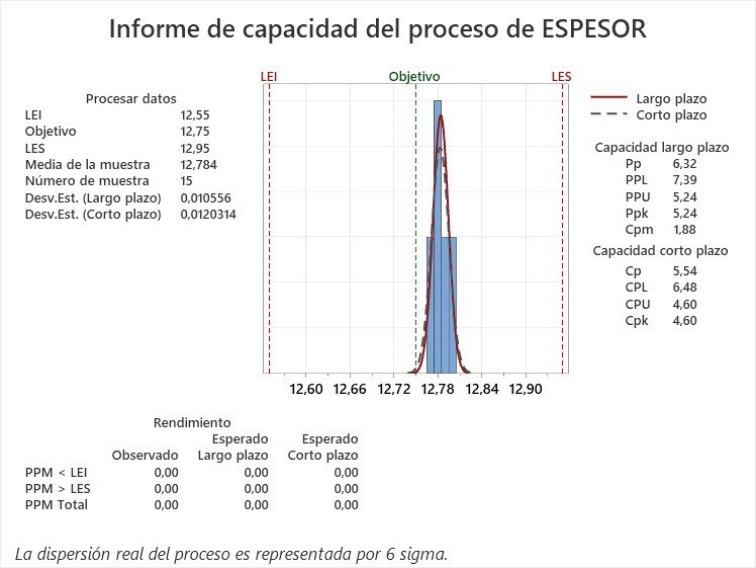


Ilustración 39. *Informe gráfico Minitab para el Espesor de la Carcasa con micrómetro*

6.3.2.4 CREMALLERA

Con los gráficos para el mango (ver figura 40 y 41) confirman que la cremallera es la pieza más confiable cuando se mide con micrómetro: tanto ancho como espesor cumplen y superan ampliamente los requisitos de capacidad de proceso, esto se debe gracias a que la variabilidad es mínima y la estabilidad está garantizada en el tiempo de muestreo.

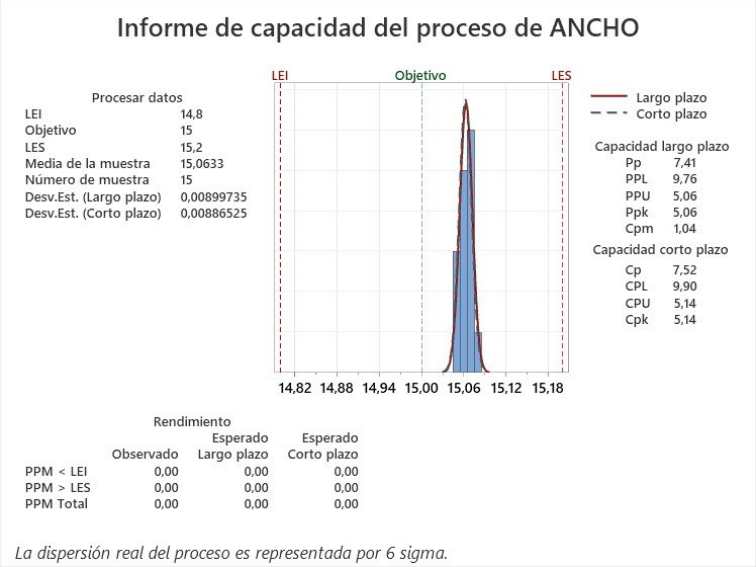


Ilustración 40. *Informe gráfico Minitab para el Ancho de la Cremallera con micrómetro*

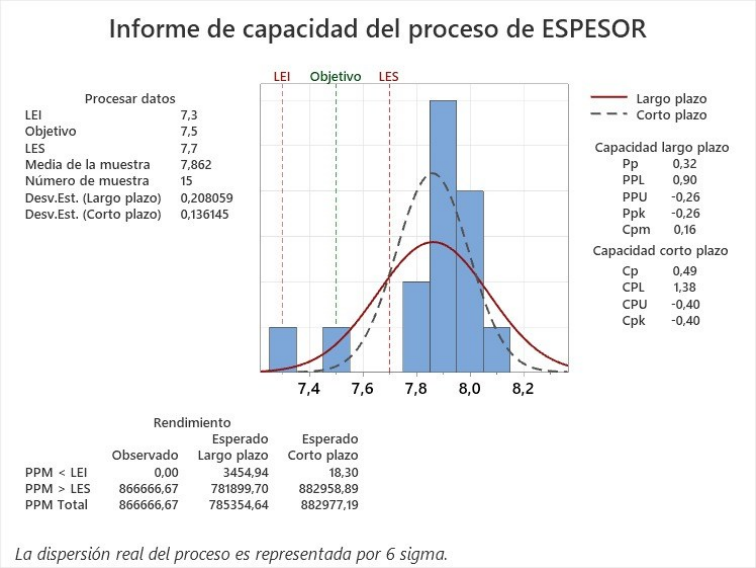


Ilustración 41. *Informe gráfico Minitab para el Espesor de la Cremallera con micrómetro*

6.3.2.5 MANGO

Para este caso que son más puntos a tener en cuenta, se puede ver que el mango muestra un excelente desempeño cuando se mide con micrómetro, se logra destacar especialmente el espesor medio y ancho superior, donde Cp y Cpk superan 2,0. Por el otro lado vemos que el ancho inferior es el más débil, aunque sigue mostrando Cpk > 1,0, lo que lo hace aceptable.
Las gráficas (ver figura 42, 43, 44 y 45) brindan la oportunidad de confirmar procesos con distribución normal, centrados y con baja dispersión. Los gráficos X̄–R corroboran la estabilidad de los subgrupos.

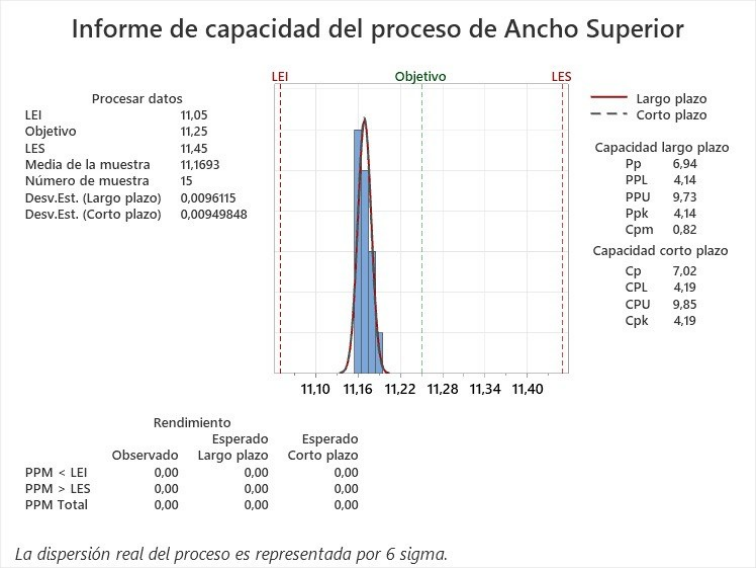


Ilustración 42. *Informe gráfico Minitab para el Ancho superior del mango con micrómetro*

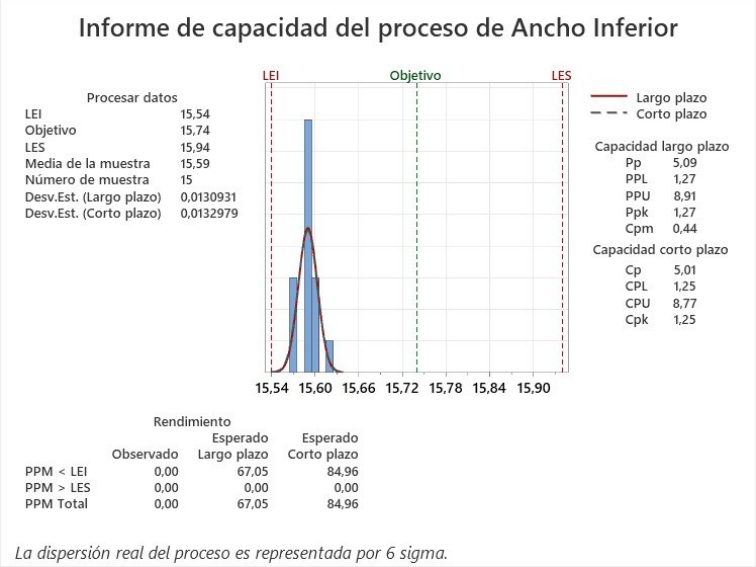


Ilustración 43. *Informe gráfico Minitab para el Ancho inferior del mango con micrómetro*

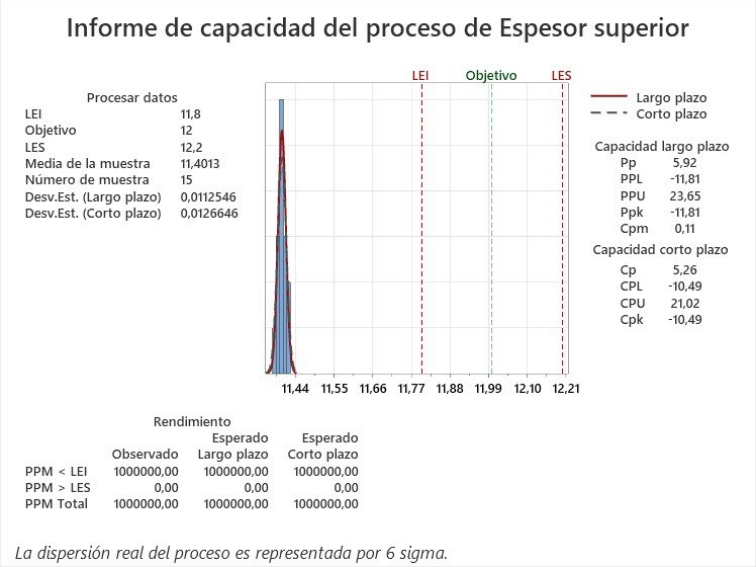


Ilustración 44. *Informe gráfico Minitab para el Espesor superior del mango con micrómetro*

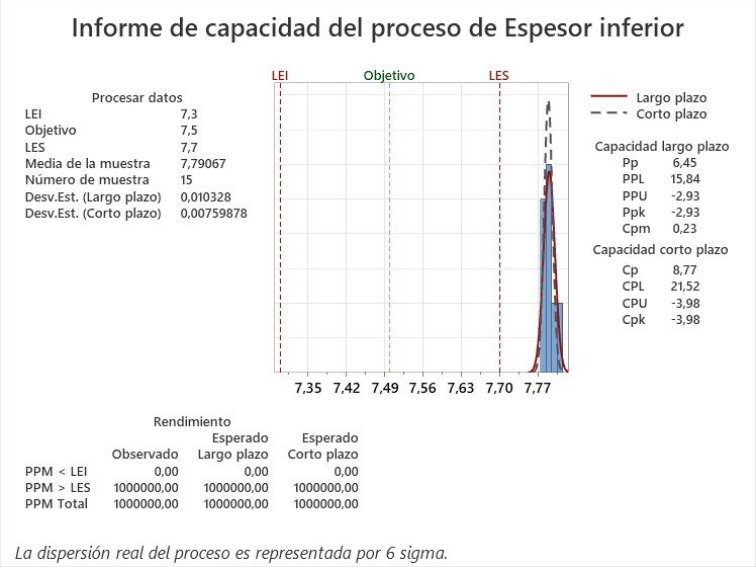


Ilustración 45. *Informe gráfico Minitab para el Espesor inferior del mango con micrómetro*

6.3.3 *GRÁFICOS* CAPACIDAD DE PROCESO CON ESCÁNER LASER 3D FREE SCAN COMBO SERIES (RESOLUCIÓN 0.02mm)

6.3.3.1 MORDAZA MÓVIL

Para el análisis con el escáner 3D enfocado en la mordaza móvil, se puede observar que tiene buen desempeño en espesor, pero presenta desviaciones en largo y ancho, esto se puede evidenciar en las gráficas (ver figura 46, 47 y 48) con un proceso estable, aunque con centrado deficiente en dimensiones largas y anchas, lo cual disminuye la capacidad del proceso.

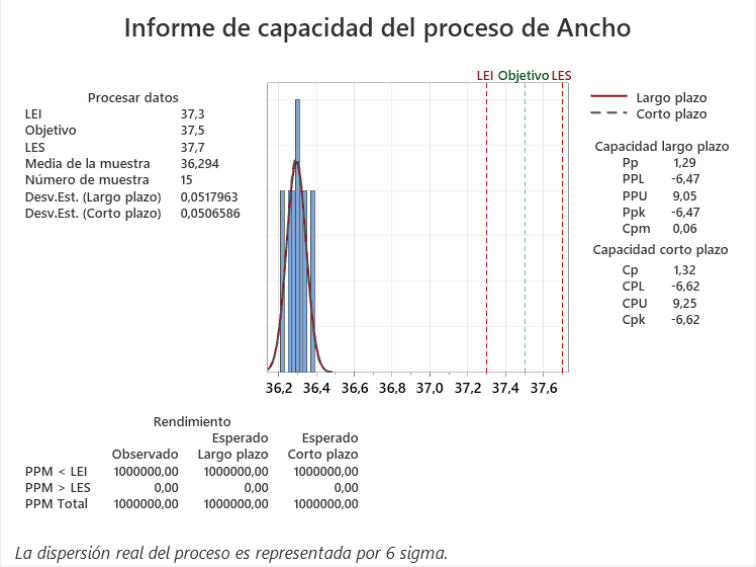


Ilustración 46. *Informe gráfico Minitab para el Ancho de la mordaza móvil con escáner 3D*

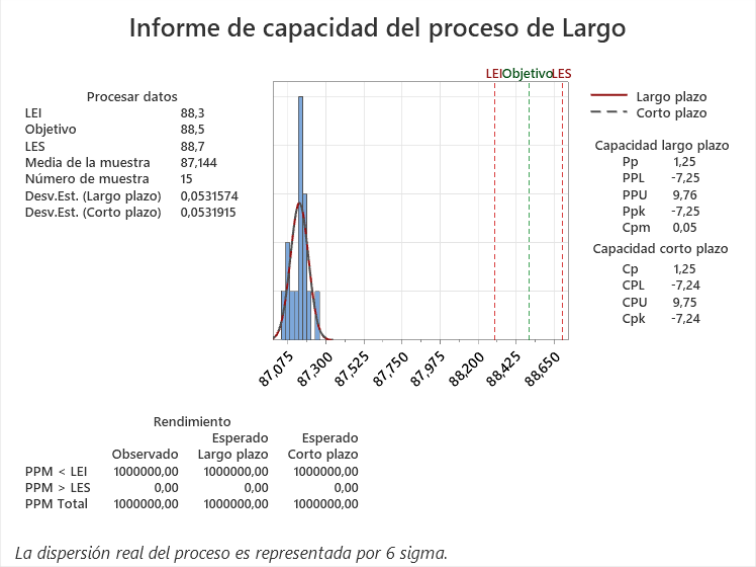


Ilustración 47. *Informe gráfico Minitab para el Largo de la mordaza móvil con escáner 3D*

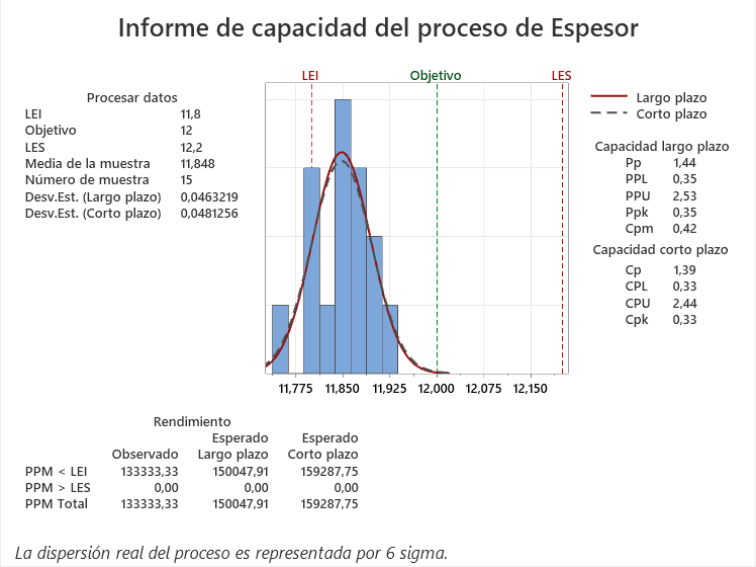


Ilustración 48. *Informe gráfico Minitab para el Espesor de la mordaza móvil con escáner 3D*

Esto se puede ver ya que al presentar los modelos en un programa de software 3D, se vuelve difícil la toma de las medidas precisas en puntos exactos, esto se puede evidenciar en la toma de la gráfica.

6.3.3.2 TUERCA DE AJUSTE

Para el escaneo 3D en esta pieza se puede corroborar las mediciones tomadas anteriormente con el pie de rey y el micrómetro, ya que el espesor y el diámetro interno son dimensiones con alta capacidad y buen centrado, esto se puede evidenciar en el diámetro exterior, mostrando baja dispersión, pero ligero sesgo hacia el LSL, lo que reduce el Cpk y obliga a actuar sobre el centrado del proceso si la tolerancia funcional lo exige.

Los gráficos X̄–R (ver figura 49, 50 y 51) no muestran causas especiales; por tanto, la variación es inherente a la configuración actual y puede mitigarse por ajustes de calibración y compensación dimensional.

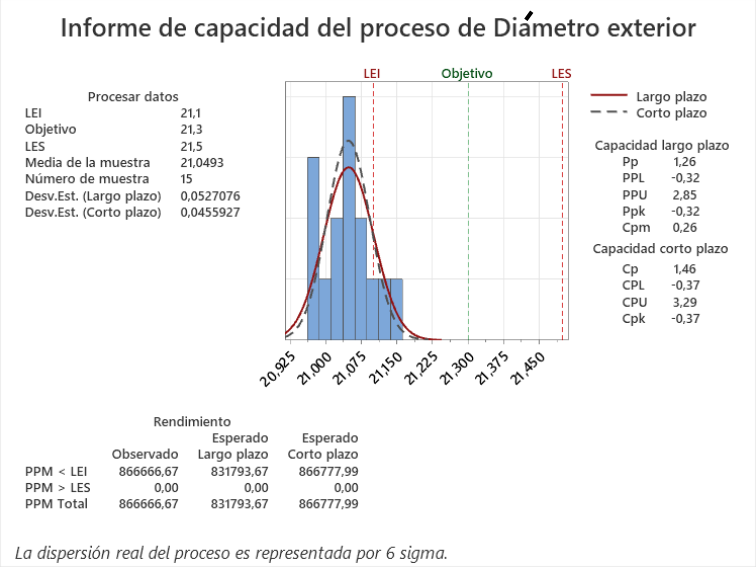


Ilustración 49. *Informe gráfico Minitab para el Diámetro exterior de la tuerca de ajuste con escáner 3D*

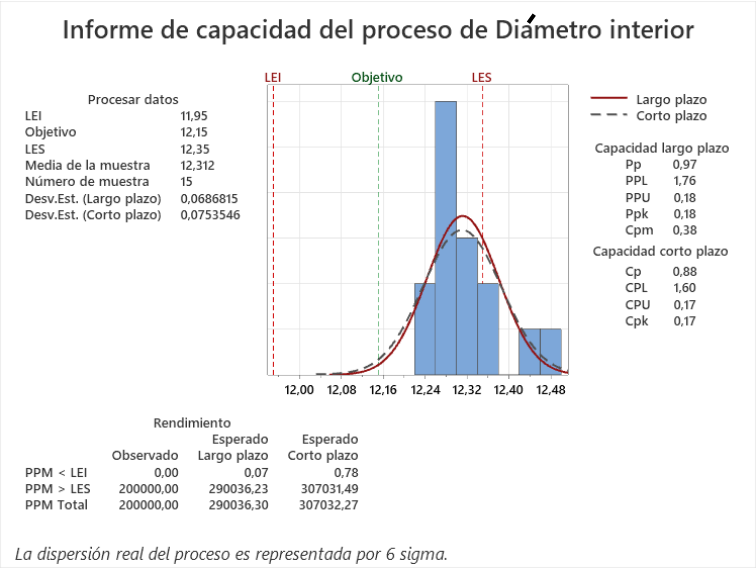


Ilustración 50. *Informe gráfico Minitab para el Diámetro interno de la tuerca de ajuste con escáner 3D*

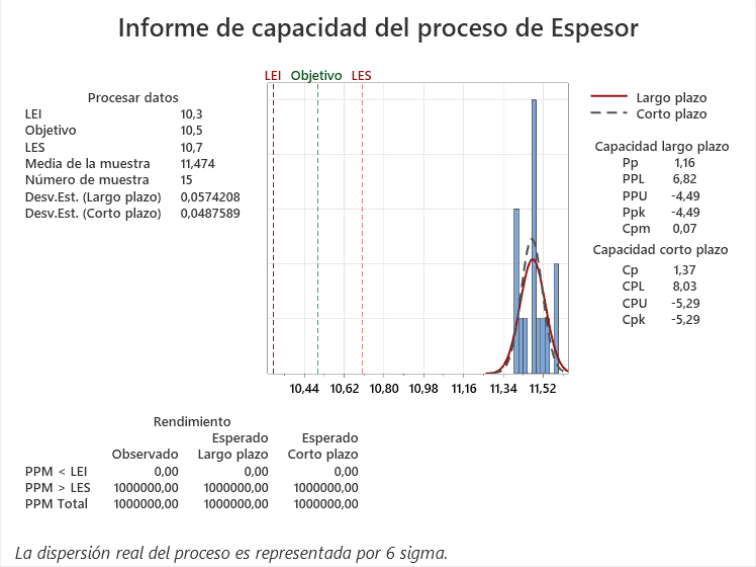


Ilustración 51. *Informe gráfico Minitab para el Espesor de la tuerca de ajuste con escáner 3D*

6.3.3.3 CARCASA

Para la carcasa se puede observar comportamientos bastante variables, esto se debe a que el espesor general es aceptable, pero con tendencia a valores bajos. Esto lo podemos detallar en la cavidad tuerca, donde el espesor es la dimensión más conflictiva con un sesgo claro hacia el límite inferior y Cp < 1, se requiere ajustar (flow rate, compensación CAD/slicer).

Por otro lado, la cavidad mordaza, presenta un espesor confiable dentro de la carcasa, con variabilidad y centrado moderados. Demostramos que los gráficos $\bar{X}$–R (ver figura 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58 y 59) confirman que la variabilidad es inherente al proceso FDM con ABS, no debida a causas especiales de impresión.

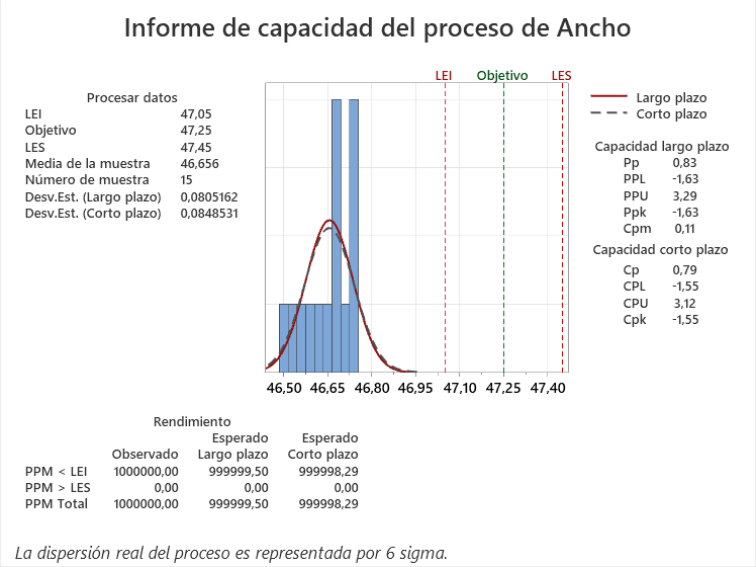


Ilustración 52. *Informe gráfico Minitab para el Ancho de la Carcasa con escáner 3D*

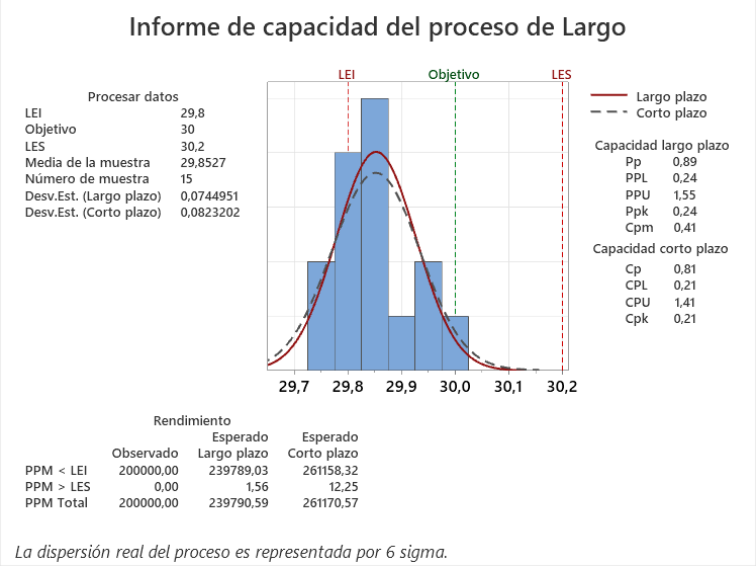


Ilustración 53. *Informe gráfico Minitab para el Largo de la Carcasa con escáner 3D*

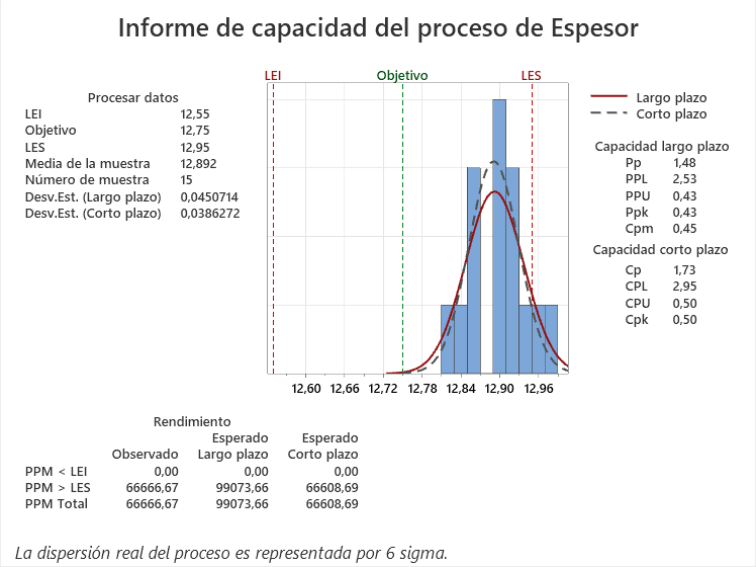


Ilustración 54. *Informe gráfico Minitab para el Espesor de la Carcasa con escáner 3D*

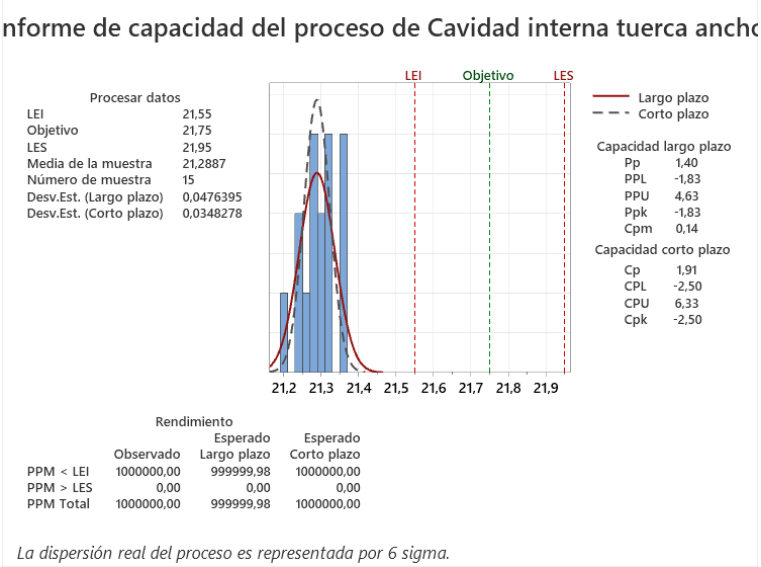


Ilustración 55. *Informe gráfico Minitab para la Cavidad interna tuerca ancho de la Carcasa con escáner 3D*

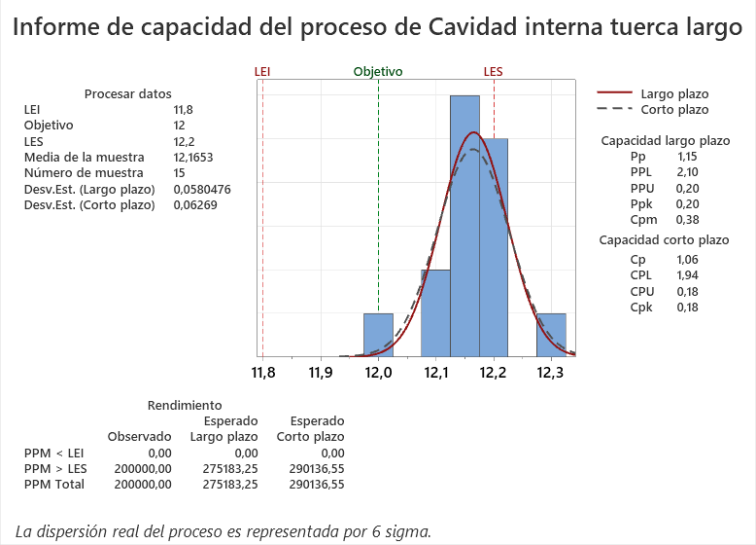


Ilustración 56. *Informe gráfico Minitab para la Cavidad interna tuerca largo de la Carcasa con escáner 3D*

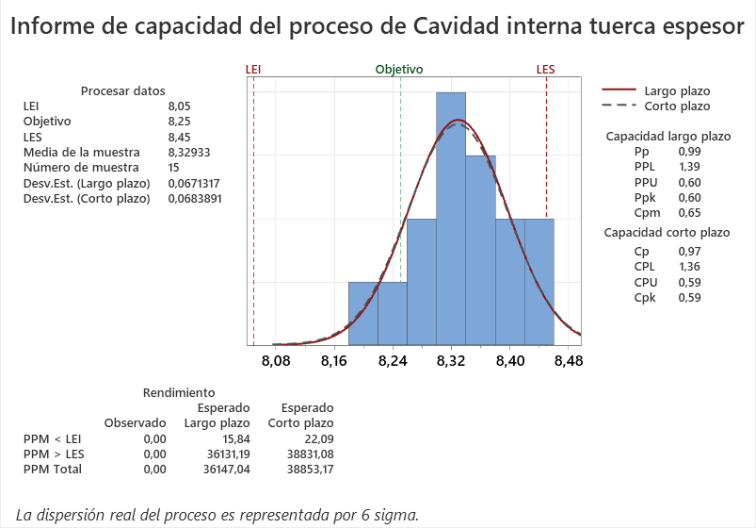


Ilustración 57. *Informe gráfico Minitab para la Cavidad interna tuerca-espesor, de la Carcasa con escáner 3D*

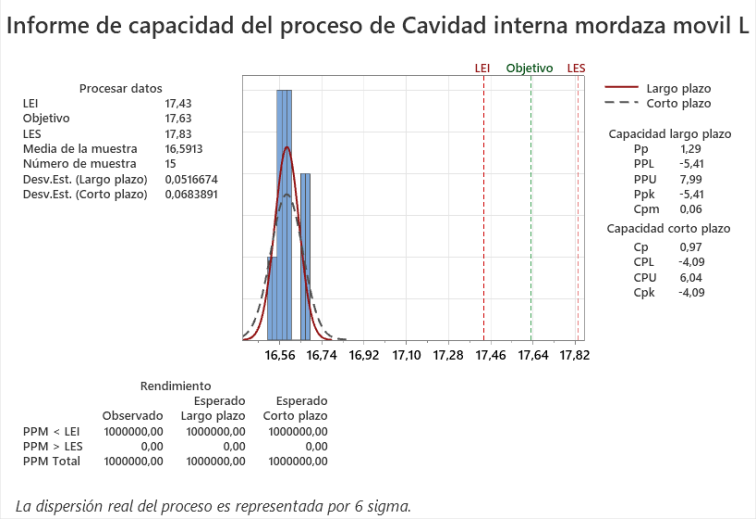


Ilustración 58. *Informe gráfico Minitab para la Cavidad interna mordaza móvil-largo de la Carcasa con escáner 3D*

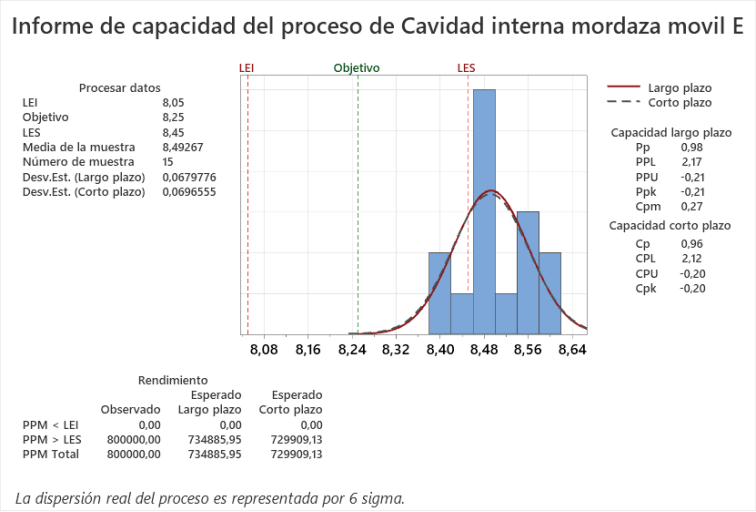


Ilustración 59. *Informe gráfico Minitab para la Cavidad interna mordaza móvil-espeso de la Carcasa con escáner 3D*

6.3.3.4 CREMALLERA

En la cremallera se ve un comportamiento parejo, esto se debe a que es la más sólida en términos de capacidad dimensional con escáner 3D. Se observa que el ancho tiene excelente capacidad, con leve sesgo positivo, pero sin comprometer la funcionalidad. Por otro lado, el espesor muestra el mejor desempeño de todo el conjunto de piezas, con índices de capacidad muy superiores a 1,33 (criterio de

proceso capaz), todo esto nos lo confirman los histogramas y gráficos X̄–R (ver figura 60 y 61) siendo un proceso estable y con dispersión mínima.

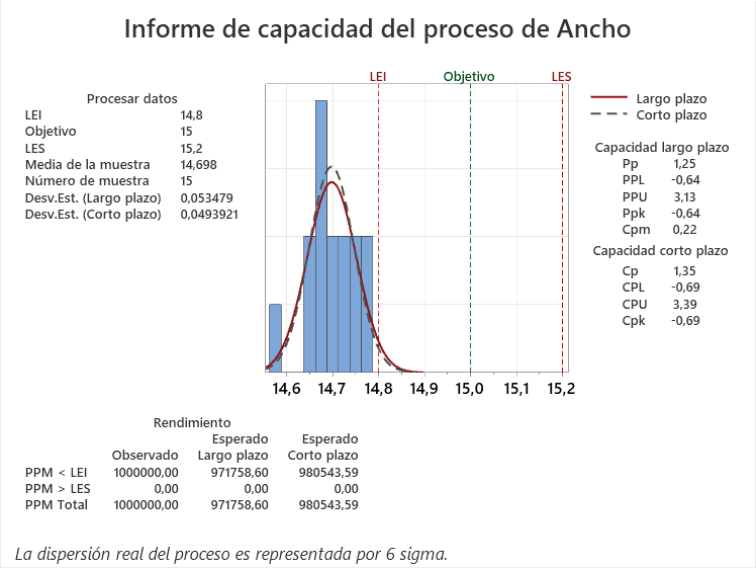


Ilustración 60. *Informe gráfico Minitab para el Ancho de la Cremallera con escáner 3D*

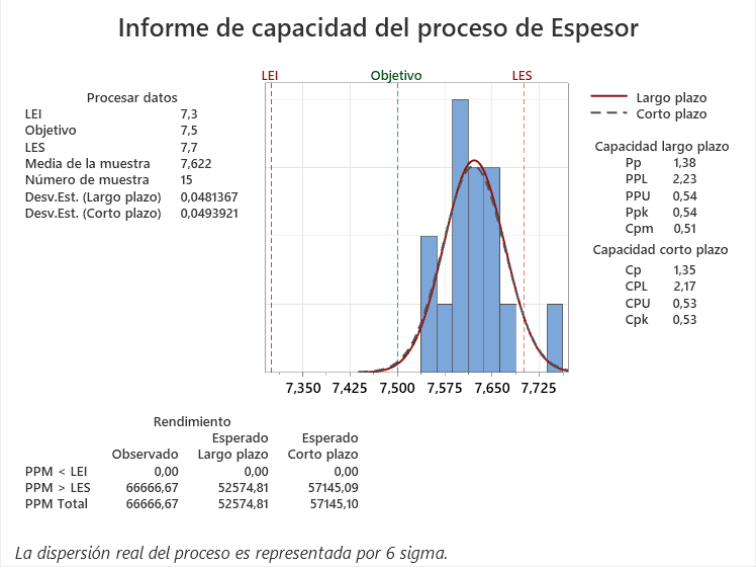


Ilustración 61. *Informe gráfico Minitab para el Espesor de la Cremallera con escáner 3D*

6.3.3.5 MANGO

En este caso se tiene un comportamiento mixto, tendiendo a ser favorable, esto se debe a que es altamente confiable la toma de datos en: ancho superior y espesores (superior y medio), pero más débil en el ancho inferior, por el sesgo hacia valores mayores.
Los gráficos de control (ver figura confirman que el proceso es estable, y los histogramas muestran que la dispersión es baja en todas las dimensiones.

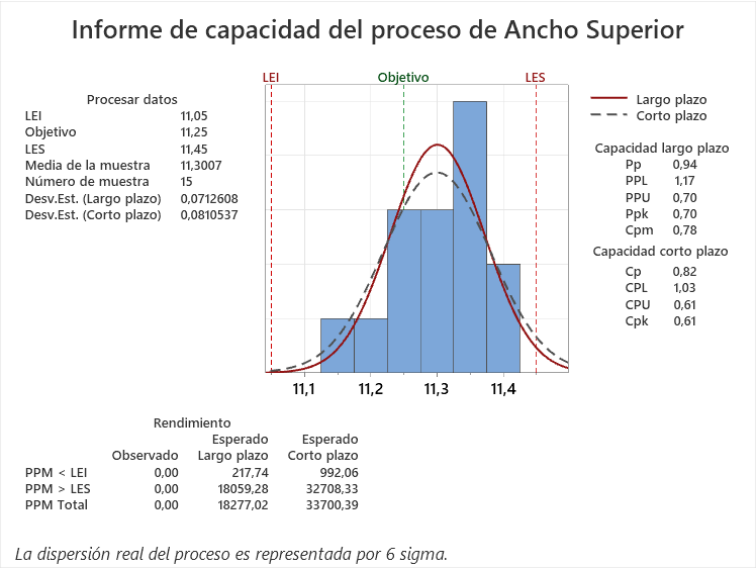


Ilustración 62.. *Informe gráfico Minitab para el Ancho Superior del Mango con escáner 3D*

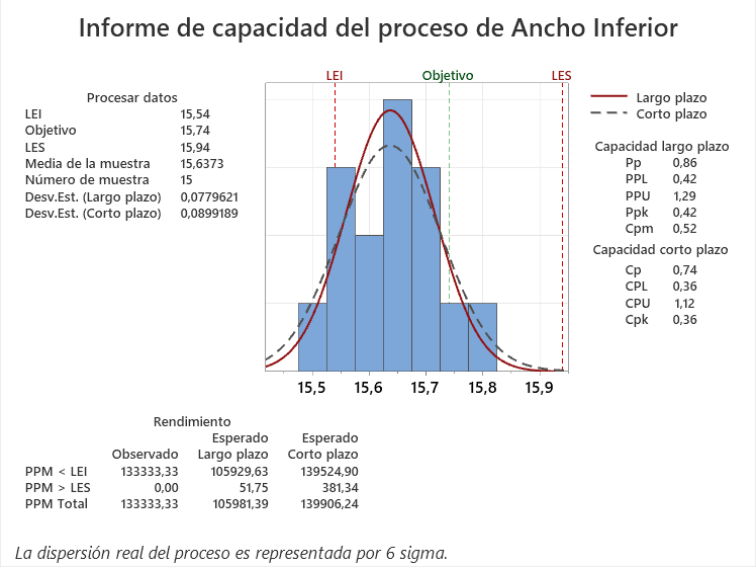


Ilustración 63. *Informe gráfico Minitab para el Ancho Inferior del Mango con escáner 3D*

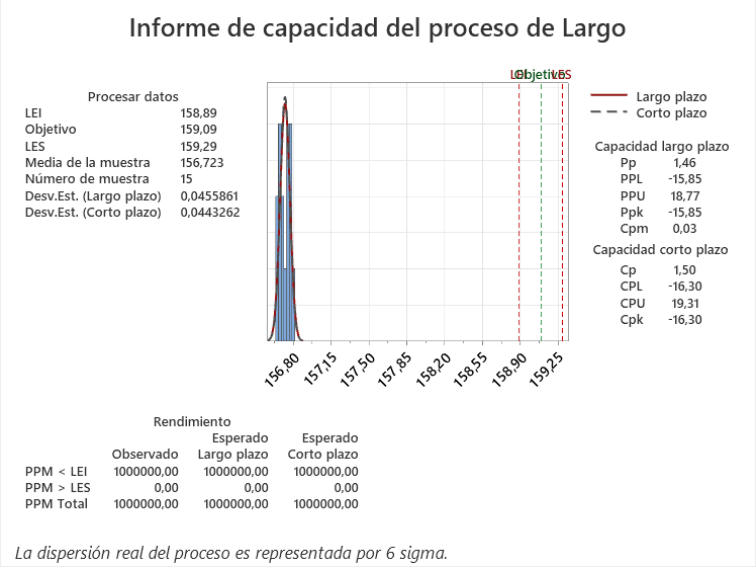


Ilustración 64. *Informe gráfico Minitab para el Largo del Mango con escáner 3D*

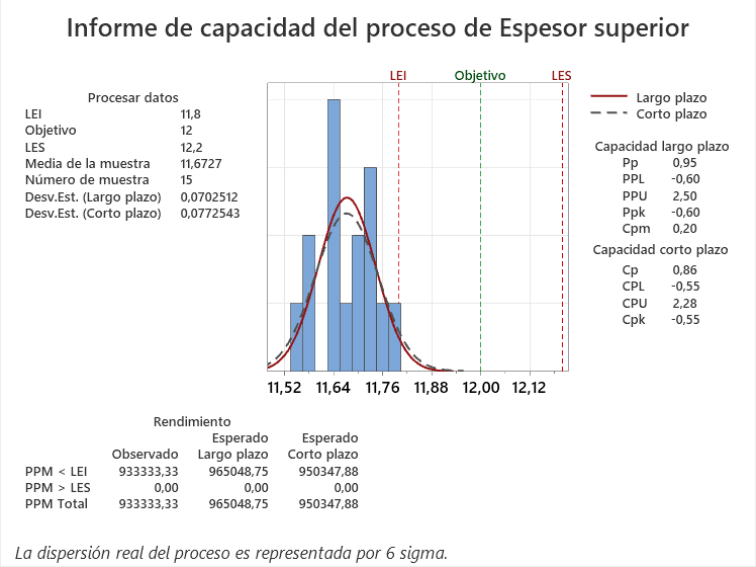


Ilustración 65. *Informe gráfico Minitab para el Espesor superior del Mango con escáner 3D*

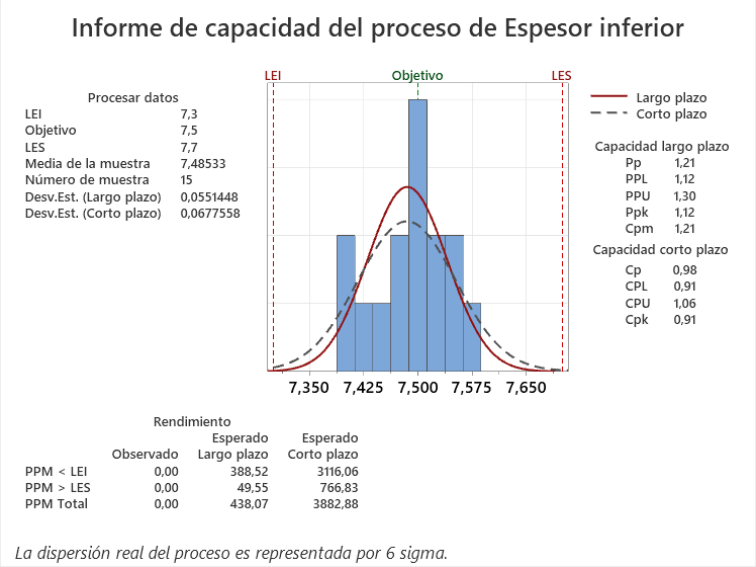


Ilustración 66. *Informe gráfico Minitab para el Espesor inferior del Mango con escáner 3D*

7. CONCLUSIONES

- Mediante el proceso de medición con calibrador pie de rey (resolución de 0,01mm) donde los muestran que la tuerca y el mango presentan baja capacidad (Cp < 1) y desalineación respecto a las tolerancias (Cpk muy bajos o negativos), lo que evidencia un proceso inestable. En cambio, la cremallera presenta mejor desempeño, con Cp cercanos a 1 y Cpk moderados, lo que indica que el proceso tiene potencial, pero requiere ajustes de centrado y calibración.

- Mediante el proceso de medición con micrómetro de exteriores (resolución de 0,01mm) muestran alta precisión del proceso (Cp altos), pero con problemas de centrado (Cpk bajos o negativos). La mordaza y algunos anchos son confiables, mientras que los espesores del mango y cremallera resultan críticos por estar fuera de tolerancia, requiriendo ajustes de calibración en la impresión.

- Mediante el proceso de medición con escáner laser (resolución de 0,02mm) muestra desviaciones y falta de centrado en varias dimensiones (carcasa, cremallera y mango), con casos fuera de tolerancia. Aunque algunos Cp y Cpk son aceptables, el proceso no es estable ni repetible debido al programa donde se tomen las mediciones.

- Las probetas fabricadas se lograron mediante sistemas de diseño a través de un software de modelado 3D geométrico (SolidWorks) y se llevaron a cabo en la impresora 3d creality ender-3 s1 pro con abs para un número total de 15 muestras, según lo calculado en el apartado de proceso de impresión.

- Se pudieron medir todas las piezas de acuerdo a las medidas criticas establecidas en cada una de ellas, donde cada uno de los resultados esta presente en las tablas puestas en el apartado de resultados dimensionales para pie de rey digital, micrómetro de exteriores y escáner laser 3D.

- Los procedimientos metodológicos propuestos para llevar a cabo el presente proyecto cumplieron con las especificaciones técnicas solicitadas en las referencias normativas, donde fueron de manera asertiva medir con estos 3 instrumentos las medidas criticas establecidas (espesores, anchos, longitudes totales, cavidades, diámetros, alojamientos, entre otros).

- Con respecto a la evaluación metrológica se observo que fue muy coherente la utilización de los 3 sistemas de medición (pie de rey digital, micrómetro de exteriores análogo y escáner laser 3D) para lograr los resultados que se buscaban en el estudio de capacidad de proceso.

8. RECOMENDACIONES

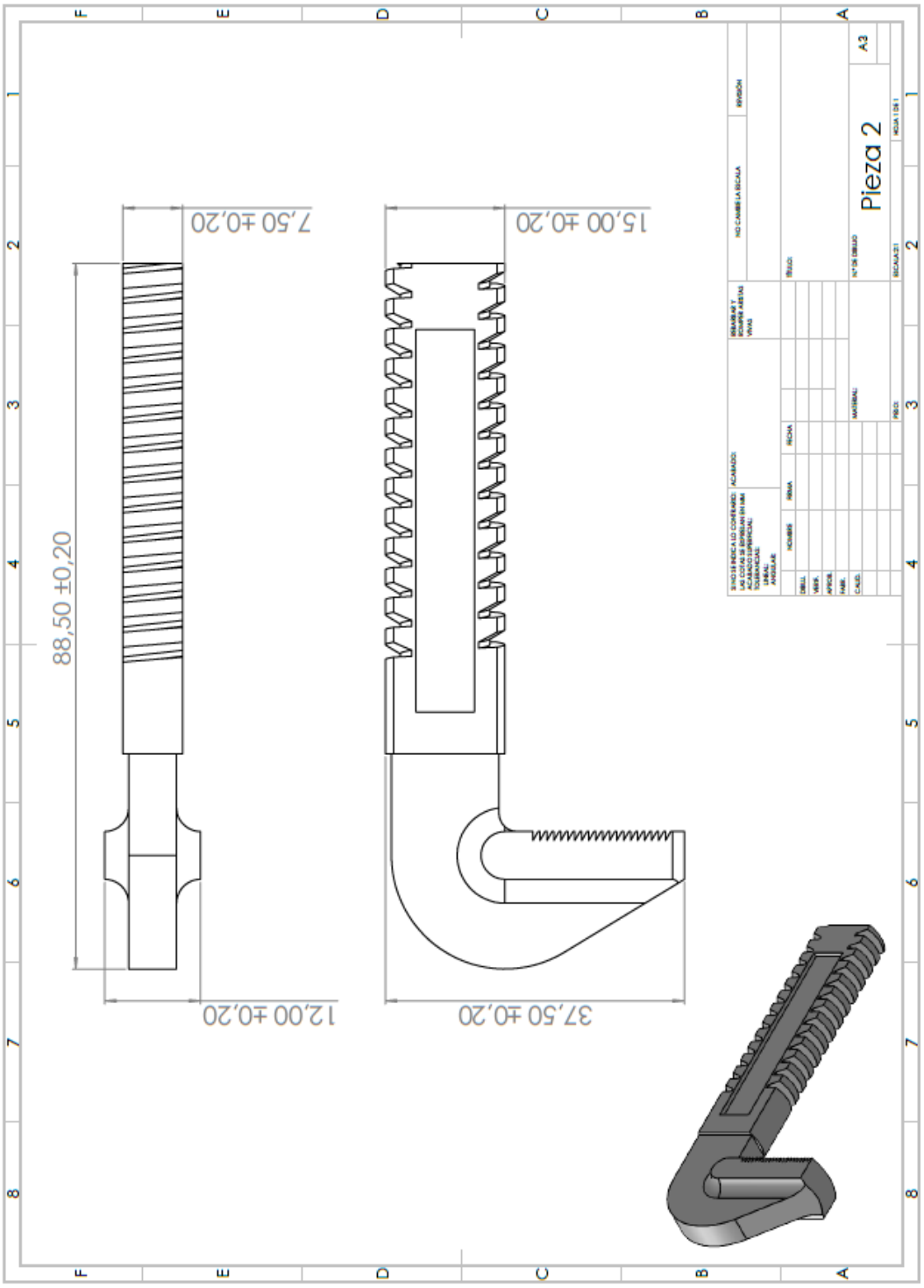
- Se recomienda implementar una compensación en los ejes XY desde el slicer o firmware, tomando como referencia las desviaciones encontradas en piezas como la mordaza y la carcasa, lo cual permitirá mejorar el centrado y aumentar los valores de Cpk.

- La temperatura ambiente no controlada puede generar deformaciones en ABS; por ello, es aconsejable usar un cerramiento en la impresora para minimizar contracción, alabeo y variaciones dimensionales.

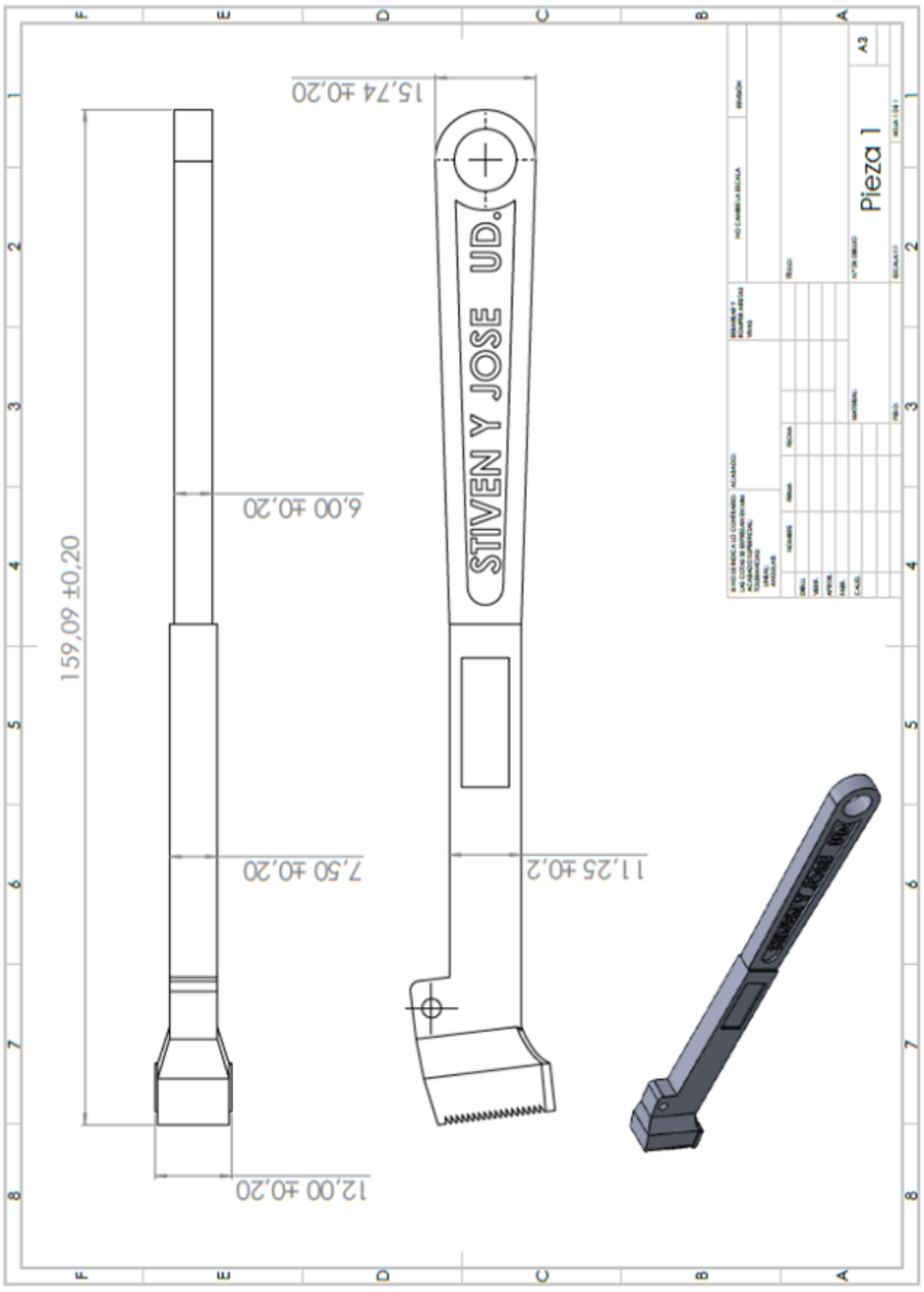
- Para un análisis más confiable, se sugiere complementar las mediciones con pie de rey y micrómetro con escaneo 3D, ya que este último permite evaluar desviaciones geométricas globales.

- Finalmente, se recomienda llevar un registro sistemático de parámetros de impresión, condiciones ambientales y comportamiento del material, con el fin de asegurar trazabilidad y repetibilidad en futuros estudios.

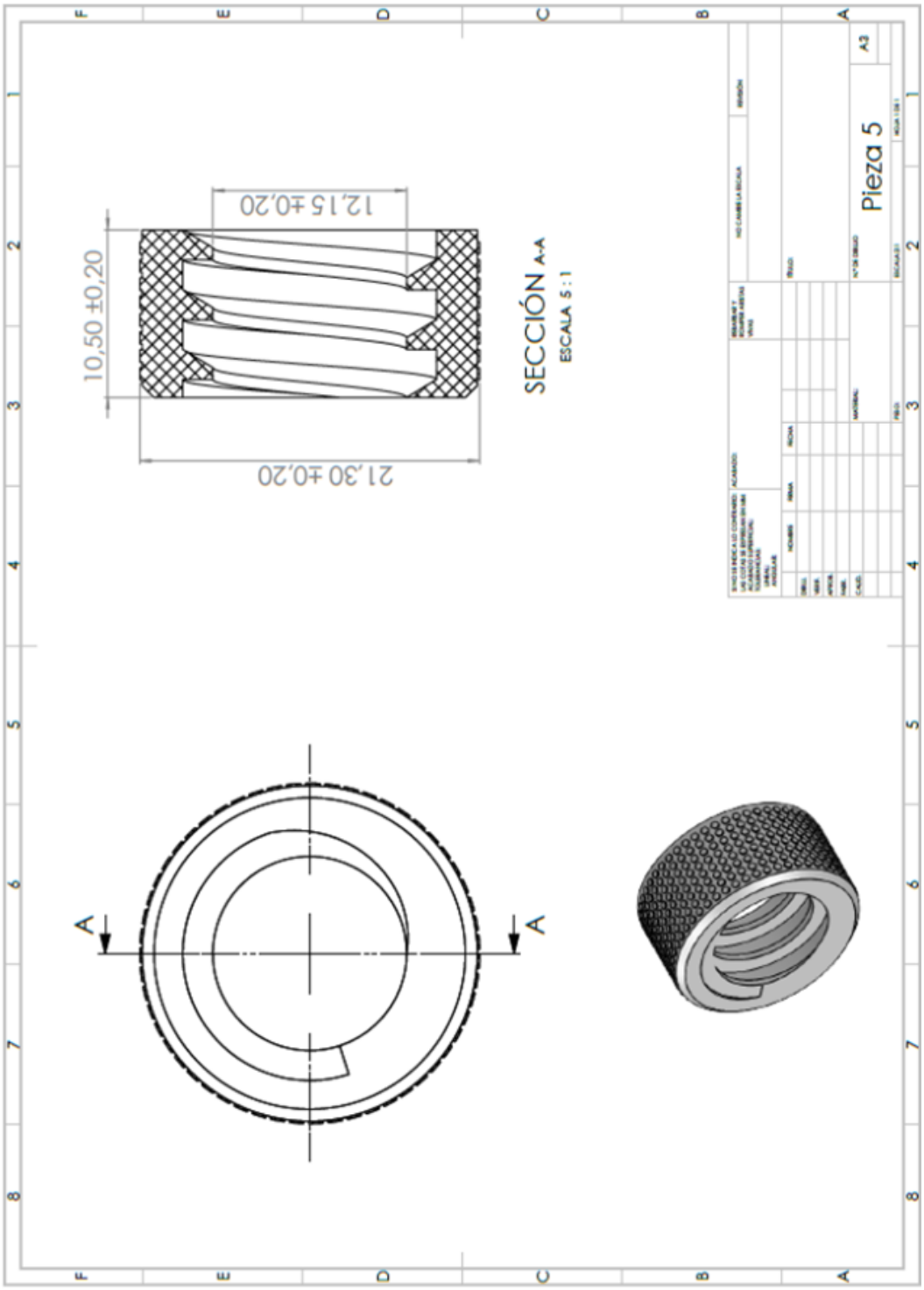
ANEXO A



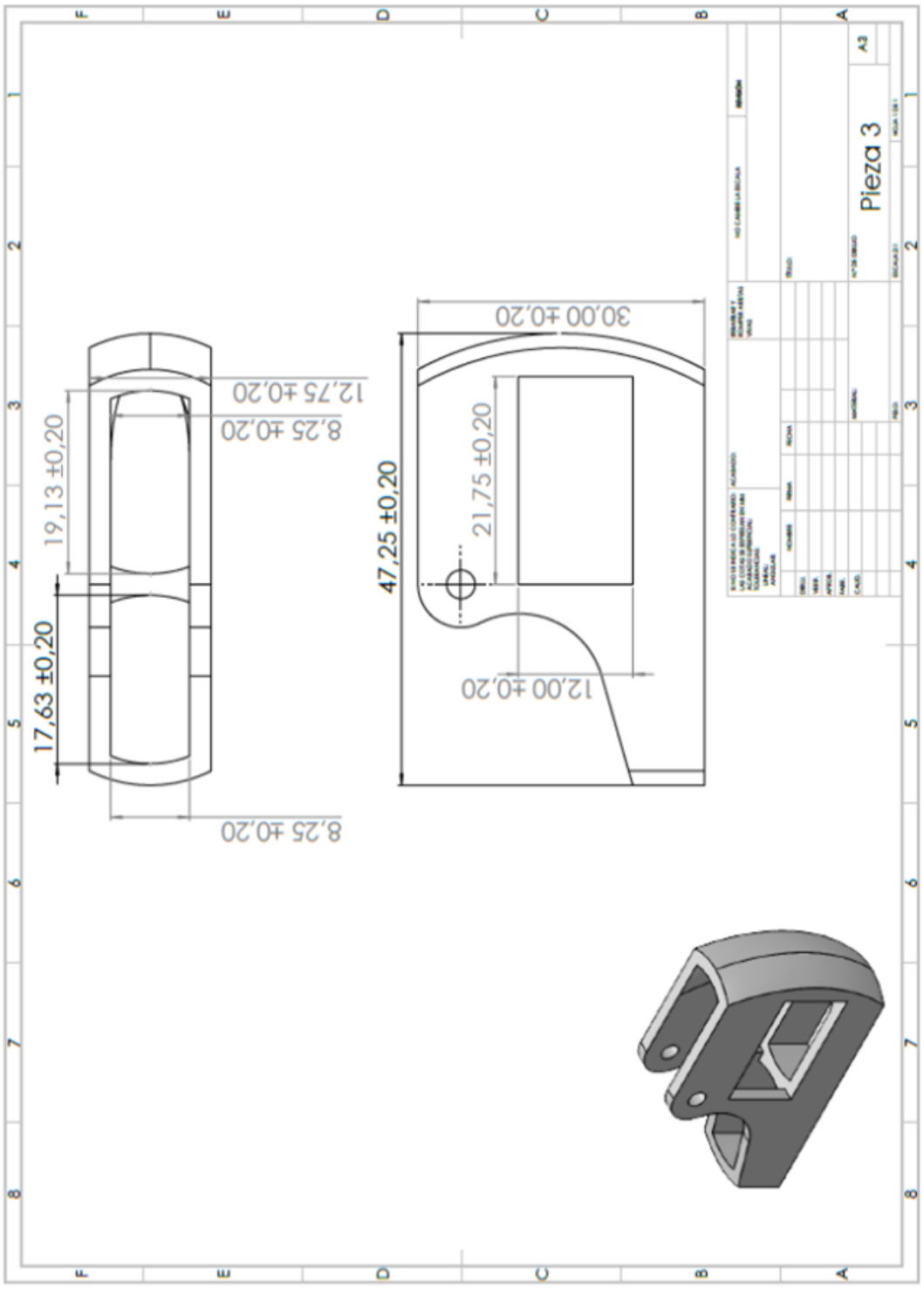
ANEXO A


Pieza 1
A3
STIVEN Y JOSE UD.
15,74 ±0,20
6,00 ±0,20
7,50 ±0,20
11,25 ±0,2
12,00 ±0,20
159,09 ±0,20

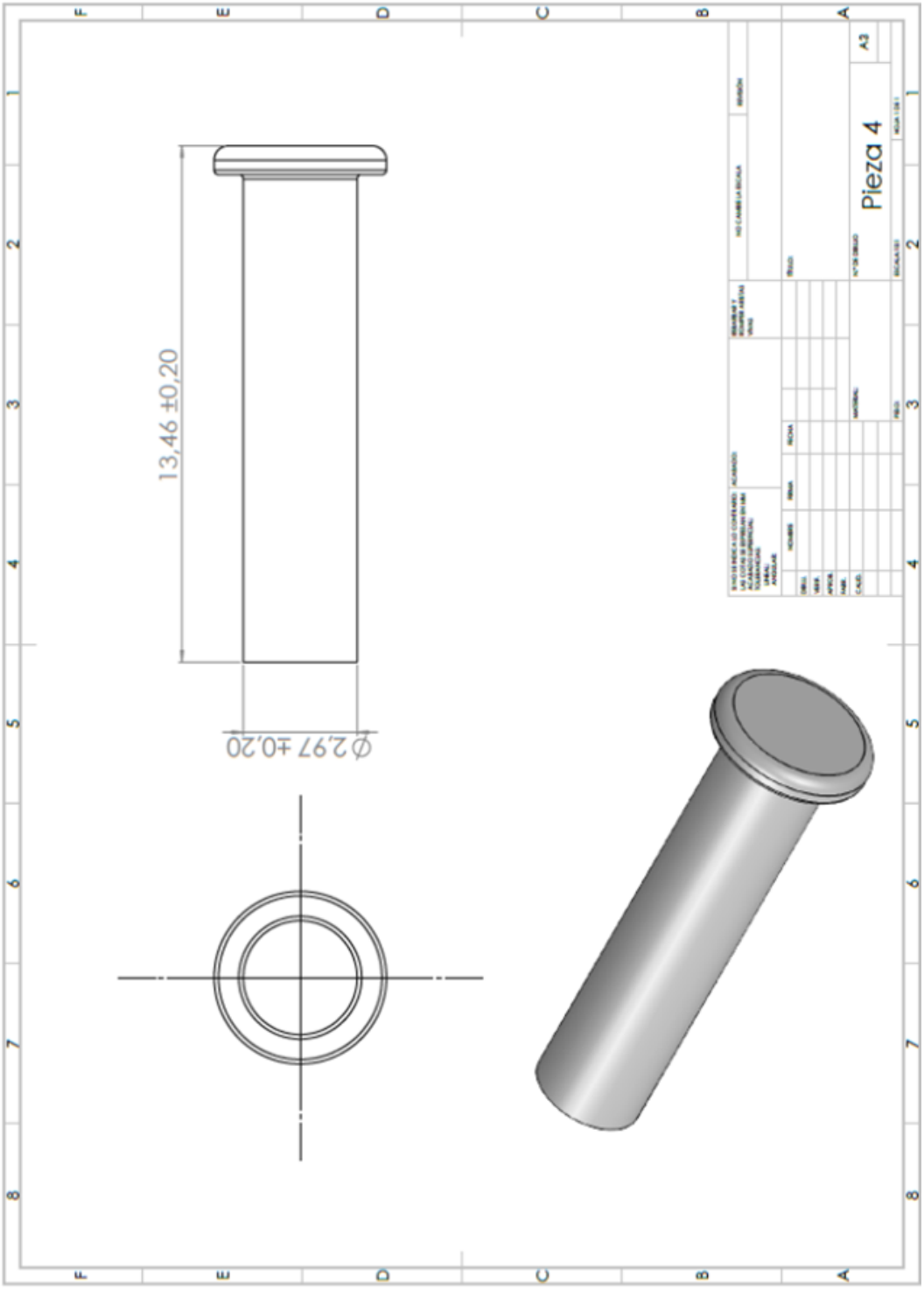
ANEXO A



ANEXO A


Pieza 3
A3
30,00 ±0,20
47,25 ±0,20
21,75 ±0,20
12,00 ±0,20
12,75 ±0,20
8,25 ±0,20
19,13 ±0,20
17,63 ±0,20
8,25 ±0,20

ANEXO A



ANEXO B

PIE DE REY																
PARTE	DIMENSIONES	LECTURA 1	LECTURA 2	LECTURA 3	LECTURA 4	LECTURA 5	LECTURA 6	LECTURA 7	LECTURA 8	LECTURA 9	LECTURA 10	LECTURA 11	LECTURA 12	LECTURA 13	LECTURA 14	LECTURA 15
Mordaza movil	Ancho	37,62	37,51	37,72	37,85	37,47	37,56	37,79	37,38	37,58	37,75	37,53	37,55	37,61	37,77	37,56
	Largo	88,33	88,27	88,27	88,62	88,62	88,46	88,38	88,43	88,53	88,21	88,49	88,16	88,25	88,45	88,14
	Espesor	12,00	11,99	11,91	11,97	11,72	11,82	11,93	12,09	11,98	12,00	12,07	11,91	12,03	11,92	11,83
Tuerca de ajuste	Diametro exterior	21,12	21,08	21,18	21,15	21,12	21,36	21,16	21,22	21,34	20,99	21,02	21,29	21,04	21,12	21,23
	Diametro interior	11,96	12,05	12,14	12,11	12,07	11,88	12,04	11,99	11,83	12,10	12,04	11,96	11,94	11,84	11,98
	Espesor	10,71	10,76	10,63	10,83	10,60	10,50	10,81	10,67	10,70	10,63	10,55	10,84	10,64	10,88	10,79
Carcaza	Ancho	47,05	47,02	46,94	46,98	46,93	47,26	47,07	47,17	46,92	47,07	47,17	47,02	47,15	46,94	46,91
	Largo	30,12	30,16	30,08	30,18	29,92	30,19	30,38	30,12	30,12	30,14	29,93	30,16	29,96	30,08	30,24
	Espesor	12,77	12,70	12,82	12,87	12,80	12,63	12,74	12,97	12,57	12,74	12,71	12,78	12,84	12,93	12,74
	Cavidad interna tuerca ancho	21,72	21,80	21,77	21,77	21,66	21,62	21,61	21,64	21,75	21,80	21,75	21,67	21,90	21,87	21,68
	Cavidad interna tuerca largo	11,96	11,88	11,97	12,09	11,99	12,02	11,94	12,01	12,11	11,94	11,97	11,99	11,99	11,82	11,77
	Cavidad interna tuerca espesor	8,13	8,03	8,15	8,19	8,08	8,27	8,12	8,13	8,11	8,14	8,20	8,20	8,04	8,28	8,02
	Cavidad interna mordaza movil Largo	17,53	17,54	17,50	17,43	17,52	17,46	17,54	17,57	17,68	17,56	17,47	17,49	17,54	17,54	17,68
	Cavidad interna mordaza movil E	8,24	8,38	8,20	8,19	7,98	8,19	8,14	8,20	8,28	8,26	8,24	8,26	8,23	8,26	7,92
Cremallera	Ancho	15,04	15,01	15,03	15,01	15,02	15,11	14,98	15,26	15,11	15,04	15,02	15,03	14,95	15,03	15,07
	Espesor	8,10	7,90	7,88	7,90	7,96	7,94	7,72	7,58	7,73	7,80	7,90	7,97	7,91	8,00	7,94
Mango	Ancho Superior	11,19	11,29	11,05	11,10	11,05	11,07	11,20	11,03	11,27	11,17	11,20	11,22	11,15	11,29	11,17
	Ancho Inferior	15,58	15,64	15,56	15,61	15,61	15,60	15,48	15,62	15,55	15,64	15,36	15,43	15,62	15,77	15,66
	Largo	158,88	158,72	158,48	159,06	158,86	159,02	158,91	158,89	159,59	158,88	158,84	158,85	158,74	159,12	158,80
	Espesor superior	11,38	11,40	11,36	11,33	11,35	11,34	11,37	11,38	11,53	11,35	11,34	11,35	11,39	11,30	11,25
	Espesor inferior	7,78	7,85	7,66	7,63	7,73	7,74	7,71	7,61	7,91	7,85	7,81	7,67	7,85	7,88	7,69

PIE DE REY																				
PARTE	DIMENSIONES	NOMINAL	LECTURA 1	DIFERENCIA	LECTURA 2	DIFERENCIA	LECTURA 3	DIFERENCIA	LECTURA 4	DIFERENCIA	LECTURA 5	DIFERENCIA	LECTURA 6	DIFERENCIA	LECTURA 7	DIFERENCIA	LECTURA 8	DIFERENCIA	LECTURA 9	DIFERENCIA
Mordaza movil	Ancho	37,50	37,62	-0,12	37,51	-0,01	37,72	-0,22	37,65	-0,15	37,47	0,03	37,56	-0,06	37,79	-0,29	37,38	0,12	37,58	-0,08
	Largo	88,50	88,33	0,17	88,27	0,23	88,27	0,23	88,62	-0,12	88,62	-0,12	88,46	0,04	88,38	0,12	88,43	0,07	88,53	-0,03
	Espesor	12,00	12,00	0,00	11,99	0,01	11,91	0,09	11,97	0,03	11,72	0,28	11,82	0,18	11,93	0,07	12,09	-0,09	11,98	0,02
Tuerca de ajuste	Diametro exterior	21,30	21,12	0,18	21,08	0,22	21,18	0,12	21,15	0,15	21,12	0,18	21,36	-0,06	21,16	0,14	21,22	0,08	21,34	-0,04
	Diametro interior	12,15	11,96	0,19	12,05	0,10	12,14	0,01	12,11	0,04	12,07	0,08	11,88	0,27	12,04	0,11	11,99	0,16	11,83	0,32
	Espesor	10,50	10,7	-0,20	10,76	-0,26	10,63	-0,13	10,83	-0,33	10,60	-0,10	10,50	0,00	10,81	-0,31	10,67	-0,17	10,70	-0,20
Carcaza	Ancho	47,25	47,05	0,20	47,02	0,23	46,94	0,31	46,98	0,27	46,93	0,32	47,26	-0,01	47,07	0,18	47,17	0,08	46,92	0,33
	Largo	30,00	30,12	-0,12	30,16	-0,16	30,08	-0,08	30,18	-0,18	29,92	0,08	30,19	-0,19	30,38	-0,38	30,12	-0,12	30,12	-0,12
	Espesor	12,75	12,77	-0,02	12,70	0,05	12,82	-0,07	12,87	-0,12	12,80	-0,05	12,63	0,12	12,74	0,01	12,97	-0,22	12,57	0,18
	Cavidad interna tuerca ancho	21,75	21,72	0,03	21,80	-0,05	21,77	-0,02	21,77	-0,02	21,66	0,09	21,62	0,13	21,61	0,14	21,64	0,11	21,75	0,00
	Cavidad interna tuerca largo	12,00	11,96	0,04	11,88	0,12	11,97	0,03	12,09	-0,09	11,99	0,01	12,02	-0,02	11,94	0,06	12,01	-0,01	12,11	-0,11
	Cavidad interna tuerca espesor	8,25	8,13	0,12	8,03	0,22	8,15	0,10	8,19	0,06	8,08	0,17	8,27	-0,02	8,12	0,13	8,13	0,12	8,11	0,14
	Cavidad interna mordaza movil Largo	17,63	17,53	0,10	17,54	0,09	17,50	0,13	17,43	0,20	17,52	0,11	17,46	0,17	17,54	0,09	17,57	0,06	17,68	-0,05
	Cavidad interna mordaza movil	8,25	8,24	0,01	8,38	-0,13	8,20	0,05	8,19	0,06	7,98	0,27	8,19	0,06	8,14	0,11	8,20	0,05	8,28	-0,03
Cremallera	Ancho	15,00	15,04	-0,04	15,01	-0,01	15,03	-0,03	15,01	-0,01	15,02	-0,02	15,11	-0,11	14,98	0,02	15,26	-0,26	15,11	-0,11
	Espesor	7,50	7,81	-0,31	7,90	-0,40	7,88	-0,38	7,90	-0,40	7,96	-0,46	7,94	-0,44	7,72	-0,22	7,58	-0,08	7,73	-0,23
Mango	Ancho Superior	11,25	11,19	0,06	11,29	-0,04	11,05	0,20	11,10	0,15	11,05	0,20	11,07	0,18	11,20	0,05	11,03	0,22	11,27	-0,02
	Ancho Inferior	15,74	15,58	0,16	15,64	0,10	15,56	0,18	15,61	0,13	15,61	0,13	15,60	0,14	15,48	0,26	15,62	0,12	15,55	0,19
	Largo	159,09	158,88	0,21	158,72	0,37	158,48	0,61	159,06	0,03	158,86	0,23	159,02	0,07	158,91	0,18	158,89	0,20	159,59	-0,50
	Espesor superior	12,00	11,38	0,62	11,40	0,60	11,36	0,64	11,33	0,67	11,35	0,65	11,34	0,66	11,37	0,63	11,38	0,62	11,53	0,47
	Espesor medio	7,50	7,78	-0,28	7,65	-0,15	7,66	-0,16	7,63	-0,13	7,73	-0,23	7,74	-0,24	7,71	-0,21	7,61	-0,11	7,91	-0,41

Tolerancia típica: **±0.2 mm a ±0.5 mm** en medidas lineales.

LECTURA 10	DIFERENCIA	LECTURA 11	DIFERENCIA	LECTURA 12	DIFERENCIA	LECTURA 13	DIFERENCIA	LECTURA 14	DIFERENCIA	LECTURA 15	DIFERENCIA
37,75	-0,25	37,53	-0,03	37,55	-0,05	37,61	-0,11	37,77	-0,27	37,56	-0,06
88,21	0,29	88,49	0,01	88,16	0,34	88,25	0,25	88,45	0,05	88,14	0,36
12,00	0,00	12,07	-0,07	11,91	0,09	12,03	-0,03	11,92	0,08	11,83	0,17
20,99	0,31	21,02	0,28	21,29	0,01	21,04	0,26	21,12	0,18	21,23	0,07
12,10	0,05	12,04	0,11	11,96	0,19	11,94	0,21	11,84	0,31	11,98	0,17
10,63	-0,13	10,55	-0,05	10,84	-0,34	10,64	-0,14	10,88	-0,38	10,79	-0,29
47,07	0,18	47,17	0,08	47,02	0,23	47,15	0,10	46,94	0,31	46,91	0,34
30,14	-0,14	29,93	0,07	30,16	-0,16	29,96	0,04	30,08	-0,08	30,24	-0,24
12,74	0,01	12,71	0,04	12,78	-0,03	12,84	-0,09	12,93	-0,18	12,74	0,01
21,80	-0,05	21,75	0,00	21,67	0,08	21,90	-0,15	21,87	-0,12	21,68	0,07
11,94	0,06	11,97	0,03	11,99	0,01	11,99	0,01	11,82	0,18	11,77	0,23
8,14	0,11	8,20	0,05	8,20	0,05	8,04	0,21	8,28	-0,03	8,02	0,23
17,56	0,07	17,47	0,16	17,49	0,14	17,54	0,09	17,54	0,09	17,68	-0,05
8,26	-0,01	8,24	0,01	8,26	-0,01	8,23	0,02	8,26	-0,01	7,92	0,33
15,04	-0,04	15,02	-0,02	15,03	-0,03	14,95	0,05	15,03	-0,03	15,07	-0,07
7,80	-0,30	7,90	-0,40	7,97	-0,47	7,91	-0,41	8,00	-0,50	7,94	-0,44
11,17	0,08	11,20	0,05	11,22	0,03	11,15	0,10	11,29	-0,04	11,17	0,08
15,64	0,10	15,36	0,38	15,43	0,31	15,62	0,12	15,77	-0,03	15,66	0,08
158,88	0,21	158,84	0,25	158,85	0,24	158,74	0,35	159,12	-0,03	158,80	0,29
11,35	0,65	11,34	0,66	11,35	0,65	11,39	0,61	11,30	0,70	11,25	0,75
7,65	-0,15	7,81	-0,31	7,67	-0,17	7,85	-0,35	7,88	-0,38	7,69	-0,19

ANEXO B

MICROMETRO																
PARTE	DIMENSIONES	LECTURA 1	LECTURA 2	LECTURA 3	LECTURA 4	LECTURA 5	LECTURA 6	LECTURA 7	LECTURA 8	LECTURA 9	LECTURA 10	LECTURA 11	LECTURA 12	LECTURA 13	LECTURA 14	LECTURA 15
Mordaza Movil	Espesor	12,02	12,01	12,03	12,02	12,00	12,01	12,04	12,00	12,02	12,03	12,01	12,01	12,02	12,03	12,01
Tuerca de ajuste	Diametro exterior	21,14	21,14	21,14	21,16	21,16	21,15	21,14	21,15	21,16	21,13	21,15	21,13	21,13	21,15	21,12
	Espesor	10,70	10,70	10,69	10,70	10,67	10,68	10,69	10,71	10,70	10,70	10,71	10,69	10,70	10,69	10,68
Carcaza	Espesor	12,78	12,78	12,79	12,78	12,78	12,80	12,78	12,79	12,80	12,77	12,77	12,80	12,77	12,78	12,79
Cremallera	Ancho	15,05	15,07	15,08	15,07	15,07	15,05	15,07	15,06	15,05	15,07	15,07	15,06	15,06	15,05	15,06
	Espesor	8,12	7,92	7,30	7,50	8,00	7,91	8,00	7,91	7,88	7,77	7,82	7,91	7,92	7,98	7,99
Mango	Ancho Superior	11,17	11,17	11,16	11,16	11,16	11,19	11,17	11,18	11,16	11,17	11,18	11,17	11,18	11,16	11,16
	Ancho Inferior	15,59	15,59	15,59	15,60	15,57	15,60	15,62	15,59	15,59	15,59	15,57	15,59	15,57	15,59	15,60
	Espesor superior	11,40	11,39	11,41	11,41	11,40	11,39	11,40	11,42	11,38	11,40	11,39	11,40	11,41	11,42	11,40
	Espesor inferior	7,79	7,80	7,79	7,79	7,78	7,78	7,78	7,78	7,79	7,80	7,79	7,78	7,81	7,81	7,79

Tolerancia típica: **±0.2 mm a ±0.5 mm** en medidas lineales.

PMICROMETRO																				
PARTE	DIMENSIONES	NOMINAL	LECTURA 1	DIFERENCIA	LECTURA 2	DIFERENCIA	LECTURA 3	DIFERENCIA	LECTURA 4	DIFERENCIA	LECTURA 5	DIFERENCIA	LECTURA 6	DIFERENCIA	LECTURA 7	DIFERENCIA	LECTURA 8	DIFERENCIA	LECTURA 9	DIFERENCIA
Mordaza Movil	Espesor	12	12,02	-0,02	12,01	-0,01	12,03	-0,03	12,02	-0,02	12,00	0,00	12,01	-0,01	12,04	-0,04	12,00	0,00	12,02	-0,02
Tuerca de ajuste	Diametro exterior	21,3	21,14	0,16	21,14	0,16	21,14	0,16	21,16	0,14	21,16	0,14	21,15	0,15	21,14	0,16	21,15	0,15	21,16	0,14
	Espesor	10,5	10,70	-0,20	10,70	-0,20	10,69	-0,19	10,70	-0,20	10,67	-0,17	10,68	-0,18	10,69	-0,19	10,71	-0,21	10,70	-0,20
Carcaza	Espesor	12,75	12,78	-0,03	12,78	-0,03	12,79	-0,04	12,78	-0,03	12,78	-0,03	12,80	-0,05	12,78	-0,03	12,79	-0,04	12,80	-0,05
Cremallera	Ancho	15	15,06	-0,06	15,07	-0,07	15,08	-0,08	15,07	-0,07	15,07	-0,07	15,05	-0,05	15,07	-0,07	15,06	-0,06	15,05	-0,05
	Espesor	7,5	8,12	-0,62	7,92	-0,42	7,30	0,20	7,50	0,00	8,00	-0,50	7,91	-0,41	8,00	-0,50	7,91	-0,41	7,88	-0,38
Mango	Ancho Superior	11,25	11,17	0,08	11,17	0,08	11,16	0,09	11,16	0,09	11,16	0,09	11,19	0,06	11,17	0,08	11,18	0,07	11,16	0,09
	Ancho Inferior	15,74	15,59	0,15	15,59	0,15	15,59	0,15	15,60	0,14	15,57	0,17	15,60	0,14	15,62	0,12	15,59	0,15	15,59	0,15
	Espesor superior	12	11,40	0,60	11,39	0,61	11,41	0,59	11,41	0,59	11,40	0,60	11,39	0,61	11,40	0,60	11,42	0,58	11,38	0,62
	Espesor inferior	7,5	7,79	-0,29	7,80	-0,3	7,79	-0,29	7,79	-0,29	7,78	-0,28	7,78	-0,28	7,78	-0,28	7,78	-0,28	7,79	-0,29

LECTURA 10	DIFERENCIA	LECTURA 11	DIFERENCIA	LECTURA 12	DIFERENCIA	LECTURA 13	DIFERENCIA	LECTURA 14	DIFERENCIA	LECTURA 15	DIFERENCIA
12,03	-0,03	12,01	-0,01	12,01	-0,01	12,02	-0,02	12,03	-0,03	12,01	-0,01
21,13	0,17	21,15	0,15	21,13	0,17	21,13	0,17	21,15	0,15	21,12	0,18
10,70	-0,20	10,71	-0,21	10,69	-0,19	10,70	-0,20	10,69	-0,19	10,68	-0,18
12,77	-0,02	12,77	-0,02	12,80	-0,05	12,77	-0,02	12,78	-0,03	12,79	-0,04
15,07	-0,07	15,07	-0,07	15,06	-0,06	15,06	-0,06	15,05	-0,05	15,06	-0,06
7,77	-0,27	7,82	-0,32	7,91	-0,41	7,92	-0,42	7,98	-0,48	7,99	-0,49
11,17	0,08	11,18	0,07	11,17	0,08	11,18	0,07	11,16	0,09	11,16	0,09
15,59	0,15	15,57	0,17	15,59	0,15	15,57	0,17	15,59	0,15	15,60	0,14
11,40	0,60	11,39	0,61	11,40	0,60	11,41	0,59	11,42	0,58	11,40	0,60
7,80	-0,3	7,79	-0,29	7,78	-0,28	7,81	-0,31	7,81	-0,31	7,79	-0,29

ANEXO B

ESCANER 3D																
PARTE	DIMENSIONES	LECTURA 1	LECTURA 2	LECTURA 3	LECTURA 4	LECTURA 5	LECTURA 6	LECTURA 7	LECTURA 8	LECTURA 9	LECTURA 10	LECTURA 11	LECTURA 12	LECTURA 13	LECTURA 14	LECTURA 15
Mordaza movil	Ancho	36,29	36,22	36,38	36,27	36,21	36,27	36,29	36,34	36,38	36,29	36,31	36,32	36,34	36,25	36,25
	Largo	87,15	87,21	87,09	87,18	87,24	87,08	87,16	87,18	87,14	87,13	87,16	87,18	87,14	87,05	87,07
	Espesor	11,85	11,87	11,92	11,87	11,90	11,81	11,74	11,88	11,86	11,79	11,85	11,83	11,85	11,89	11,81
Tuerca de ajuste	Diametro exterior	21,06	20,97	20,98	21,06	21,06	20,99	21,09	21,03	21,08	21,06	21,03	20,98	21,08	21,13	21,14
	Diametro interior	12,32	12,29	12,28	12,46	12,31	12,45	12,22	12,26	12,34	12,28	12,31	12,28	12,29	12,36	12,23
	Espesor	11,47	11,57	11,52	11,49	11,40	11,48	11,44	11,40	11,39	11,47	11,48	11,57	11,53	11,48	11,42
Carcaza	Ancho	46,68	46,53	46,59	46,74	46,69	46,75	46,75	46,63	46,57	46,70	46,49	46,73	46,67	46,68	46,64
	Largo	29,84	29,81	29,83	29,97	29,87	29,76	29,80	29,86	29,78	29,93	29,82	29,86	29,88	30,02	29,76
	Espesor	12,9	12,98	12,85	12,82	12,85	12,91	12,93	12,95	12,91	12,92	12,89	12,85	12,89	12,90	12,83
	Cavidad interna tuerca ancho	21,29	21,24	21,27	21,23	21,36	21,36	21,35	21,31	21,32	21,25	21,27	21,29	21,31	21,28	21,20
	Cavidad interna tuerca largo	12,19	12,15	12,02	12,29	12,12	12,17	12,21	12,16	12,16	12,17	12,18	12,11	12,21	12,18	12,16
	Cavidad interna tuerca espesor	8,34	8,33	8,23	8,29	8,21	8,40	8,26	8,45	8,42	8,35	8,38	8,31	8,35	8,30	8,32
	Cavidad interna mordaza movil Largo	16,59	16,68	16,55	16,59	16,65	16,52	16,57	16,68	16,58	16,60	16,55	16,58	16,53	16,65	16,55
	Cavidad interna mordaza movil Espesor	8,48	8,44	8,54	8,54	8,46	8,40	8,60	8,46	8,48	8,57	8,61	8,46	8,51	8,46	8,38
Cremallera	Ancho	14,69	14,66	14,68	14,74	14,68	14,71	14,57	14,64	14,68	14,77	14,73	14,75	14,67	14,73	14,77
	Espesor	7,63	7,60	7,63	7,74	7,58	7,61	7,61	7,64	7,64	7,61	7,63	7,54	7,67	7,65	7,55
Mango	Ancho Superior	11,29	11,42	11,33	11,38	11,19	11,33	11,26	11,37	11,33	11,26	11,28	11,24	11,16	11,36	11,31
	Ancho Inferior	15,65	15,78	15,60	15,71	15,73	15,53	15,66	15,67	15,69	15,50	15,64	15,57	15,56	15,68	15,59
	Largo	156,73	156,79	156,75	156,68	156,69	156,77	156,77	156,76	156,68	156,70	156,68	156,66	156,75	156,66	156,77
	Espesor superior	11,64	11,66	11,59	11,69	11,74	11,80	11,74	11,63	11,73	11,58	11,63	11,65	11,75	11,56	11,70
	Espesor inferior	7,49	7,53	7,39	7,51	7,54	7,49	7,47	7,52	7,42	7,47	7,51	7,39	7,54	7,57	7,44

ESCANER 3D																				
PARTE	DIMENSIONES	NOMINAL	LECTURA 1	DIFERENCIA	LECTURA 2	DIFERENCIA	LECTURA 3	DIFERENCIA	LECTURA 4	DIFERENCIA	LECTURA 5	DIFERENCIA	LECTURA 6	DIFERENCIA	LECTURA 7	DIFERENCIA	LECTURA 8	DIFERENCIA	LECTURA 9	DIFERENCIA
Mordaza movil	Ancho	37,50	36,29	1,21	36,29	1,21	36,38	1,12	36,27	1,23	36,21	1,29	36,27	1,23	36,29	1,21	36,34	1,16	36,38	1,12
	Largo	88,50	87,15	1,35	87,15	1,35	87,09	1,41	87,18	1,32	87,24	1,26	87,08	1,42	87,16	1,34	87,18	1,32	87,14	1,36
	Espesor	12,00	11,85	0,15	11,85	0,15	11,92	0,08	11,87	0,13	11,90	0,10	11,81	0,19	11,74	0,26	11,88	0,12	11,86	0,14
Tuerca de ajuste	Diametro exterior	21,30	21,06	0,24	21,06	0,24	20,98	0,32	21,06	0,24	21,06	0,24	20,99	0,31	21,09	0,21	21,03	0,27	21,08	0,22
	Diametro interior	12,15	12,32	-0,17	12,32	-0,17	12,28	-0,13	12,46	-0,31	12,31	-0,16	12,45	-0,30	12,22	-0,07	12,26	-0,11	12,34	-0,19
	Espesor	10,50	11,47	-0,97	11,47	-0,97	11,52	-1,02	11,49	-0,99	11,40	-0,90	11,48	-0,98	11,44	-0,94	11,40	-0,90	11,39	-0,89
Carcaza	Ancho	47,25	46,68	0,57	46,68	0,57	46,59	0,66	46,74	0,51	46,69	0,56	46,75	0,50	46,75	0,50	46,63	0,62	46,57	0,68
	Largo	30,00	29,84	0,16	29,84	0,16	29,83	0,17	29,97	0,03	29,87	0,13	29,76	0,24	29,80	0,20	29,86	0,14	29,78	0,22
	Espesor	12,75	12,9	-0,15	12,9	-0,15	12,85	-0,10	12,82	-0,07	12,85	-0,10	12,91	-0,16	12,93	-0,18	12,95	-0,20	12,91	-0,16
	Cavidad interna tuerca ancho	21,75	21,29	0,46	21,29	0,46	21,27	0,48	21,23	0,52	21,36	0,39	21,36	0,39	21,35	0,40	21,31	0,44	21,32	0,43
	Cavidad interna tuerca largo	12,00	12,19	-0,19	12,19	-0,19	12,02	-0,02	12,29	-0,29	12,12	-0,12	12,17	-0,17	12,21	-0,21	12,16	-0,16	12,16	-0,16
	Cavidad interna tuerca espesor	8,25	8,34	-0,09	8,34	-0,09	8,23	0,02	8,29	-0,04	8,21	0,04	8,40	-0,15	8,26	-0,01	8,45	-0,20	8,42	-0,17
	Cavidad interna mordaza movil Largo	17,63	16,59	1,04	16,59	1,04	16,55	1,08	16,59	1,04	16,65	0,98	16,52	1,11	16,57	1,06	16,68	0,95	16,58	1,05
	Cavidad interna mordaza movil Espesor	8,25	8,48	-0,23	8,48	-0,23	8,54	-0,29	8,54	-0,29	8,46	-0,21	8,40	-0,15	8,60	-0,35	8,46	-0,21	8,48	-0,23
Cremallera	Ancho	15,00	14,69	0,31	14,69	0,31	14,68	0,32	14,74	0,26	14,68	0,32	14,71	0,29	14,57	0,43	14,64	0,36	14,68	0,32
	Espesor	7,50	7,63	-0,13	7,63	-0,13	7,63	-0,13	7,74	-0,24	7,58	-0,08	7,61	-0,11	7,61	-0,11	7,64	-0,14	7,64	-0,14
Mango	Ancho Superior	11,25	11,29	-0,04	11,29	-0,04	11,33	-0,08	11,38	-0,13	11,19	0,06	11,33	-0,08	11,26	-0,01	11,37	-0,12	11,33	-0,08
	Ancho Inferior	15,74	15,65	0,09	15,65	0,09	15,60	0,14	15,71	0,03	15,73	0,01	15,53	0,21	15,66	0,08	15,67	0,07	15,69	0,05
	Largo	159,09	156,73	2,36	156,73	2,36	156,75	2,34	156,68	2,41	156,69	2,40	156,77	2,32	156,77	2,32	156,76	2,33	156,68	2,41
	Espesor superior	12,00	11,64	0,36	11,64	0,36	11,59	0,41	11,69	0,31	11,74	0,26	11,80	0,20	11,74	0,26	11,63	0,37	11,73	0,27
	Espesor medio	7,50	7,49	0,01	7,49	0,01	7,39	0,11	7,51	-0,01	7,54	-0,04	7,49	0,01	7,47	0,03	7,52	-0,02	7,42	0,08

LECTURA 10	DIFERENCIA	LECTURA 11	DIFERENCIA	LECTURA 12	DIFERENCIA	LECTURA 13	DIFERENCIA	LECTURA 14	DIFERENCIA	LECTURA 15	DIFERENCIA
36,29	1,21	36,31	1,19	36,32	1,18	36,34	1,16	36,25	1,25	36,25	1,25
87,13	1,37	87,16	1,34	87,18	1,32	87,14	1,36	87,05	1,45	87,07	1,43
11,79	0,21	11,85	0,15	11,83	0,17	11,85	0,15	11,89	0,11	11,81	0,19
21,06	0,24	21,03	0,27	20,98	0,32	21,08	0,22	21,13	0,17	21,14	0,16
12,28	-0,13	12,31	-0,16	12,28	-0,13	12,29	-0,14	12,36	-0,21	12,23	-0,08
11,47	-0,97	11,48	-0,98	11,57	-1,07	11,53	-1,03	11,48	-0,98	11,42	-0,92
46,70	0,55	46,49	0,76	46,73	0,52	46,67	0,58	46,68	0,57	46,64	0,61
29,93	0,07	29,82	0,18	29,86	0,14	29,88	0,12	30,02	-0,02	29,76	0,24
12,92	-0,17	12,89	-0,14	12,85	-0,10	12,89	-0,14	12,90	-0,15	12,83	-0,08
21,25	0,50	21,27	0,48	21,29	0,46	21,31	0,44	21,28	0,47	21,20	0,55
12,17	-0,17	12,18	-0,18	12,11	-0,11	12,21	-0,21	12,18	-0,18	12,16	-0,16
8,35	-0,10	8,38	-0,13	8,31	-0,06	8,35	-0,10	8,30	-0,05	8,32	-0,07
16,60	1,03	16,55	1,08	16,58	1,05	16,53	1,10	16,65	0,98	16,55	1,08
8,57	-0,32	8,61	-0,36	8,46	-0,21	8,51	-0,26	8,46	-0,21	8,38	-0,13
14,77	0,23	14,73	0,27	14,75	0,25	14,67	0,33	14,73	0,27	14,77	0,23
7,61	-0,11	7,63	-0,13	7,54	-0,04	7,67	-0,17	7,65	-0,15	7,55	-0,05
11,26	-0,01	11,28	-0,03	11,24	0,01	11,16	0,09	11,36	-0,11	11,31	-0,06
15,50	0,24	15,64	0,10	15,57	0,17	15,56	0,18	15,68	0,06	15,59	0,15
156,70	2,39	156,68	2,41	156,66	2,43	156,75	2,34	156,66	2,43	156,77	2,32
11,58	0,42	11,63	0,37	11,65	0,35	11,75	0,25	11,56	0,44	11,70	0,30
7,47	0,03	7,51	-0,01	7,39	0,11	7,54	-0,04	7,57	-0,07	7,44	0,06

BIBLIOGRAFIA

Siraj, I., & Bharti, P. S. (2020). Process capability analysis of a 3D printing process. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 23(1), 175–189. https://doi.org/10.1080/09720502.2020.1721711

Wu, H.-C., & Chen, T.-C. T. (2018). Quality control issues in 3D-printing manufacturing: A review. *Rapid Prototyping Journal*, 24(3), 607–614. https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2016-0102

Singh, R. (2014). Process capability analysis of fused deposition modelling for plastic components. *Rapid Prototyping Journal*, 20(1), 69–76. https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2012-0068

Rathore, A., Rajpurohit, S., & Prakash, S. (2022). Optimization of process parameters for mechanical properties in FDM-printed ABS parts using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 62, 2345–2351. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.178

Zhou, Y., Liu, Y., & Wang, Y. (2020). Comparison of dimensional accuracy and mechanical properties of ABS parts fabricated by low-cost 3D printers. *Journal of Manufacturing Processes*, 49, 215–223. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.017

Zein, R., Hegab, H., & Elhosary, A. (2019). 3D scanning and tolerance analysis of printed parts using ABS and PLA in desktop printers. *Procedia CIRP*, 85, 70–75. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.09.024

Jeang, A. (2010). Optimal process capability analysis for process design. *International Journal of Production Research*, 48(4), 957–989. https://doi.org/10.1080/00207540802499713

Chen, C.-H., & Tsai, W.-R. (2017). Imperfect production process model with product rework, multi-delivery, and quality loss. *Journal of Information and Optimization Sciences*, 38(8), 1253–1264. https://doi.org/10.1080/02522667.2017.1381857

Zhang, Y., & Yang, M. (2009). A coordinate SPC model for assuring designated fit quality via quality-oriented statistical tolerancing. *Computers & Industrial Engineering*, 57(1), 73–79. https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.11.011

Olszewski, R., Szymor, P., & Kozakiewicz, M. (2014). Accuracy of three-dimensional, paper-based models generated using a low-cost, three-dimensional printer. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 42(8), 1847–1852. https://doi.org/10.1016/j.jcms.2014.07.004

Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012

Kotz, S., & Johnson, N. L. (2002). Process capability indices: a review. *Journal of Quality Technology*, 34(1), 2–19. https://doi.org/10.1080/00224065.2002.11980134

Srinivasan, A., Patel, S., & Kumar, R. (2020). Mechanical and dimensional evaluation of ABS components fabricated by fused deposition modelling. *Materials Today: Proceedings*, 33(1), 2104–2110. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.502

Saenz, J., Camacho, F., & Linares, M. (2021). Análisis de la influencia de la orientación de impresión en las propiedades mecánicas del ABS. *Revista Colombiana de Materiales*, 9(1), 34–45.

Mogan, A., Rodríguez, L., & Vélez, F. (2024). Warping y contracción en piezas impresas en 3D con ABS: Análisis experimental y simulación térmica. *Ingeniería y Desarrollo*, 42(2), 118–130