

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Determinación de la estabilidad dimensional del ácido poliláctico
(PLA) impreso en una Ultimaker 3

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional
presentado por Javier Alejandro Vivas Monzón
para optar el grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala
2020

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Determinación de la estabilidad dimensional del ácido poliláctico
(PLA) impreso en una Ultimaker 3

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional
presentado por Javier Alejandro Vivas Monzón.
para optar el grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

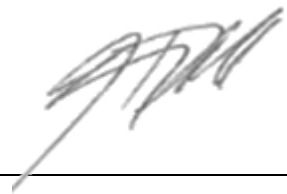
Guatemala
2020

Vo.Bo.:

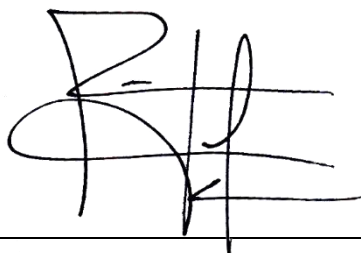
(F) 

Ing. Gustavo Adolfo Barrera Noriega

Tribunal:

(F) 

Ing. Víctor Hugo Ayerdi Bardales

(F) 

Ing. Rony José Herrarte Estevez

(F) 

Ing. Gustavo Adolfo Barrera Noriega

Fecha de aprobación: 9 de diciembre del 2020.

Prefacio

Este trabajo de graduación realizado con la finalidad de estudiar la estabilidad dimensional del PLA requirió de dos meses para almacenar y experimentar con las piezas, esto sin tomar en cuenta el tiempo que requirió la investigación, el diseño y manufactura de las muestras y el análisis estadístico.

El diseño de las muestras se vio limitado por el espacio en el cual se iban a almacenar las piezas, mientras la manufactura estuvo limitada por la disponibilidad y restricción de acceso donde se encontraba la impresora 3D que produjo las piezas.

Agradezco a Dios por darme fortaleza y sabiduría durante todos mis años de carrera. A mi familia, por su incondicional apoyo y motivación que me alentó a dar mi mayor esfuerzo siempre. A mi asesor, por guiarme y compartirme sus conocimientos para desarrollar este trabajo de la mejor manera.

Dedico especialmente este trabajo y el esfuerzo que implicó a mi Abuelo “Cholo”, quien fue el primer ingeniero que conocí en la vida.

Contenido

PREFACIO.....	V
LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS.....	VII
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
III. JUSTIFICACIÓN.....	4
IV. ANTECEDENTES.....	5
V. MARCO TEÓRICO.....	8
5.1 Manufactura aditiva.....	8
5.2 Termoplásticos.....	9
5.3 Ácido poliláctico (PLA).....	9
5.4 Impresoras 3D.....	10
5.5 Software de impresión 3D.....	11
5.6 Parámetros de impresión.....	12
5.7 Estabilidad dimensional.....	13
5.8 Humedad y temperatura en polímeros.....	15
5.9 Estadística descriptiva.....	15
5.10 Tabla de control.....	18
VI. MARCO METODOLÓGICO.....	20
VII. RESULTADOS.....	31
VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	54
IX. CONCLUSIONES.....	56
X. RECOMENDACIONES.....	57
XI. REFERENCIAS.....	58
XII. ANEXOS.....	60

Listado de figuras y tablas

Figura 1. Materiales compatibles con Ultimaker 3.....	11
Figura 2. Ejemplo de gráfica de control.....	18
Figura 3. Geometría de la pieza (mm).....	21
Figura 4. Creación formato ipt.....	21
Figura 5. Pieza diseñada en Inventor 2019.....	22
Figura 6. Posición de la pieza en Ultimaker Cura.....	23
Figura 7. Patrón de relleno de la pieza (Líneas).....	24
Figura 8. Capa superior de la pieza (Líneas).....	24
Figura 9. Identificación de posición de cada pieza.....	25
Figura 10. Posiciones para medir dimensiones.....	26
Figura 11. Muestra 1 marcada para medir.....	26
Figura 12. Muestra 1 medición de largo.....	28
Figura 13. Muestra 1 medición de ancho.....	28
Figura 14. Muestra 1 medición de espesor.....	29
Figura 15. Diseño de la muestra con parámetros de impresión.....	31
Figura 16. Las 12 muestras acondicionadas en el espacio controlado.....	32
Figura 17. Gráfica de porcentaje de cambio en el largo.....	34
Figura 18. Gráfica de porcentaje de cambio en el ancho.....	35
Figura 19. Gráfica de porcentaje de cambio de espesor.....	36
Figura 20. Gráfica de porcentaje de cambio volumétrico.....	37
Figura 21. Gráfica de porcentaje de cambio promedio.....	38
Figura 22. Gráfica de cambio promedio de largo.....	41
Figura 23. Gráfica de cambio promedio de ancho.....	41
Figura 24. Gráfica de cambio promedio de espesor.....	42
Figura 25. Tabla de control Muestra 1: Volumen 6 horas al día.....	43
Figura 26. Tabla de control Muestra 1: Datos retenidos.....	43
Figura 27. Tabla de control Muestra 2: Datos retenidos.....	44
Figura 28. Tabla de control Muestra 3: Datos retenidos.....	45
Figura 29. Tabla de control Muestra 4: Datos retenidos.....	45

Figura 30. Tabla de control Muestra 5: Datos retenidos.....	46
Figura 31. Tabla de control Muestra 6: Datos retenidos.....	47
Figura 32. Tabla de control Muestra 7: Datos retenidos.....	48
Figura 33. Tabla de control Muestra 8: Datos retenidos.....	48
Figura 34. Tabla de control Muestra 9: Datos retenidos.....	49
Figura 35. Tabla de control Muestra 10: Datos retenidos.....	49
Figura 36. Tabla de control Muestra 11: Datos retenidos.....	50
Figura 37. Tabla de control Muestra 12: Datos retenidos.....	51
Figura 38. Muestras de la 1 a la 4	61
Figura 39. Muestras de la 5 a la 10.....	61
Figura 40. Muestras 11 y 12.....	62
Figura 41. Pruebas iniciales para acondicionamiento.....	62
Figura 42. Adaptación de espacio acondicionado	63
Figura 43. 2 de 3 posiciones de medición de largo.....	63
Figura 44. 2 de 3 posiciones de medición de ancho	64
Figura 45. 3 de 5 posiciones de medición de espesor	65
Figura 46. Volumen de control Muestra 1.....	66
Figura 47. Volumen de control Muestra 2.....	66
Figura 48. Volumen de control Muestra 3.....	67
Figura 49. Volumen de control Muestra 4.....	67
Figura 50. Volumen de control Muestra 5.....	68
Figura 51. Volumen de control Muestra 6.....	68
Figura 52. Volumen de control Muestra 7.....	69
Figura 53. Volumen de control Muestra 8.....	69
Figura 54. Volumen de control Muestra 9.....	70
Figura 55. Volumen de control Muestra 10.....	70
Figura 56. Volumen de control Muestra 11.....	71
Figura 57. Volumen de control Muestra 12.....	71

Tablas

Tabla 1. Registro de espacio acondicionado en la Prueba 1.	32
Tabla 2. Registro de espacio acondicionado cada 6 horas al día para la Prueba 2.	33
Tabla 3. Mediciones porcentaje de cambio en el largo de cada muestra.	33
Tabla 4. Mediciones porcentaje de cambio en el ancho de cada muestra.	34
Tabla 5. Mediciones porcentaje de cambio en el espesor de cada muestra.	35
Tabla 6. Volumen calculado de cada muestra	36
Tabla 7. Resumen porcentaje de cambio promedio	38
Tabla 8. ANOVA del largo de las muestras ($\alpha=0.05$).	39
Tabla 9. ANOVA del ancho de las muestras ($\alpha=0.05$).	39
Tabla 10. ANOVA del espesor de las muestras ($\alpha=0.05$).	40
Tabla 11. ANOVA del volumen de las muestras ($\alpha=0.05$).	40
Tabla 12. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 1.	43
Tabla 13. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 2.	44
Tabla 14. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 3.	45
Tabla 15. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 4.	46
Tabla 16. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 5.	46
Tabla 17. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 6.	47
Tabla 18. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 7.	48
Tabla 19. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 8.	48
Tabla 20. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 9.	49
Tabla 21. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 10.	50
Tabla 22. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 11.	50
Tabla 23. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 12.	51
Tabla 24. Resumen de medias y límites de las 12 muestras.	51
Tabla 25. ANOVA para el volumen de todas las muestras de PLA ($\alpha=0.05$).	52
Tabla 26. ANOVA para PLA morado ($\alpha=0.05$)	53
Tabla 27. ANOVA para PLA verde ($\alpha=0.05$)	53

Resumen

El siguiente trabajo de graduación consistió en estudiar el comportamiento del PLA fabricado por medio de tecnología aditiva (impresión 3D) en una Ultimaker 3, con la finalidad de determinar el impacto que tuvo el tiempo sobre la estabilidad dimensional del material.

El estudio abarca el diseño de la pieza asistido por computadora, la fabricación de las piezas para un estudio representativo, experimentación con las piezas y análisis estadístico para explicar el comportamiento observado. Las muestras se definieron por un cuadrado de 50 x 50 x 5 mm, densidad de relleno de 50%, patrón de relleno en líneas y altura de capa de 0.2 mm. Doce muestras fueron estudiadas y almacenadas dentro de un espacio controlado a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y $70 \pm 5\%$ de humedad relativa. De las doce muestras, cuatro eran de color morado, seis eran color verde y dos de color rojo. Se realizaron dos pruebas: en la Prueba 1 las piezas estuvieron en el espacio por un mes y se midieron las dimensiones de cada muestra cuatro veces en ese mes de acuerdo con la SS-ISO:2796, mientras en la Prueba 2 las piezas se almacenaron por dos semanas y se midieron las dimensiones de cada muestra 45 veces para un análisis más profundo. Para medir se utilizó un calibrador vernier con una incertidumbre de ± 0.1 mm según la ISO:1923.

Inicialmente se calculó el porcentaje de cambio en cada dimensión: largo, ancho y espesor. Posteriormente se calculó también ANOVA para el estudio estadístico de cómo influyeron el tiempo y el color en las muestras, cuánta variación hubo entre las muestras y las conclusiones que se podían obtener.

Finalmente se demuestra que el PLA es un material estable con el paso del tiempo a pesar de que presenta cambios dimensionales. Se encontró que el espesor tuvo un efecto significativo en los cambios dimensionales de las piezas. Además, se determinó que el color no es un parámetro que define la estabilidad dimensional del material ya que hubo varianza entre grupos del mismo color.

Abstract

The next graduating work consisted in studying the behavior of PLA manufactured by means of additive technology (3D printing) in an Ultimaker 3, in order to determine the impact that time had on the dimensional stability of the material.

The study includes the computer-assisted design of the part, the manufacture of the parts for a representative study, experimentation with the parts and statistical analysis to explain the observed behavior. Samples were defined by a 50 x 50 x 5 mm square, 50% infill density, lines as infill pattern and 0.2 mm layer height. Twelve samples were studied and stored within a controlled space at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ and $70 \pm 5\%$ relative humidity. Out of the twelve samples, four were purple, six were green and two were red. Two tests were performed: in Test 1 the pieces remained in the space for one month and the dimensions of each sample were measured four times in that month according to SS-ISO:2796, whereas in Test 2 the pieces were stored for two weeks and the dimensions of each sample were measured 45 times for further analysis. According to ISO:1923, a vernier caliper was used for measuring with an uncertainty ± 0.1 mm.

Initially, the percentage of change for each dimension was calculated: length, width, and thickness. Later, ANOVA was also calculated for the statistical study of how time and color influenced the samples, how much variation there was between the samples and what conclusions could be obtained.

Finally, it is demonstrated that PLA is a stable material over time even though it presents some dimensional changes. It was found that the thickness had a significant effect on the dimensional changes of the parts. In addition, it was determined that color is not a parameter that defines the dimensional stability of the material since there was variance between groups of the same color.

I. Introducción

La manufactura aditiva (AM, sus siglas para *Additive Manufacturing*) ha tenido un impacto positivo a nivel industrial desde que se comenzó a desarrollar surgiendo como una alternativa de la manufactura sustractiva para la producción de piezas. La aplicación más atractiva de este tipo de manufactura es la capacidad para producir piezas con geometrías complejas. Este proceso consiste en fabricar una pieza por medio de capas construyéndolo de manera tridimensional automáticamente a partir de un modelo diseñado por computadora.

El prototipado rápido, como también se le conoce a la AM, no requiere de diseñar y fabricar moldes para su producción a diferencia de otros métodos. Por esta razón, sus aplicaciones van desde producir piezas pequeñas, componentes en la industria textil para ropa hasta piezas de automóviles o de construcción. Existen diferentes tipos de esta tecnología uno de los más conocidos es el modelado de deposición fundida (FDM, para *Fused Deposition Modeling*) que consiste en extruir un filamento de termoplástico depositándolo capa por capa.

De cualquier manera, esta tecnología de rápido prototipado ha presentado ciertas debilidades como las bajas propiedades mecánicas, largo tiempo de procesamiento, conflictos de producción masiva, estabilidad dimensional pobre debido a contracción de volumen por inducción térmica y distorsión del material por calor. Por lo tanto, el desarrollo y constante mejoramiento de impresoras, programas de diseño tridimensional, materiales imprimibles para producir sus filamentos y demás parámetros relacionados se siguen analizando en la actualidad.

Los dos filamentos de termoplásticos más utilizados en FDM son el ácido poliláctico (PLA, abreviatura en inglés) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS, abreviatura en inglés). Importantes estudios se han llevado a cabo con el PLA ya que es un material biodegradable y al optimizar su procesabilidad ha presentado resultados prometedores en diferentes campos industriales. Sin embargo, el PLA es conocido por su fragilidad, baja elongación, baja resistencia al impacto, cristalización lenta y baja temperatura de distorsión por calor.

A pesar de ser un tema muy popular existe carencia de documentación y normas estandarizadas relacionadas con las propiedades de los materiales de impresión 3D. Además de pocos estudios a impresoras comerciales que limitan ciertas aplicaciones a estos materiales y a esta tecnología. Estudios recientes se han enfocado en describir el efecto que tienen los parámetros de impresión en las propiedades de los materiales como el patrón de relleno, el porcentaje de llenado, orientación de las capas, velocidad de impresión, altura de capa, entre otros.

Adicionalmente, ciertas combinaciones de impresoras 3D con materiales de impresión y técnicas distintas de producción presentan inconsistencias en las propiedades de las piezas. Esto se da porque no todos los desarrolladores de impresoras 3D cuentan con su propia producción de filamentos para ser compatibles con sus impresoras o simplemente la combinación de los factores mencionados anteriormente no aportan buenas propiedades al material. Por esto se ha hecho necesario que para poder expandir el campo de aplicaciones del prototipado rápido se evalúen todos los factores necesarios para hacer aún más atractiva esta tecnología y tener bases sólidas de investigaciones.

En este estudio la atención principal se enfocó en analizar la estabilidad dimensional de piezas de PLA producidas por FDM en una impresora 3D, modelo Ultimaker 3. Las piezas se imprimieron con los mismos parámetros de relleno y fueron inspeccionadas inicialmente durante un mes situadas dentro de un espacio a temperatura controlada y constante. Posteriormente se realizó un segundo análisis en el que se evaluaron las piezas durante dos semanas dentro del mismo espacio controlado. Las mediciones obtenidas en ambos casos se compararon con las dimensiones iniciales de las piezas. Se evaluaron los resultados para visualizar el comportamiento del material con el paso del tiempo y determinar si otros factores influyeron directamente en la estabilidad dimensional del material. Finalmente, los resultados se presentan en tablas y gráficas para una mejor visualización del comportamiento de las piezas.

II. Objetivos

2.1 Objetivo general

Determinar la estabilidad dimensional del PLA impreso en una Ultimaker 3 a partir del cambio lineal en tres direcciones axiales.

2.2 Objetivos específicos

1. Definir el diseño y parámetros de impresión de las muestras a evaluar a partir de métodos estándar e investigaciones relacionadas.
2. Adaptar un espacio para mantener las muestras en un ambiente de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ con una humedad relativa del $70 \pm 5\%$.
3. Calcular el porcentaje de cambio lineal en el ancho, largo, espesor y volumen de cada muestra para 20 horas, 48 horas, 7 días y 28 días.
4. Calcular el porcentaje promedio de cambio lineal en el ancho, largo, espesor y volumen de las muestras para 20 horas, 48 horas, 7 días y 28 días.
5. Evaluar si las dimensiones de volumen son iguales en los tiempos de medición establecidos.
6. Determinar la variación natural de volumen en condiciones de $70 \pm 5\%$ de humedad relativa y $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura para cada muestra.
7. Determinar si las medias de volumen de las muestras de color verde son iguales.
8. Determinar si las medias de volumen de las muestras de color morado son iguales.

III. Justificación

Durante el proceso de producción de una pieza por Modelado de Deposición Fundida (FDM), el material de alimentación se somete a calentamiento y enfriamiento, lo que produce ciertos grados de deformación en la pieza que en ocasiones son indeseables. Por lo tanto, al producir una pieza es importante conocer la estabilidad dimensional de ésta para asegurar que su variación respecto al tiempo no tendrá efectos negativos en aplicaciones donde su desempeño es crítico.

Uno de los mayores atractivos de los procesos de manufactura aditiva como el FDM es el prototipado rápido, pero también muestran potencial para replicar piezas que ya no se producen más en la industria o tienen poca disponibilidad comercial. Esta es la razón del interés de varios sectores industriales como: automotriz, aeroespacial, arquitectura, robótica, de salud y especialmente en ingeniería. (Durgashankar, 2018)

Recientemente el PLA ha despertado mucho interés en la industria debido a la sustentabilidad que han presentado los materiales plásticos. Su creciente uso posiblemente se deba a que presenta buenas propiedades mecánicas comparables con otros termoplásticos comunes, a su aumento en disponibilidad y a su procesabilidad en varios procesos existentes de plásticos. Debido a esto el ácido poliláctico tiene el potencial para reemplazar parcialmente a plásticos de comodidad actual como polipropileno, polietileno, poliestireno y polietileno tereftalato (PET). (Garancher & Fernyhough, 2014)

En este trabajo se pretende evaluar la estabilidad dimensional de piezas 3D impresas de ácido poliláctico, ya que al ser un material utilizado ampliamente en diferentes sectores industriales, es importante contar con toda la información disponible sobre sus características. Además de aportar información útil para que quienes deseen utilizar PLA para manufacturar piezas sepan cómo se comportará este material con el paso del tiempo y el rango promedio de expansión/contracción que tendrá la pieza para decidir si lo utilizará.

IV. Antecedentes

4.1 Estabilidad dimensional de termoplásticos con diferentes tecnologías

En 2018, Durgashankar desarrolló una investigación en la Universidad Técnica de Liberec (República Checa), para determinar la estabilidad dimensional de piezas manufacturadas por tecnología aditiva utilizando impresión 3D. Él estudió detalladamente las propiedades del material y qué parámetros afectaban a largo plazo la estabilidad dimensional.

Utilizó diferentes tecnologías aditivas como Modelado de Deposición Fundida (FDM), Polyjet, Sinterizado de Laser Selectivo (SLS) y Estereolitografía (SLA). Los materiales que utilizó para su investigación fueron ABS, ABS 3SP, Vero Gray, PA 2200 y resina blanca. Para estos materiales comparó el cambio lineal en la geometría de las muestras respecto al tiempo de cada tecnología con relación a las dimensiones iniciales de impresión y las dimensiones nominales definidas en el modelo CAD.

Para la inspección de las piezas tomó intervalos de 3 meses y un año luego de que fueron impresas realizando dos tipos de prueba. La prueba 1 en la que estudió los efectos de temperatura y humedad mientras en la prueba 2 se sometían a iluminación ultravioleta. Las medidas de las piezas las obtuvo utilizando escaneo óptico 3D sin contacto y digitalización de las piezas.

Basando su análisis en los estándar ISO:1101 y ASME Y14.5 para dimensionamiento geométrico y desde el punto de vista del envejecimiento de las piezas, expone qué tecnología y material tendrán buena estabilidad dimensional y estabilidad de forma. El análisis de los resultados que obtuvo mostró que para las dimensiones de las piezas en FDM impresas de ABS no hubo cambios mayores a 0.05 mm durante todo el período de medición, por lo que los valores que encontraron ser mayores a este valor se consideraron como errores de medición. Pudo concluir que la combinación de ABS-P400 relleno completamente como sólido, impreso por FDM, con espesor de capa de 0.25 y sometido a la prueba 2: proporciona una buena estabilidad dimensional.

4.2 Estabilidad dimensional de piezas impresas en 3D: Efectos de los parámetros del proceso

En este estudio los investigadores tienen como objetivo determinar el efecto de 4 parámetros del proceso de impresión 3D sobre la dimensión nominal de la pieza diseñada. Estos parámetros son patrón de relleno, densidad de relleno, número de paredes creados por cada capa y altura de capa. El material que utilizan en esta investigación es ABS impreso en forma de cuadrado con una medidas nominales de 50 mm x 50 mm x 5 mm de espesor. Determinaron que utilizar esta geometría sencilla facilitaría cuantificar y compararlos cambios dimensionales que con geometrías curvas o agujeros. Para las piezas

se varió el patrón de relleno en diagonal y de rejilla, la densidad de relleno entre 20%, 50% y 100%, la cantidad de paredes en cada capa y la altura de capa entre 0.1 mm y 0.4 mm. Para tener un control de las variaciones en cada muestra realizaron 4 tipos de pruebas. La prueba 1 fue para evaluar el efecto del patrón de relleno y el porcentaje de densidad de relleno. En la prueba 2 evaluaron el efecto de la cantidad de paredes exteriores con 0, 2, 5, 7 y 10, este parámetro afectó la uniformidad del grosor para el largo y ancho del perfil del cuadrado. La prueba 3 evaluó el efecto de la altura de capa en la estabilidad dimensional. La prueba 4 utilizó la combinación de los mejores parámetros obtenidos en las primeras 3 pruebas que daban el menor error de media cuadrática e imprimieron una pieza más complicada con 3 formas geométricas impresa cada una sobre la otra: un hexágono, un círculo y un cuadrado largo.

Para presentar sus resultados primero tuvieron que calcular el error residual y el error de la raíz cuadrada media (o media cuadrática). El error residual (diferencia entre la medida real luego de imprimir y la teórica definida por el archivo CAD) lo calcularon a lo largo de cada dirección de cada muestra. Adicionalmente calcularon el error de la raíz cuadrada media, que es la raíz cuadrada del promedio del cuadrado residual en dirección del largo, ancho y espesor. Como resultado obtuvieron que el número de paredes jugaba un rol importante en la estabilidad dimensional de las piezas. A medida que el número de paredes incrementaba hasta una cantidad de 5, la raíz cuadrada media disminuía. Más allá de 5 paredes el error de la media cuadrática aumentaba debido a una deformación y curvatura en las esquinas.

Finalmente como resultados obtuvieron que para el ABS el menor error de media cuadrática se presentó al combinar los parámetros: patrón de relleno en forma de rejilla, 100% densidad de relleno, altura de capa de 0.4 mm y 5 paredes. (Azhikannickal & Uhrin, 2019)

4.3 Estabilidad dimensional de dos materiales luego de 6 meses de almacenaje

Lo que buscaban en este estudio los investigadores era determinar la estabilidad dimensional de un material llamado poliéter utilizado típicamente en aplicaciones de odontología. A pesar de que su aplicación no tiene relación con este trabajo, es un polímero al que también se le busca determinar su estabilidad al estar almacenado bajo condiciones específicas y el procedimiento está bien estructurado. Los dos materiales que estudiaron fueron el poliéter Impregum Penta y el Imprint 4Penta Putty con 90 de adición de silicón.

Las muestras obtenidas de estos materiales en total fueron 90. Las dividieron en tres grupos con 30 muestras cada uno: el grupo de control, el grupo de hipoclorito (desinfección) y el de esterilización. Almacenaron las muestras con las diferentes condiciones de cada grupo por 6 meses a 23 °C, en el Instituto Portugués para Calidad.

Midieron las muestras 2 veces antes y después de los 6 meses de almacenaje, este procedimiento lo llevaron a cabo por interferometría láser. Luego calcularon la estabilidad dimensional restando la dimensión final de la inicial y el cociente de esta resta sobre la dimensión inicial dio la proporción de cambio dimensional, al multiplicarlo por 100 obtuvieron el porcentaje de cambio.

Con los resultados obtenidos desarrollaron un análisis estadístico un ANOVA mixto de 3 vías para entender los efectos del material, de los grupos en estudio y del tiempo sobre la estabilidad dimensional. Encontraron una significativa contracción para el Impregum Penta de $0.77 \pm 0.17\%$ en el grupo de control. Para el Imprint 4Penta el grupo de control tuvo una contracción de $0.42 \pm 0.12\%$. Por lo que pudieron concluir que las muestras con un 5.25% de hipoclorito o esterilización se pueden usar en aplicaciones clínicas debido a que los cambios dimensionales durante el período de almacenaje se encontraban por debajo del límite que permite la norma ISO 4823:2000. (Martins, Branco, Reis, Navarro, & Mauricio, 2017)

4.4 Efectos del color del PLA en las propiedades del material

En este estudio las investigadores determinaron que las piezas producidas por RepRap en FDM presentaban fluctuaciones en propiedades de tensión por lo que quisieron resolver este problema investigando el efecto que tenía el color del PLA y la temperatura de procesamiento en sus propiedades. Estudiaron 5 colores: blanco, negro, azul, gris y natural. Las propiedades de interés fueron la cristalinidad, la resistencia a la tensión y la microestructura de las piezas.

Realizaron dichas pruebas de caracterización para determinar la cristalinidad por difracción con rayos-X. La microestructura se determinó utilizando un escáner microscópico sin contacto para las piezas. La resistencia a la tensión la determinaron realizando dichas pruebas estirando las piezas, observando y registrando la elongación contra la fuerza a la que se sometían las piezas. Para presentar sus resultados primero tuvieron que calcular el error residual y el error de la raíz cuadrada media (o media cuadrática). El error residual (diferencia entre la medida real luego de imprimir y la teórica definida por el archivo CAD) lo calcularon a lo largo de cada dirección de cada muestra. En este estudio los investigadores presentan la influencia de los parámetros geométricos con el proceso FDM sobre el esfuerzo que presentan las piezas impresas utilizando PLA.

Luego de realizar toda la metodología y tener resultados concluyeron que las propiedades del material se podían predecir de cierta forma de acuerdo con sus datos presentados los cuales dependían de la temperatura de extrusión con los colores. Esto porque hay una temperatura crítica para color, pero para determinar la temperatura y las propiedades de otros materiales era necesario realizar más pruebas. (Wittbrodt & Pearce, 2015)

V. Marco teórico

5.1 Manufactura aditiva

La manufactura aditiva (AM, por sus siglas en inglés) es el nombre que se le da a la producción industrial de impresión 3D, es un proceso controlado por computadora que crea objetos tridimensionales mediante la deposición del material generalmente en capas. Permite la creación de piezas ligeras y duras. Para realizar este proceso se utiliza un diseño asistido por computadora (CAD), lo que permite la creación de objetos de con formas geométricas precisas. Existen diferentes procesos de AM como: Deposición de Energía Dirigida (DED), Extrusión de Material, Inyección de Material, Inyección por Aglutinante, Laminación de Hoja, Polimerización en Tinta, Fusión de Lecho de Polvo y Fotopolimerización.

Otro de los procesos más comunes de aplicación de manufactura aditiva es el Modelado de Deposición Fundida (*Fused Deposition Modeling* o FDM) el cual consiste en depositar capa por capa sobre una mesa de trabajo el material termoplástico de aporte que es extruido a través de una boquilla, calentado a estado semifundido dejando a su paso un objeto tridimensional cuando el material se solidifica. (Medical Biosensors for Point of Care (POC) Applications, 2017)

A pesar de que para muchos la AM parece ser un tema demasiado nuevo, ha estado presente desde hace ya varias décadas. En las mejores aplicaciones, esta entrega un excelente producto con desempeño mejorado, geometrías complejas y fabricación simplificada. En décadas recientes muchos campos han adoptado esta tecnología y es tan amplio su campo de aplicación que se ha ramificado según las necesidades de cada área como arquitectura, comunicaciones, ilustración, ingeniería, medicina, entre otros. El resultado ha sido una gran revolución y avance para todas estas áreas industriales ya que la AM también brinda flexibilidad y eficiencia en operaciones de manufactura. (GE Additive, 2020)

Como se mencionó en el párrafo anterior la AM está presentando características más que sorprendentes y llamativas para cualquier campo en la industria. Tanto así que recientemente se pueden observar piezas producidas con esta tecnología en componentes de automóviles, no solo en carros comerciales sino también en autos de alto desempeño como el caso de McLaren en carreras de Fórmula 1. Además, se han utilizado piezas en aplicaciones aeroespaciales debido, nuevamente, a los diseños de geometrías complejas y ahorro en peso de componentes lo que la hace una excelente solución.

Por lo tanto, es sencillo percibir que gracias a la manufactura aditiva muchos procesos hoy en día son más rápidos, menos costosos, las piezas son más ligeras y que pueden llegar a tener características que compitan con las mejores características de otros procesos que se pueden ver limitados por las propiedades de manipulación de otros materiales.

5.2 Termoplásticos

Los polímeros son sustancias compuestas de largas cadenas moleculares llamadas macromoléculas las cuales se componen de secuencias de unidades consecutivas que pueden ser tanto homopolímeros como copolímeros. Dentro de los distintos tipos de polímeros se encuentran los termoplásticos que pueden tener estructuras moleculares amorfas o semicristalinas. (Laiarinandrasana, 2019)

Otros tipos de polímeros que se encuentran en la clasificación de los termoplásticos son los termoestables. Estos luego de haber sido moldeados a altas temperaturas asumen una forma permanente, lo que significa que no se pueden volver a fundir en otro molde porque se queman.

A diferencia de los termoestables, los termoplásticos tienen la característica de que al incrementarles la temperatura se pueden suavizar o derretir, lo que permite deformarlos y moldearlos de la forma que se desee para solidificarlos cuando se enfrían. Se puede repetir múltiples veces el proceso de calentado y enfriado sin causar daños severos en el material, permitiendo su reprocesamiento y reciclado, es importante mencionar que se debe tomar en cuenta que mientras más veces se recicle sus propiedades físicas cambiarán gradualmente y se reducirá la posibilidad de reutilización. (Biron, 2018)

Debido a que los termoplásticos presentan múltiples cualidades se pueden utilizar para diferentes campos de aplicación y propósitos. Entre los principales tipos de termoplásticos están:

- Polietileno de baja densidad (LDPE)
- Polietileno de alta densidad (HDPE)
- Cloruro de polivinilo (PVC)
- Polipropileno (PP)
- Poliestireno (PS)
- Polietileno tereftalato (PET)
- Nylon
- Ácido poliláctico (PLA)

5.3 Ácido poliláctico (PLA)

El ácido poliláctico surgió alrededor de 1932 cuando un científico llamado Wallace Carothers obtuvo este producto de bajo peso molecular al calentar ácido láctico al vacío aunque Dupont, empresa para la que trabajaba, haría unas mejoras y patentaría el proceso de Carothers años más tarde. A medida que surgieron avances en la fermentación de la glucosa mejoraron los procesos para obtener ácido láctico lo que dio como consecuencia una reducción en el costo de producción de este polímero. (Lee, 2012)

El PLA es un polímero termoplástico biodegradable compuesto de carbono, hidrógeno y oxígeno, según la fórmula: $(C_3H_4O_2)_n$. Es utilizado ampliamente en los campos de ingeniería y medicina debido a sus buenas propiedades mecánicas, a la biocompatibilidad que posee y degradación completa en organismos vivos ya que puede fabricarse de

diferentes recursos renovables como la fermentación de azúcares obtenidas de caña de azúcar o maicena.

En cuanto a la ingeniería se refiere el PLA es un material claro, brillante como el poliestireno, resistente a la humedad y a la grasa. Su fuerza extensible y módulo de elasticidad son comparables con los del polietileno pero es más hidrofílico que el polietileno y tiene una densidad más baja. Se utiliza para producir diferentes componentes de aplicación industrial y para manufactura de diferentes piezas moldeadas, películas o fibras. Es inodoro y permanente. Sus características lo hacen un material ideal para la impresión 3D. El porcentaje de contracción del PLA es entre 0.2-0.25% lo que es considerablemente bajo teniendo en cuenta que el ABS tiene un porcentaje de 0.8%. (3D Printer Geeks, 2019)

Hoy en día el PLA se puede fabricar de múltiples formas, de las cuales ninguna es sencilla de realizar ya que la síntesis del PLA requiere controles cuidadosos como la temperatura, presión, pH, el uso de catalizadores y tiempos extensos de polimerización. Entre los diferentes procesos de polimerización los más utilizados son: policondensación y polimerización apertura de anillo.

A medida que la tecnología de impresión 3D fue emergiendo con el tiempo se encontraron las propiedades del PLA prometedoras para producir piezas con geometrías complejas utilizándolo en tecnologías de modelado por deposición fundida. Este material presenta un bajo coeficiente de fricción, alta tensión, alto módulo y una temperatura de fusión alcanzable entre 195-205°C. (Farah, Anderson, & Langer, 2016)

5.4 Impresoras 3D

La Ultimaker 3 es una impresora de manufactura aditiva que utiliza el proceso FDM con termoplásticos de ingeniería en ambientes comerciales y de negocios. Una impresora 3D está compuesta de varios elementos que trabajan en conjunto para garantizar la materialización de un diseño, a pesar de que los diseños y procesos pueden variar ligeramente toda impresora tiene los siguientes componentes básicos.

El primer componente es el controlador cartesiano este se puede mover en tres direcciones lineales conocidas como ejes x , y , z o coordenadas cartesianas. Para realizar estos movimientos las impresoras utilizan pequeños motores stepper que se pueden mover con una buena precisión y certeza, normalmente se trasladan 1.8 grados por paso lo que resulta en una resolución en el orden de milímetros. Un controlados de tres ejes es como cualquier otro máquina de control numérico computarizado (CNC) que posiciona el extrusor termoplástico a lo largo de estos ejes lineales para colocar capa por capa el material calentado. La Ultimaker 3 tiene una precisión en los ejes X, Y, Z de 12.5, 12.5 y 2.5 micrones respectivamente.

El segundo componente es el extrusor que al contar con el sistema de desplazamiento por el controlador artesiano debe ser capaz de colocar las capas delgadas de un termoplástico que es un tipo de plástico capaz de ablandarse para estar en estado semilíquido cuando se calienta. El material se encuentra generalmente enrollado como bobinas con un diámetro de filamento entre 1.75 o 3mm que es ingresado como material de alimentación al extrusor y es impulsado por un sistema de engranajes. Dentro del

extrusor hay una cámara de calentamiento donde dependiendo del tipo de material se llega a la temperatura de fusión, una vez en estado semilíquido el material es forzado a pasar por la boquilla del extrusor que tendrá un diámetro aproximado de 0.35 a 0.5mm. El diámetro de filamento con el que trabaja la Ultimaker 3 es de 2.85mm, mientras que el diámetro de la boquilla puede ser de 0.25, 0.40 y 0.80mm.

El tercer componente es la cama de impresión o mesa de trabajo como también se le conoce que es la superficie base sobre la cual se crearán las piezas 3D. El tamaño de estas camas puede variar dependiendo de las dimensiones de la impresora, generalmente las impresoras de tipo escritorio o personales tienen aproximadamente un área de 200x200mm. Normalmente están hechas de vidrio o aluminio para garantizar la propagación uniforme de calor a través de toda el área además de proporcionar superficies lisas y adherentes para el material impreso (Evans, Practical 3D Printers, 2012). La Ultimaker 3 tiene un volumen de impresión de 215 x 215 x 200mm y su temperatura de trabajo para asegurar la adhesión del PLA debe ser de 60°C.

La impresora Ultimaker 3 tiene compatibilidad con los siguientes materiales según el núcleo de impresión que se utilice.

	PLA	ABS	Nylon	CPE	CPE+	PC	TPU 95A	PP	PVA	Breakaway
Print core 0.25	✓	✓	✓	✓	✗	①	①	✓	✗	✗
Print core 0.4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Print core 0.8	✓	✓	✓	✓	①	①	✓	✓	✓	✗

✓ Officially supported ① Experimental ✗ Not supported

Figura 1. Materiales compatibles con Ultimaker 3.

Fuente (Support, 2017)

5.5 Software de Impresión 3D

Un software de impresión 3D corta un modelo 3D en capas finas, estas capas se convierten en instrucciones para que la impresora 3D deposite el material capa por capa hasta crear el modelo. Ultimaker Cura es el programa que utiliza la impresora Ultimaker 3 el cual está dividido en las siguientes tres etapas:

- **PREPARACIÓN.** La primera etapa consiste en cargar y configurar el modelo 3D a imprimir. Se configuran los parámetros de impresión que son importantes ya que según su configuración así será la estrategia que utilizará el programa para imprimir la pieza, dicha configuración puede ser la Recomendada o Personalizada. Para la primera se configuran de forma básica la altura de capa, el porcentaje de relleno, material de soporte y adhesión para realizar un borde alrededor del objeto. Los parámetros y sus efectos para configuración Personalizada serán expuestos más adelante.
- **PREVISUALIZACIÓN.** Según se configuren los parámetros en la primera etapa, en esta segunda se obtiene una vista previa y evaluación del proceso de impresión 3D segmentando el modelo en capas. Además es visible no solo cada trayectoria si no la forma de cada capa generada por Ultimaker Cura, el tiempo total

que tomará la impresión para terminar el objeto y la cantidad de material lineal que consumirá. Al verificar que el procedimiento y los parámetros son correctos se envía a imprimir si la impresora está conectada o se exporta el código G generado por Cura a un USB y se puede cargar manualmente en la impresora.

- **MONITOR.** En esta etapa se puede ver el estado de la impresión, información de la impresora, material utilizado para la impresión y trabajos en espera.

5.6 Parámetros de impresión

En los programas de impresión 3D se deben configurar parámetros que definirán el tiempo total de impresión, estrategia a utilizar para la extrusión del material capa por capa y que afectarán las características del objeto, como se muestra a continuación.

- **CALIDAD.** En esta pestaña se define la altura de capa tanto de la inicial como de las que conformarán el resto de la geometría (mm). Mientras el valor sea mayor la impresión será más rápida con una resolución más baja, por lo tanto a menor tamaño la velocidad será menor y la resolución será mayor.

- **PERÍMETRO O REVESTIMIENTO (“SHELL”).** En esta pestaña se definen los parámetros de espesor en la parte superior e inferior del modelo, altura de capas superiores e inferiores y el espesor de pared (todos en mm).

- **RELLENO.** Esta pestaña contiene los parámetros que definen el interior del modelo como la densidad de relleno (%) y el patrón de relleno que indica la composición interior de la impresión. El primer parámetro solo ajusta la densidad que tendrá el relleno. El segundo parámetro puede ser de línea y zigzag que reduce el costo del material al cambiar de dirección alternando las capas. El relleno giroide, cúbico, cúbico bitruncado y de octeto cambian en cada capa para una distribución de fuerza equitativa mientras los patrones de rejilla, triángulo, trihexágono, cubo, octeto, transversal y concéntrico se imprimen completamente en todas las capas.

- **MATERIAL.** Para esta pestaña se configuran los parámetros de temperatura del material como la temperatura de impresión predeterminada que depende de cada material, temperatura de impresión de la capa inicial, flujo de extrusión del material, entre otros. La temperatura de impresión para PLA debe estar ente 195-205°C mientras que la temperatura de la cama o mesa de trabajo debe estar a 60°C para asegurar que la impresión se adhiera y no haya deslizamiento durante la impresión para evitar imperfecciones en la geometría de la pieza.

- **VELOCIDAD.** Aquí se configuran todas las velocidades de la impresión, velocidad para el relleno, velocidad de impresión de la pared exterior e interior, velocidad del desplazamiento de la boquilla y la placa de impresión. Mientras las velocidades sean mayores el tiempo de impresión y resolución de la pieza serán menores.

- **DESPLAZAMIENTO:** Los parámetros configurados en esta pestaña indicarán las áreas sobre las que se desplazará la boquilla y delimitará los desplazamientos tanto en los ejes del plano horizontal como el eje de elevación Z.

Si hay más desplazamiento sin extrusión de material el tiempo total de impresión será mayor.

- **SOPORTE.** Este parámetro genera soporte para estructuras que contengan voladizos.
- **OTROS.** Otros parámetros que se pueden modificar para impresiones más complejas son refrigeración, adherencia de la placa, extrusión doble, correcciones de malla, experimental y modos especiales.

5.7 Estabilidad dimensional

La estabilidad dimensional es una medición de cambios en dimensiones lineales en dirección longitudinal o transversal de cualquier tipo de material. Comúnmente se aplica para evaluar metales y polímeros aunque estos últimos son los más estudiados entre los dos. Cuando se desea determinar la estabilidad dimensional de un material, se puede utilizar para cubrir un amplio rango de temas, incluyendo expansión térmica, contracción, punto de ablandamiento, efectos de líquidos que se pueden sobreponer con efectos de temperatura y ambiente.

Cuando se estudia la estabilidad dimensional de los termoplásticos se evalúan los cambios que resultan de la exposición del material a condiciones específicas como el comportamiento del material al pasar el tiempo, temperaturas elevadas, exposición a radiación o en algunas ocasiones también se consideran cambios por humedad relativa. Por lo tanto, un polímero estable dimensionalmente es aquel que mantiene sus proporciones ante diferentes condiciones ambientales, muestra una baja absorción de agua y baja expansión térmica.

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) ha definido una prueba para el estudio de estabilidad dimensional conocida como ASTM D1204. Esta prueba da indicación sobre la uniformidad con respecto a esfuerzos internos introducidos en un material durante el procesamiento. Las dimensiones de las probetas o muestras se consideran en unidades del Sistema Internacional (SI) para cumplir el estándar, al igual que las mediciones que se le realizan al material. (ASTM International, 2012)

Por otro lado, la Institución de Estándares Suecos ha desarrollado también su propia norma en cuanto a la determinación de la estabilidad dimensional para plásticos conocida como Estándar Sueco ISO-2796: Prueba para estabilidad dimensional – Plásticos rígidos celulares. Este estándar difiere del anterior en que aquí se especifica claramente que es para aplicarlo a plásticos rígidos, mientras que la ASTM D1204 es para termoplásticos no rígidos.

4.7.1 SS-ISO 2796. El documento consta de varios apartados en los que se explica detalladamente el procedimiento a seguir. A continuación se describen brevemente dichos apartados.

1) **ALCANCE Y APLICACIÓN.** Este estándar especifica un método para determinar la estabilidad dimensional de plásticos rígidos celulares cuando se someten a condiciones específicas de temperatura y humedad. El método sugiere un rango de condiciones de las cuales una o más se pueden seleccionar para las condiciones deseadas para la prueba.

2) REFERENCIAS. Para aclarar ciertos procedimientos este documento hace referencias a los estándares ISO 291-*Atmósferas estándar para acondicionamiento y pruebas* y al ISO 1923 – *Determinación de dimensiones lineales*.

3) PRINCIPIO. Determinación de cambios en dimensiones lineales que ocurren cuando muestras son sometidas a ambientes específicos por períodos definidos de tiempo y reacondionadas.

4) APARATOS. Lo necesario para poner en marcha el procedimiento. Una cámara con temperatura controlada o temperatura y humedad controladas. Instrumentos de medición capaces de medir dimensiones lineales.

5) MUESTRAS PARA PRUEBAS. Las muestras no deben presentar rajaduras en sus superficies y deben tener apariencia de tener superficie lisa. Un mínimo de 3 muestras se debe utilizar por cada condición seleccionada.

6) ACONDICIONAMIENTO. Las pruebas se deben condicionar en alguna atmósfera estándar.

7) PROCEDIMIENTO. Se muestran las posiciones en que se debe medir el largo, ancho y espesor. Además de las condiciones a elegir para exponer las muestras. Además se menciona el tiempo que se puede sacar a las muestras del espacio controlado y el tiempo que deben estar expuestas a las condiciones seleccionadas.

8) EXPRESIÓN DE RESULTADOS. Se presenta el método de cálculo. El cambio porcentual esta dado por las siguientes fórmulas para:

- Largo

$$100 \times \frac{l_t - l_o}{l_o}$$

- Ancho

$$100 \times \frac{b_t - b_o}{b_o}$$

- Espesor

$$100 \times \frac{\delta_t - \delta_o}{\delta_o}$$

donde

l_o, b_o, δ_o son las dimensiones medias iniciales y

l_t, b_t, δ_t son las dimensiones medias finales en cada período de medición

Se aclara que la precisión y exactitud de este método se desconoce porque los datos obtenidos en laboratorios de colaboración no están disponibles. La precisión de los instrumentos debe ser de acuerdo con lo establecido por el ISO 1923.

9) REPORTE. El reporte de las pruebas debe incluir:

- La referencia a este estándar
- Las particularidades para la identificación de las muestras
- El procedimiento de acondicionamiento
- Las condiciones de prueba empleadas

- Para cada período de exposición señalado en este estándar, el porcentaje de cambio individual de largo, ancho y espesor.
- Para cada período de exposición señalado en este estándar, el promedio del porcentaje de cambio en largo, ancho y espesor.
- Para cada período de exposición, observaciones sobre distorsiones visuales en las muestras.
- Cualquier otro método utilizado que no se especifica en este estándar.
- Cualquier desviación del procedimiento especificado.

(SIS, 1986)

5.8 Humedad y temperatura en polímeros

La absorción de humedad es la capacidad que tiene un material, como su nombre lo indica, de absorber humedad desde el ambiente en el que se encuentre. Los plásticos absorben agua a un grado límite. El grado de absorción depende del tipo de plástico y las condiciones ambientales tales como la temperatura, humedad y tiempo de contacto.

No solo pueden cambiar las dimensiones del plástico sino también las propiedades como resistencia mecánica, conductividad eléctrica y el factor de pérdida dieléctrica también se puede ver afectado. El único polímero que no absorbe agua es el Politetrafluoretileno (PTFE). Entre los plásticos que se clasifican como de muy baja absorción de agua están el PET, PP, ABS, PLA, entre otros. Las poliamidas generalmente muestran mayor absorción de agua que otros plásticos de ingeniería, esto conlleva cambios dimensionales en piezas terminadas, reducción de resistencia y cambios en las características de aislamiento eléctrico. (Ensinger Plastics, 2020)

Otro factor importante que afecta las dimensiones de los plásticos es la temperatura. La manera en que la temperatura afecta a un material se observa con el coeficiente de expansión térmica lineal. Este coeficiente especifica la magnitud del cambio en longitud de un material debido al incremento o disminución de la temperatura. Debido a su composición química los plásticos generalmente demuestran un alto coeficiente de expansión que es significativo en comparación a los metales.

El coeficiente de expansión térmica lineal de los plásticos puede reducirse significativamente mediante la adición de fibras reforzadas o algún otro componente. Al hacer esto se pueden conseguir valores de coeficiente de expansión comparables con los del aluminio que es bajo.

5.9 Estadística descriptiva

La estadística descriptiva es el conjunto de métodos estadísticos que describen y/o caracterizan un grupo de datos. Al conjunto de distintos valores numéricos que adopta un carácter cuantitativo se le llama variable estadística. Las variables estadísticas pueden ser de dos tipos: cualitativas (no se pueden medir) o cuantitativas (tienen valor numérico), estas últimas pueden ser discretas o continuas.

Al realizar un análisis estadístico se requiere conocer el conjunto objetivo, de la cual se pretende extraer conclusiones. Para esto es importante conocer los siguientes conceptos.

- INDIVIDUO. Cada uno de los elementos de la población (unidad estadística).
- POBLACIÓN. Colectivo de individuos sobre los que se desea extraer una conclusión.
- MUESTRA. Subconjunto representativo de la población, que se selecciona con el objetivo de extraer información.

Para realizar representaciones gráficas es importante recordar los dos tipos de variables estadísticas. Para las variables cualitativas, se pueden utilizar el diagrama de barras o diagrama circular. En el diagrama de barras, el eje horizontal representa las categorías o modalidades de la variable a representar y la altura de las barras se define por la frecuencia de cada modalidad. En el diagrama circular de la misma manera se representan las modalidades y su frecuencia.

Para las variables cuantitativas discretas, si se tienen pocos valores se pueden usar las representaciones de las variables cualitativas. Si contienen muchos valores, se pueden utilizar las representaciones de variables cuantitativas continuas. Un gráfico particular de las discretas es el diagrama acumulativo de frecuencias, que se construye para cada modalidad de la variable c_i hay un punto que depende c_i y se unen los segmentos horizontales y verticales obteniendo una función escalonada. Las variables cuantitativas continuas se pueden construir con un polígono de frecuencias que es igual al de las cuantitativas discretas pero se consideran las marcas de clase de cada intervalo e_i . Las más usadas son representaciones como el histograma y el diagrama de tallo y hojas.

5.9.1 Medidas características. Estas medidas se utilizan para describir la información contenida en las muestras. Dichas medidas se usan para resumir la información tomando en cuenta 3 factores: alrededor de qué valores están los datos, cuánto se dispersan y si se distribuyen de manera similar a una campana de Gauss, que es un modelo que se toma como referencia. Los distintos tipos de medidas que hay son: medidas de forma, medidas de dispersión y medidas de posición.

- MEDIDAS DE POSICIÓN. Las medidas de posición indican los valores alrededor de los cuales se encuentran los datos observados. Aquí se encuentran las medidas de tendencia central (media aritmética, mediana y moda) y medidas de tendencia no central (cuartiles).
- MEDIDAS DE FORMA. Estas medidas dan una idea de cómo se distribuyen los datos, lo importante de estas medidas es su interpretación. Incluyen el coeficiente de asimetría y el coeficiente de curtosis.
- MEDIDAS DE DISPERSIÓN. Aquí se encuentran las medidas de dispersión absoluta (varianza y desviación estándar) y de dispersión relativa (coeficiente de variación)

Para los propósitos de este trabajo se pondrá especial atención a las medidas de dispersión absoluta. Estas medidas indican en torno a qué valores están situados los datos, para obtener una descripción precisa es necesario conocer la dispersión de estos, los cuales se explican a continuación.

- **DESVIACIÓN ESTÁNDAR.** Es una medida estadística de la dispersión de un grupo o población, si la desviación estándar es mayor quiere decir que la población está muy dispersa respecto a la media. Por el contrario una desviación estándar pequeña indica que la población está demasiado cercana alrededor de la media. Existen diferentes formas de encontrar la desviación estándar (s o σ), la más sencilla es calcular la raíz cuadrada de la varianza en caso de tenerla. O bien se puede calcular de la siguiente manera:

$$s = + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

donde

n es el número de muestras,

X_i son los datos de las muestras y

\bar{X} es la media de los datos.

- **VARIANZA.** Mide la mayor o menor dispersión de valores de una variable respecto a la media aritmética. Mientras mayor es la varianza mayor dispersión entre datos hay. La varianza tiene unidades de datos al cuadrado por lo que no es conveniente comparar esta medida, para esto se utiliza la desviación estándar. Entre las propiedades que presenta la varianza está que toma valores no negativos porque es un promedio de valores no negativos por la diferencia de cuadrados y tampoco es lineal ya que no es afectada por sumar o restar constantes pero si al multiplicar por un factor. Para calcular la varianza (s^2) se utiliza la siguiente formula:

$$s^2 = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2.$$

donde

n es el número de muestras,

X_i, X_n son los datos de las muestras y

\bar{X} es la media de los datos.

(Faraldo & Pateiro, 2013)

5.9.2 ANOVA. El análisis de varianza fue desarrollado por Fisher en 1930. Consiste en una herramienta estadística que permite estudiar el efecto de uno o más factores sobre la media de una variable continua. Esta prueba o análisis se querrá utilizar para comparar las medias de dos o más grupos. Los diferentes tipos de ANOVA parten de una hipótesis nula en la que se propone que la media de la variable que se está estudiando en los diferentes grupos es la misma para todos. Por lo tanto, también se cuenta con su contraparte que es la hipótesis alternativa en caso de que la hipótesis nula sea rechazada.

El desarrollo de un ANOVA se basa en calcular la media de cada grupo para comparar la varianza entre estas medias contra la varianza promedio dentro de los grupos. Si las medias están alejadas unas de las otras, la varianza se incrementará. El estadístico estudiado en el ANOVA se conoce como *valor F*, que es la relación entre la varianza de las medias de los grupos y el promedio de la varianza dentro de los grupos. Para rechazar la hipótesis nula el valor *F* debe ser mayor al valor *F crítico* este se calcula por medio de tablas

conociendo los grado de libertad y el nivel de significancia (α), de lo contrario se aceptará la hipótesis nula.

Existen diferentes tipos de ANOVA dependiendo si se trata de datos independientes, si son pareados, si comparan la variable cuantitativa dependiente contra los niveles de una única variable explicativa o factor o dos factores. Cada tipo de ANOVA tiene una serie de requerimientos. (Amat, 2016)

5.10 Tabla de control

La tabla de control de proceso estadístico (también llamada Tabla de Shewhart) es una gráfica utilizada para estudiar cómo cambia un proceso con el paso del tiempo. Los datos son graficados en orden cronológico. Una tabla de control tiene una línea central que indica el promedio de los datos, una línea superior (LSC) para controlar el límite superior y una línea inferior (LIC) para controlar el límite inferior. Estas líneas se determinan a partir de la historia de los datos. Comparando los datos actuales con estas líneas se pueden sacar conclusiones sobre si la variación del proceso es consistente o es impredecible.

Las regiones del gráfico de control son 3 hacia arriba y 3 hacia abajo, estas se nombran desde la línea central hacia afuera y aparecen de forma simétrica por lo que la primera región a los lados de la línea central es la Región C, luego sigue la Región B y por último la Región A. El rango de la Región C va desde el promedio hasta el valor de la varianza (1σ) para la Región B van desde la Región C hasta el valor doble de la varianza (2σ), este mismo valor es el límite inicial de la Región A que llega hasta LSC y LIC con un valor del triple de la varianza (3σ). Un ejemplo del aspecto de esta gráfica y sus divisiones se muestra a continuación.

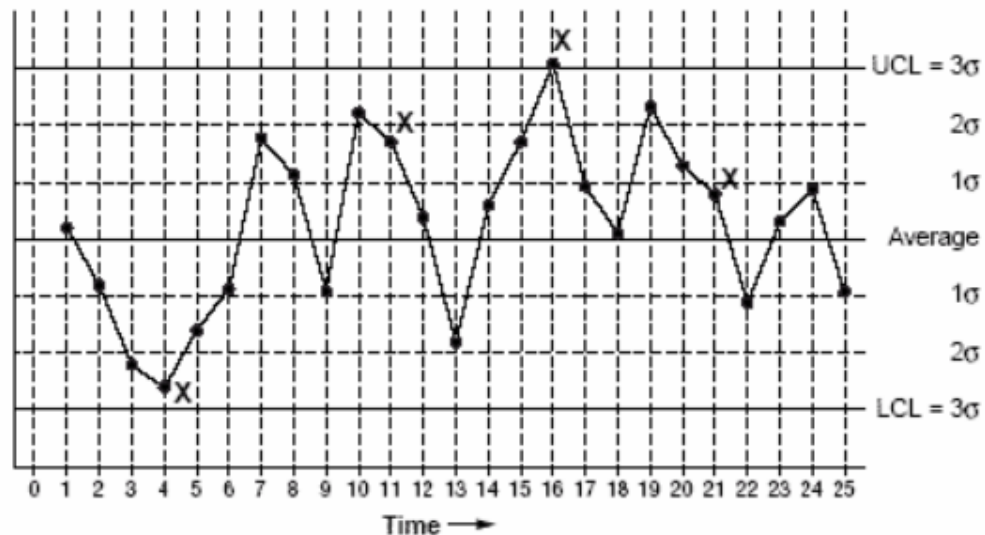


Figura 2. Ejemplo de gráfica de control.

Fuente: ASQ

La tabla de control se puede utilizar por diferentes razones como:

- Cuando se desea controlar un proceso encontrando y corrigiendo los problemas según ocurran.
- Para predecir el rango esperado de resultados de un proceso.
- Para determinar si un proceso es estable (en un control estadístico).
- Al analizar patrones de variaciones de procesos por causas especiales o comunes.
- Cuando se va a determinar si un proyecto de mejora de calidad se debe enfocar en prevenir problemas específicos o se deben hacer cambios fundamentales al proceso. (ASQ, 2020)

El procedimiento básico consiste en recolectar los datos y construir la tabla para analizarlos. Al tener la tabla se buscan señales que estén fuera del control de dicha tabla. Las señales pueden ser las siguientes:

- SEÑAL 1. Un punto fuera de los límites de control (LSC o LIC). Indica que el problema presente es una larga variación.
- SEÑAL 2. Dos o tres puntos en la Región A (región anterior a los límites). Indica una pequeña variación constante.
- SEÑAL 3. Cuatro o cinco puntos en la Región B y/o A pueden o no ser consecutivos (la Región B es la región anterior a la Región A). Indica que hay una tendencia o desvío hacia arriba o hacia abajo.
- SEÑAL 4. Nueve puntos consecutivos de un solo lado del eje central del gráfico, sin importar si están en la misma región. Indica que hay una variación sistemática no aleatoria.
- SEÑAL 5. Seis puntos consecutivos subiendo (o bajando) sin importar las regiones. Indica una variación mediana.
- SEÑAL 6. Catorce puntos consecutivos subiendo y bajando en forma alternada (uno arriba y otro abajo consecutivamente). Indica una variación pequeña.
- SEÑAL 7. Quince puntos consecutivos solamente en las regiones C (son las regiones más cercanas arriba y abajo del eje central). Indica que hay estratificación.

Cuando se identifica que uno de los puntos presenta alguna de estas señales, se marca y se investiga. En procesos de control se investiga la causa de esta señal ya que se desea mejorar el proceso y se corrige para la siguiente vez que se vuelva a correr.

VI. Marco metodológico

Para obtener las muestras se realizó el proceso de diseño y manufactura que se expone a continuación:

6.1 Diseño de la muestra

Se realizó el siguiente procedimiento para el diseño de la muestra:

- Evaluación de materiales disponibles y utilizables para la impresora seleccionada.
- Selección de material para imprimir la muestra.
- Investigación sobre estándares que rigen las normas para medir la estabilidad dimensional de termoplásticos.
- Evaluación de dimensiones comunes de la muestra para verificar que la muestra se puede imprimir (espacio disponible en la mesa de trabajo).
- Utilizar software de diseño asistido por computadora (CAD) para dimensionar la pieza.
- Exportar la pieza diseñada en formato STL para ingresar el archivo en el software de la impresora Ultimaker Cura.

6.1.1 Selección del material. El material utilizado en esta investigación se determinó luego de evaluar la variedad de materiales con los que la impresora 3D era compatible, en este caso una impresora Ultimaker 3. Dicha impresora es compatible con materiales como: PLA, ABS, Nylon, Polipropileno (PP), entre otros. El PLA fue el material seleccionado ya que a comparación del Nylon o el ABS no se han hecho mayores estudios en cuanto a su estabilidad dimensional además de tener el factor económico a su favor y disponibilidad inmediata en el taller de la Universidad del Valle de Guatemala.

Por lo tanto, el filamento con el que se imprimieron las muestras fue de PLA con un diámetro de 2.85 ± 0.10 mm.

6.1.2 Normas sobre determinación de estabilidad dimensional. Para realizar un procedimiento válido en la determinación de la estabilidad dimensional del PLA se tomó de referencia la norma estándar sueca ISO 2796 (SS-ISO 2796): Prueba para estabilidad dimensional – Plásticos celulares rígidos. Esta norma junto con otras investigaciones sobre estabilidad dimensional, a las cuales se hace referencia más adelante, fueron las bases para desarrollar este trabajo de investigación.

A partir de estas fuentes se determinó el número necesario de muestras. Un mínimo de 3 muestras por cada parámetro a estudiar: alto, ancho, espesor y tiempo. A pesar de que la

humedad y la temperatura son factores importantes durante el desarrollo de las pruebas no se consideraron factores de estudio en las muestras, ya que estos se mantuvieron a propósito con una mínima variación ($\pm 2^{\circ}\text{C}$ para temperatura y $\pm 5\%$ para humedad relativa).

6.1.3 Dimensiones de la pieza. La capacidad de impresión de la Ultimaker 3 es un volumen de construcción de 215 x 215 x 200mm de profundidad, por lo que cualquier objeto impreso menor a esas dimensiones era aceptable. La SS-ISO 2796 indicaba una muestra con dimensiones de 100 x 100 x 25mm, pero esta opción se descartó debido al espacio reducido en el que se iban a colocar las piezas durante las pruebas, además requerir mayor material y en consecuencia mayor tiempo de impresión a comparación de la geometría seleccionada. A partir de Azhikannickal, la geometría de la pieza se definió como un cuadrado de dimensiones 50 x 50 x 5mm de espesor como se muestra en la siguiente figura.

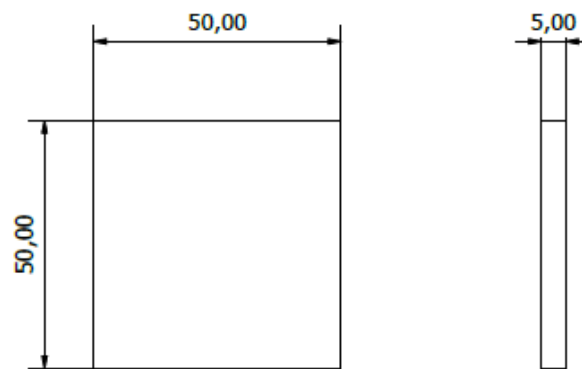


Figura 3. Geometría de la pieza (mm).

6.1.4 Diseño de la pieza asistido por computadora. Para dimensionar la geometría de la pieza a imprimir se utilizó Autodesk Inventor Professional 2019. Se creó la pieza tipo estándar en sistema métrico como se indica en la figura siguiente:

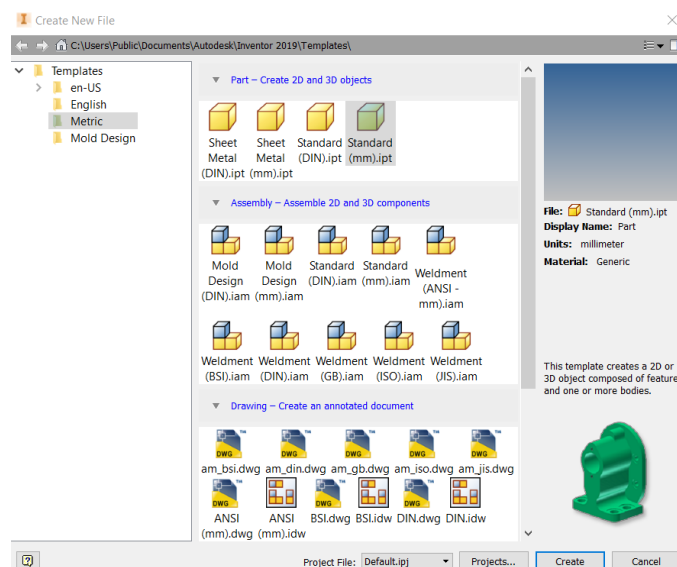


Figura 4. Creación formato ipt

La geometría se realizó en el plano XZ para que las operaciones coincidieran con la mesa de trabajo de la impresora 3D y las coordenadas de desplazamiento horizontal de la boquilla estuvieran definidas por los ejes XY. Se ingresó el boceto de un rectángulo al cuales se le colocaron restricciones para que las cuatro líneas fueran iguales en tamaño y entre ellas perpendiculares en sus extremos. Las dimensión en milímetros para completar la pieza fue de 50. Por último se realizó la extrusión hacia arriba del plano XZ por 5mm y la pieza quedó definida en sus tres dimensiones como se muestra a continuación:

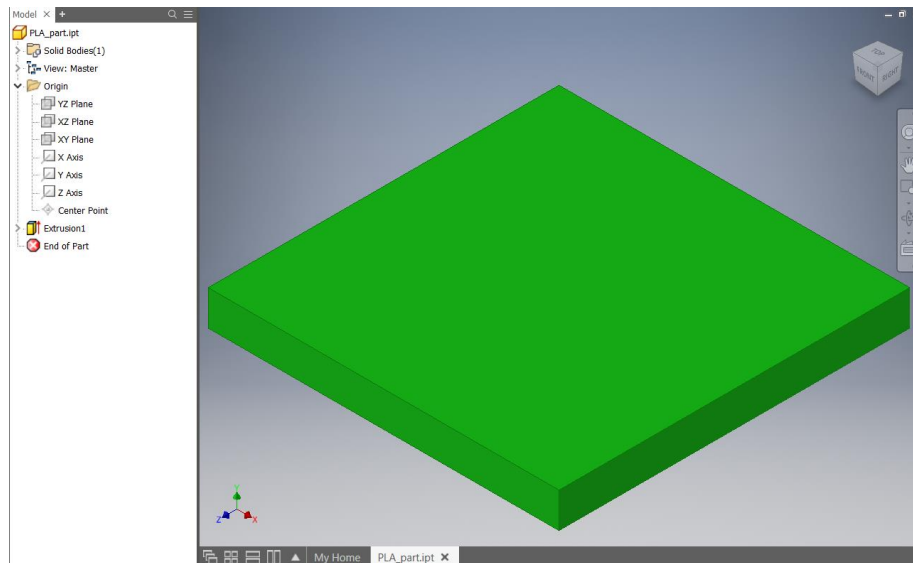


Figura 5. Pieza diseñada en Inventor 2019

6.1.5 Exportación de la pieza. Para concluir con la fase de diseño de las muestras y poder proceder con la fase de manufactura es necesario guardar y exportar el diseño final de la pieza en formato STL para que el software encargado de enviar el código G a la impresora 3D pueda interpretarlo. Este requerimiento puede o no ser necesario según el tipo de software que se utilice, en este caso, Ultimaker Cura lo solicita para poder modificar la pieza 3D. (Plano de la pieza en Anexos)

6.2 Manufactura de la muestra

Se realizó el siguiente procedimiento para la producción de la muestra:

- Cargar el archivo en Ultimaker Cura con la escala respectiva.
- Cargar los parámetros necesarios para definir la estrategia de impresión que seguirá la impresora 3D.
- Imprimir la muestra y supervisar el proceso en todo momento.
- Esperar a que se enfríe la mesa de trabajo y extraer la pieza cuidadosamente para no quebrarla.
- Enumeración y rotulación de cada pieza con líneas guía para medir las dimensiones.

6.2.1 Importación de la pieza. Como primer paso para evitar errores en la impresión o diferencia de tamaños, se configuró el sistema del software con las mismas unidades con que se exportó el archivo STL, es decir, en milímetros. Para cargar la pieza en Ultimaker Cura se abrió el archivo exportado en Inventor y se colocó de manera que el espesor de la pieza fuera perpendicular a la mesa de trabajo como se muestra en la siguiente figura:

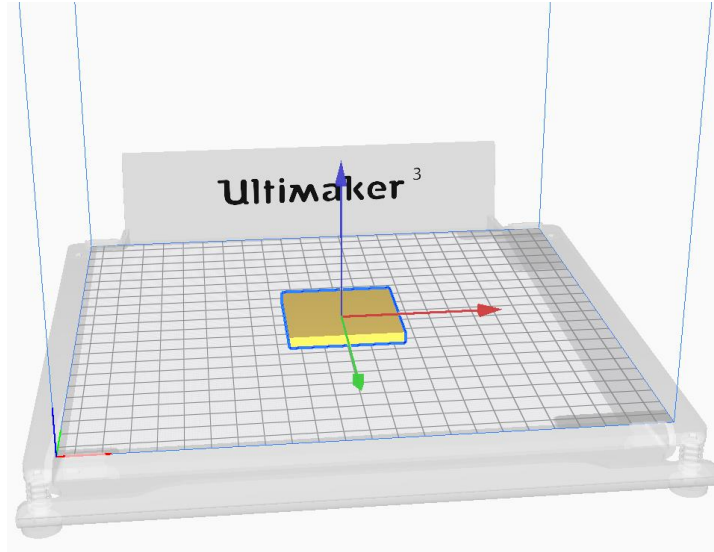


Figura 6. Posición de la pieza en Ultimaker Cura

Una vez colocada la pieza de esta manera sobre la mesa de trabajo y de haber verificado que la escala era la correcta se procedió con la definición de los parámetros de impresión.

6.2.2 Modificación de parámetros para impresión

Los parámetros ingresados para la pieza se enlistan a continuación:

- Altura de capa: 0.2 mm
- Altura de capa inicial: 0.27 mm
- Densidad de relleno: 50%
- Patrón de relleno: Líneas
- Temperatura de la boquilla: 200 °C
- Temperatura de la cama: 60°C
- Temperatura de impresión de la capa inicial: 210°C
- Velocidad de impresión y relleno: 70 mm/s
- Ancho de línea de pared externa: 0.35 mm
- Ancho de línea de pared interna: 0.3 mm

Los parámetros anteriores fueron los más fundamentales en definir ya que a partir de esta configuración los demás parámetros que dependían de estos se modificaron automáticamente por Ultimaker Cura. El software pronosticó un total de 47 minutos de impresión por cada pieza. En la siguiente figura se muestra la segmentación de la pieza para observar su composición interior, que fue la forma en que la boquilla fue depositando el material en capas.

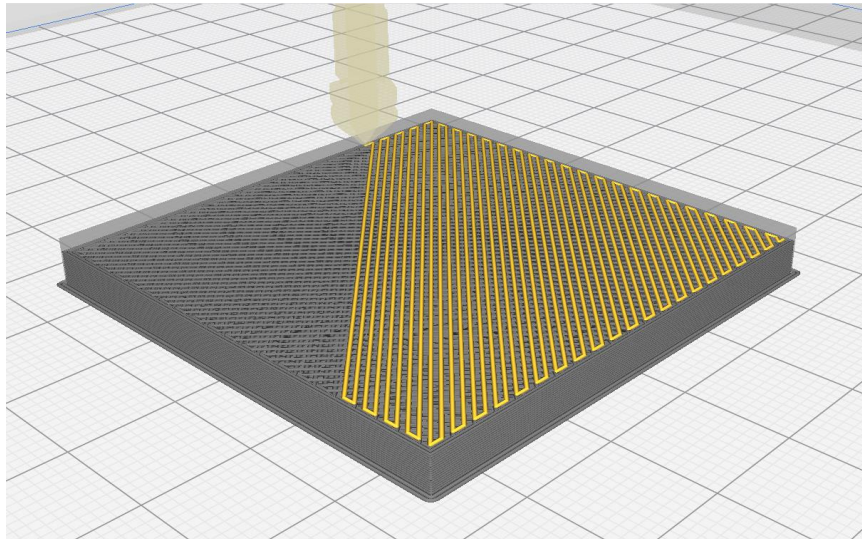


Figura 7. Patrón de relleno de la pieza (Líneas)

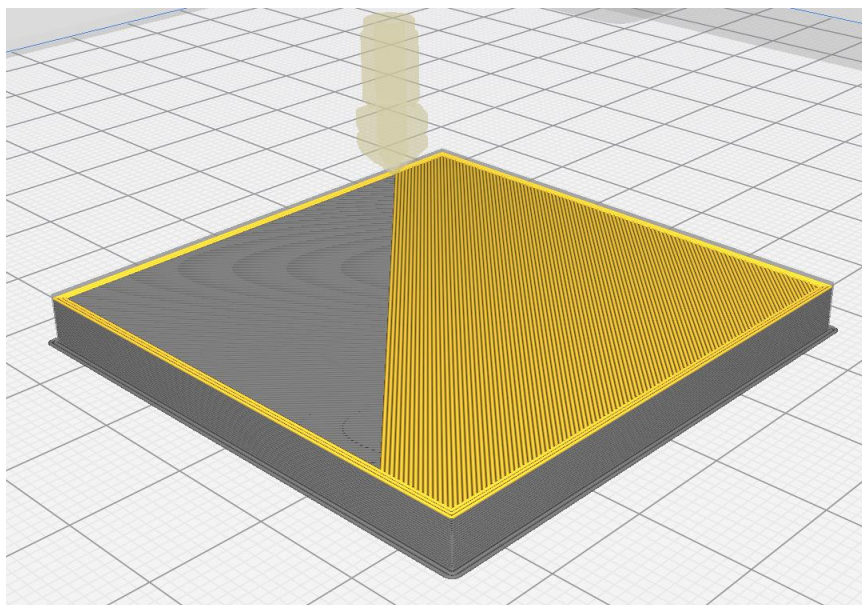


Figura 8. Capa superior de la pieza (Líneas)

6.2.3 Impresión y extracción de piezas. Para la impresión de las 12 piezas que serían las muestras sometidas a pruebas se cargó el archivo de código G generado en Cura luego de haber guardado la configuración de los parámetros de impresión. Al ser una impresora

Ultimaker 3, corre el programa de manera continua cuando no hay errores en el código por lo que se puede dejar funcionando la impresora y fue tan necesario el monitoreo permanente durante la impresión de todas las piezas pero de vez en cuando se verificó que la impresora estuviera imprimiendo de manera correcta.

Como se mencionó anteriormente el tiempo de impresión por pieza pronosticado por Cura fue de 47 minutos y ninguna pieza representó complicación alguna durante su producción. Cada pieza se podía extraer una vez la temperatura de la cama o mesa de trabajo estuvieran a temperatura ambiente. Para despegarlas piezas del vidrio del que está hecha la mesa de trabajo se buscó siempre retirarlas con las manos para evitar dañar en la mayor medida posible la geometría dichas piezas.

6.2.4 Rotulación de piezas. Las 12 piezas estaban impresas 18 días después de que se inició su producción y se obtuvieron al día siguiente para iniciar con las mediciones. Inicialmente se colocaron con la cara superior (última capa producida por la impresora 3D) hacia arriba mientras que la cara trasera (capa inicial en contacto con la mesa de trabajo) se orientaba hacia la superficie de una mesa. Se enumeraron las muestras de 1 a 12.

Para orientar las piezas se utilizó la dirección de las líneas que componen dichas piezas con una orientación diagonal desde la esquina izquierda superior hacia la esquina derecha inferior (Figura 9) para trabajar todas las medidas de las piezas respecto a la misma dirección.

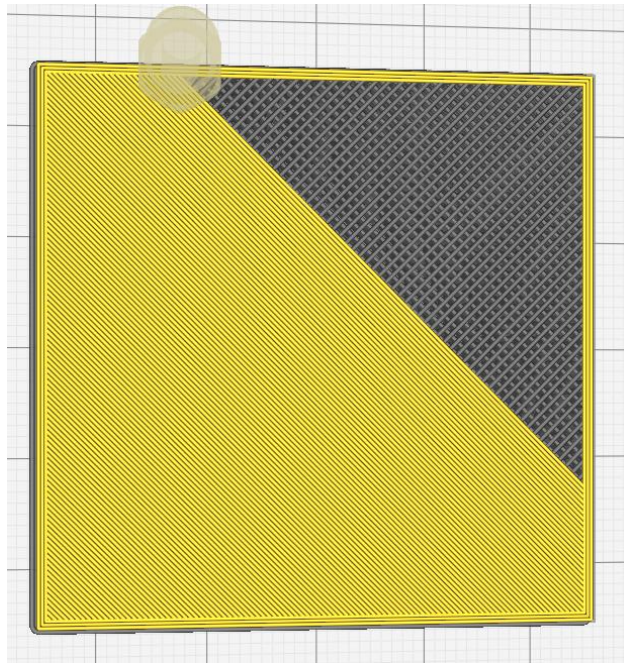


Figura 9. Identificación de posición de cada pieza

En cada pieza se hicieron marcas para identificar las posiciones en las que se iban a medir las dimensiones. Dichas posiciones debían encontrarse como se explica a continuación:

Para el largo: la primera posición (l_1) se marcó a 0.1 veces el ancho de izquierda a derecha del borde de la pieza. La segunda posición (l_2) a 0.5 veces el ancho (centro de la pieza) y la tercera posición (l_3) a la misma distancia que se marcó la primera (0.1 veces el ancho) pero de derecha a izquierda en el borde contrario. (Figura 10)

- Para el ancho: la primera posición (b_1) se marcó a 0.1 veces el largo desde el borde superior de la pieza. La segunda posición (b_2) a 0.5 veces el largo (centro de la pieza) y la tercera posición (b_3) a la misma distancia que se marcó la primera (0.1 veces el largo) pero de abajo hacia arriba del borde opuesto. (Figura 10)
- Para el espesor: la primera posición (δ_1) se marcó en la intersección l_1 - b_1 . La segunda posición (δ_2) se marcó en la intersección l_3 - b_1 . La tercera posición (δ_3) se marcó en el centro (intersección l_2 - b_2). La cuarta posición (δ_4) se marcó en la intersección l_1 - b_3 . La quinta posición (δ_5) se marcó en la intersección l_3 - b_3 . (Figura 10)

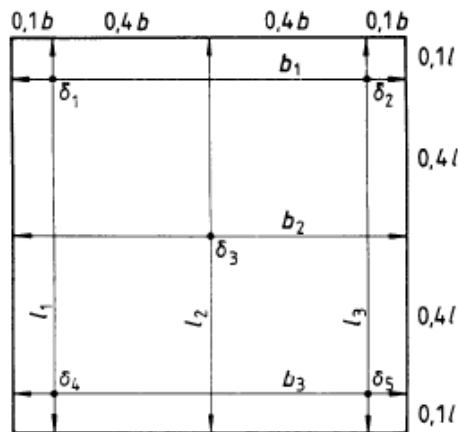


Figura 10. Posiciones para medir dimensiones.

Fuente: SS-ISO 2796

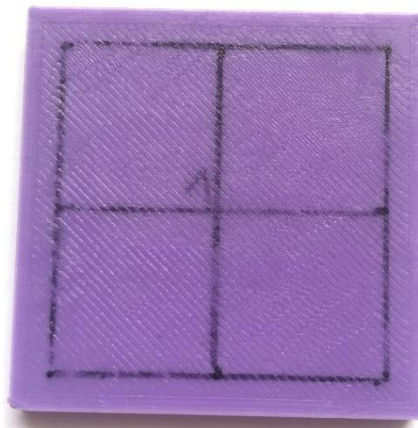


Figura 11. Muestra 1 marcada para medir.

6.3 Acondicionamiento de las muestras

Las muestras se sometieron a un ambiente de temperatura constante ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa menor a 90% ($70 \pm 5\%$). Esto se logró al colocarlas dentro de una cámara aislada para evitar la entrada o fuga de humedad o flujo de aire que modificara la temperatura. Esta cámara además se encontraba dentro de un cuarto donde se determinó, por mediciones previas, que la temperatura no variaba durante todo el día, debido a que no se encuentra cerca de ventanas, puertas o paredes que por transferencia de calor pudieran afectar la temperatura.

Para permitir que existiera flujo de aire libre alrededor de las muestras, debido a que estaban colocadas horizontalmente, se colocaron sobre una superficie metálica con agujeros. Las muestras además debían estar separadas entre sí por un mínimo de 25mm. (Ver Anexos)

6.4 Proceso de medición

Las dimensiones iniciales se midieron antes de introducirlas en el espacio acondicionado. Las demás dimensiones se midieron al cumplir su respectivo tiempo en el espacio acondicionado como se indica a continuación.

Prueba 1. En esta prueba los tiempos de medición de las dimensiones de cada muestra se realizaron según lo indicado por el SS-ISO:2796. Luego de las dimensiones iniciales (tomando este tiempo como las 0 horas), la primera medición se realizó a las 20 horas, la segunda medición a las 48 horas, la tercera medición a los 7 días y la última medición a los 28 días.

Prueba 2. Para esta prueba se necesitaba tener mayor cantidad de datos, por lo que las mediciones se realizaron 3 veces al día, cada 6 horas durante 2 semanas. El proceso de medición siguió siendo el mismo utilizado en la Prueba 1.

Para cada dimensión se midió con un calibrador vernier a partir de la norma ISO:1923. Sobre las marcas que tenía cada muestra, las cuales fueron realizadas en el proceso de rotulación. Luego se ingresó el valor en su celda correspondiente en la hoja de cálculo. En las siguientes figuras se muestra un ejemplo de cómo se midieron. (Ver en Anexos las mediciones restantes)

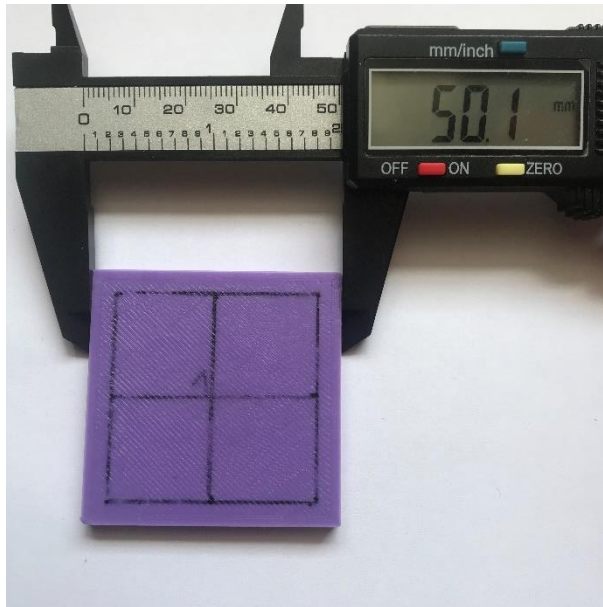


Figura 12. Muestra 1 medición de largo.



Figura 13. Muestra 1 medición de ancho.



Figura 14. Muestra 1 medición de espesor.

6.5 Archivo de cálculo en Excel

En un archivo de Excel se llevó el registro de los datos obtenidos en el proceso de medición. Con estos datos se obtuvieron los cálculos para determinar el cambio longitudinal, el porcentaje de cambio longitudinal y el cambio volumétrico en las muestras como se detalla a continuación:

6.5.1 Registro diario. En esta hoja se registró la temperatura, humedad relativa, fecha y hora de cada día durante el tiempo de acondicionamiento.

6.5.2 Promedio de medición. Luego de tener los datos para cada tiempo tanto para el largo como para el ancho y largo, se calculó el promedio que no fue más que la suma de los datos de ese tiempo dividido entre la cantidad de datos (3 para el largo y ancho y 5 para el espesor).

6.5.3 Porcentaje de cambio longitudinal. El porcentaje se calculó a partir de las dimensiones iniciales y finales en cada tiempo, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{Cambio Longitudinal (\%)} = \frac{(L_f - L_0)}{L_0} \times 100$$

donde

L_f = longitud final de la muestra, en mm.

L_0 = longitud inicial de la muestra, en mm. (ASTM International, 2012)

6.5.4 Porcentaje de cambio promedio. Este valor se obtuvo calculando el promedio del parámetro anterior por cada tiempo. Es decir, el promedio de las 12 muestras a las 20 horas, 48 horas, 7 días y 28 días, respectivamente.

6.5.5 Cambio dimensional. El cambio dimensional se calculó restando la medida de promedio de cada muestra a la medida inicial.

6.5.6 Volumen de cambio. Para calcular el volumen se multiplicaron las variaciones respectivas (el largo por el ancho por el espesor) de cada pieza en cada tiempo de medición, por lo tanto las unidades están en milímetros cúbicos (mm^3).

6.6 Análisis estadístico de resultados

6.6.1 Recuento de datos. Para analizar la Prueba 1 fueron necesarios 838 datos en los que se incluyen las mediciones de largo, ancho, y espesor. Además de los registros diarios de las condiciones del espacio donde estarían las muestras para realizar las pruebas. Para la Prueba 2 fueron necesarios 6,030 datos incluyendo mediciones en las 3 dimensiones de cada muestra y el registro de las condiciones del mismo espacio para las muestras.

6.6.2 Gráficas de los datos. En la Prueba 1 se graficaron los datos con gráficas de barras o columnas para mostrar el comportamiento de las 12 muestras en cada tiempo de medición. El eje horizontal contenía las muestras agrupadas, el cambio longitudinal fue la altura de las columnas y cada columna representó un tiempo de medición. Por otro lado, para la Prueba 2 fue necesario utilizar diagramas de dispersión por la cantidad de datos. El eje horizontal mostraba el tiempo en horas y los puntos representaban el valor promedio medido del largo, ancho, espesor o volumen de cada muestra.

6.6.3 Tablas de control. Las tablas de control se calcularon para todas las muestras en la Prueba 2, se definieron los límites superior e inferior calculando la desviación estándar y las regiones A, B, C. Para evaluar estos datos se buscaron señales que indicaran un comportamiento al que se le debía prestar atención para ver si se trataba de un dato atípico o un caso especial de variación.

6.6.4 ANOVA de parámetros de interés. Para la Prueba 1 y 2 se fue necesario obtener el ANOVA de un factor cuando solo se deseaba observar el impacto que tenía el tiempo en el cambio dimensional de las muestras. En otros casos cuando se deseaba observar la relación entre el comportamiento de las muestras y el tiempo fue necesario aplicar un ANOVA para 2 factores.

VII. Resultados

7.1 Diseño de muestras

Se obtuvo que el siguiente diseño definiría la geometría de las muestras, a partir del SS-ISO 2796 y Azhikannickal. Los principales parámetros seleccionados para la impresión de la pieza fueron:

- Altura de capa: 0.2 mm
- Altura de capa inicial: 0.27 mm
- Densidad de relleno: 50%
- Patrón de relleno: Líneas
- Temperatura de la boquilla: 200 °C
- Temperatura de la cama: 60°C

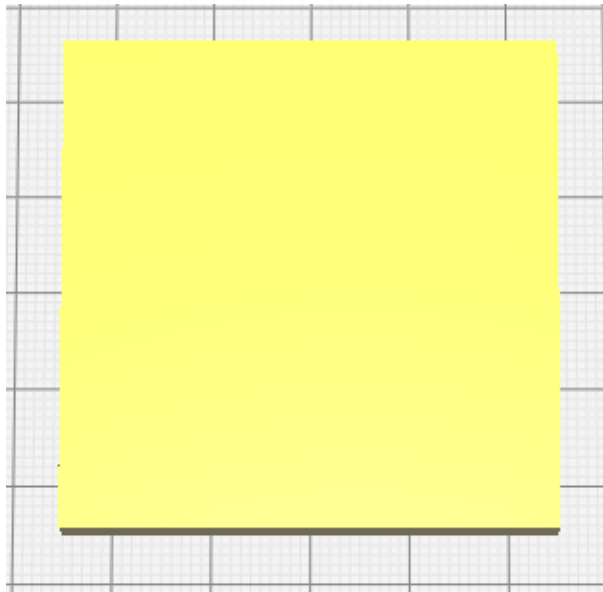


Figura 15. Diseño de la muestra con parámetros de impresión

7.2 Condiciones de espacio acondicionado

En la siguiente tabla se muestra el registro de la temperatura en °C y humedad relativa en porcentaje dentro del espacio acondicionado en el cual se encontraban las muestras durante la Prueba 1.



Figura 16. Las 12 muestras acondicionadas en el espacio controlado

Día	T (°C)	R.H (%)
7/08/2020	24	62
8/08/2020	24	62
9/08/2020	24	60
10/08/2020	24	60
11/08/2020	24	61
12/08/2020	24	60
13/08/2020	23	58
14/08/2020	23	60
15/08/2020	23	60
16/08/2020	23	57
17/08/2020	23	60
18/08/2020	23	62
19/08/2020	23	63
20/08/2020	23	62
21/08/2020	23	60
22/08/2020	23	64
23/08/2020	23	64
24/08/2020	23	61
25/08/2020	23	63
26/08/2020	23	65
27/08/2020	23	60
28/08/2020	23	63
29/08/2020	23	60
30/08/2020	23	62
31/08/2020	23	64
1/09/2020	23	63
2/09/2020	23	64
3/09/2020	23	63
4/09/2020	23	60

Tabla 1. Registro de espacio acondicionado en la Prueba 1.

En la siguiente tabla se muestra el registro de para la temperatura en °C y humedad relativa en porcentaje dentro del espacio acondicionando donde se encontraban las muestras.

Tiempo (Horas)	T (°C)	R.H (%)	Tiempo (Horas)	T (°C)	R.H (%)
0	24	69	180	23	68
6	24	67	192	23	68
12	23	69	198	23	67
24	23	69	204	23	67
30	23	69	216	23	67
36	23	68	222	23	67
48	23	67	228	23	67
54	23	70	240	23	67
60	23	67	246	23	67
72	23	67	252	23	67
78	23	67	264	23	67
84	23	67	270	23	67
96	23	67	276	23	67
102	23	67	288	23	67
108	23	69	294	23	67
120	23	69	300	23	67
126	23	69	312	23	67
132	23	69	318	23	67
144	23	69	324	23	67
150	23	68	336	23	67
156	23	68	342	23	67
168	23	68	348	23	67
174	23	68			

Tabla 2. Registro de espacio acondicionado cada 6 horas al día para la Prueba 2.

7.3 Porcentaje de cambio

Inicialmente se calculó el porcentaje de cambio para cada dirección (largo, ancho y espesor) de cada muestra en los tiempos determinados como se muestra en la siguiente tabla.

- Largo

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tiempo												
20h	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.03	-0.07	0.03	-0.05	-0.01	0.00	0.05
48h	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.11	0.00	-0.07	0.00	0.00	0.04
7 días	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.01	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
28 días	-0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.13	0.01	-0.04	-0.01	-0.01	0.05

Tabla 3. Mediciones porcentaje de cambio en el largo de cada muestra.

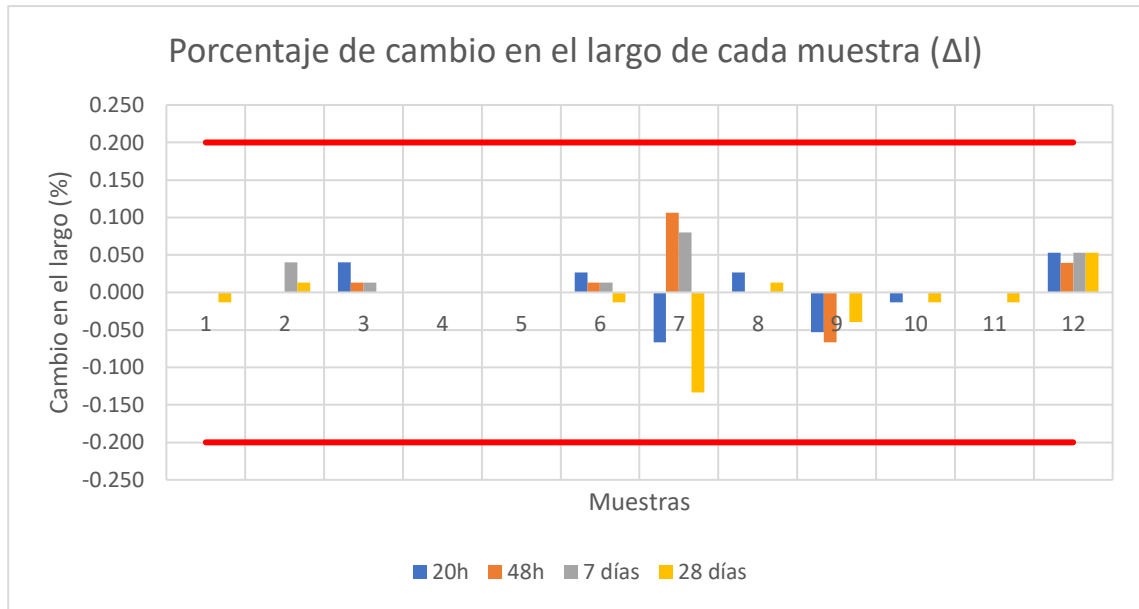


Figura 17. Gráfica de porcentaje de cambio en el largo.

En relación con el porcentaje de cambio en el largo se observa que las muestras 7, 9 y 12 tuvieron un cambio destacado. Aun así, ninguna muestra excede el 0.2% de cambio. La muestra 12 cambió dimensionalmente en todos los tiempos de medición en forma de expansión, mientras la muestra 9 se contrajo y la muestra 7 estuvo alternándose entre expansión y contracción. El resto de las muestra se comportó estable dimensionalmente.

- Ancho

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20h	0.00	0.05	0.00	-0.05	0.00	0.05	-0.01	-0.04	0.01	0.07	0.04	0.04
48h	0.00	0.05	0.04	-0.04	0.00	0.07	0.00	0.03	-0.01	0.09	0.04	0.04
7 días	0.01	0.05	0.04	0.05	0.00	0.05	-0.01	0.03	-0.01	0.11	0.08	0.04
28 días	0.00	0.05	0.04	0.01	-0.01	0.03	0.00	-0.01	0.00	-0.04	0.08	0.05

Tabla 4. Mediciones porcentaje de cambio en el ancho de cada muestra.

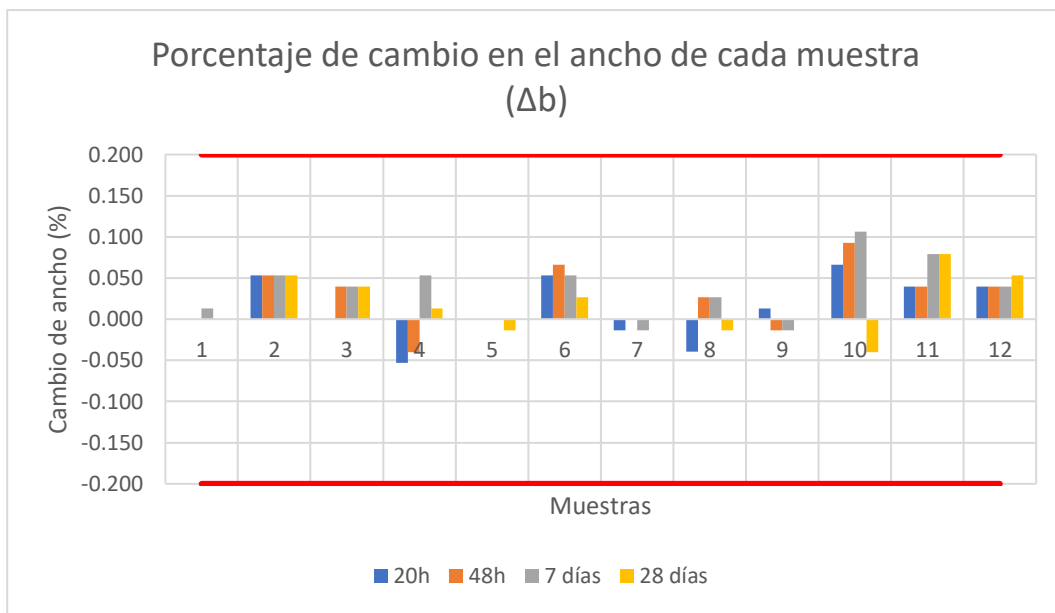


Figura 18. Gráfica de porcentaje de cambio en el ancho.

Con relación al porcentaje de cambio en el ancho se observa que las muestras 1, 5, 7 y 9 tuvieron un cambio menor a $\pm 0.03\%$. Aunque el resto de las muestra se comportó variable dimensionalmente, ninguna muestra excedió el 0.2% de cambio.

- Espesor

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20h	-1.06	0.08	-0.90	-0.90	-1.47	-0.98	-0.08	-0.90	-0.33	0.08	-1.33	-0.41
48h	-1.96	-0.08	-1.14	-1.07	-1.80	-0.81	-0.08	-1.47	-0.41	-0.08	-1.58	-1.22
7 días	-1.47	-0.33	-1.14	-0.98	-1.96	-0.73	-0.08	-0.24	-0.58	-0.08	-1.58	-1.14
28 días	-0.98	-0.08	-0.33	-1.07	-1.80	-0.29	-0.33	-0.33	-1.33	-0.90	-1.67	-1.22

Tabla 5. Mediciones porcentaje de cambio en el espesor de cada muestra.

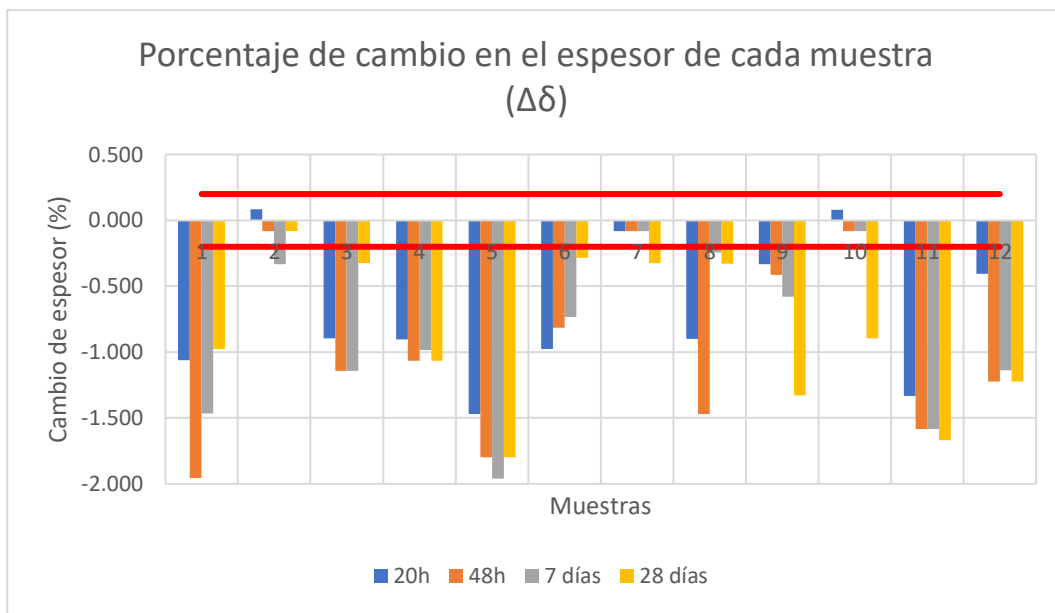


Figura 19. Gráfica de porcentaje de cambio de espesor.

En relación con el porcentaje de cambio en el espesor se observa que todas las muestras exceden el 0.2% de cambio. El comportamiento indica que todos los espesores se redujeron. Por lo que ninguna muestra se comportó estable dimensionalmente.

- Volumen

Tiempo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0h												
20h	-1.059	0.136	-0.857	-0.955	-1.471	-0.899	-0.161	-0.911	-0.372	0.134	-1.295	-0.315
48h	-0.906	-0.166	-0.233	-0.152	-0.332	0.165	0.187	-0.537	-0.123	-0.123	-0.254	-0.831
7d	0.512	-0.209	0.000	0.176	-0.166	0.069	-0.040	1.243	-0.100	0.013	0.040	0.096
28d	0.470	0.223	0.811	-0.123	0.153	0.398	-0.444	-0.108	-0.778	-0.972	-0.098	-0.069

Tabla 6. Volumen calculado de cada muestra

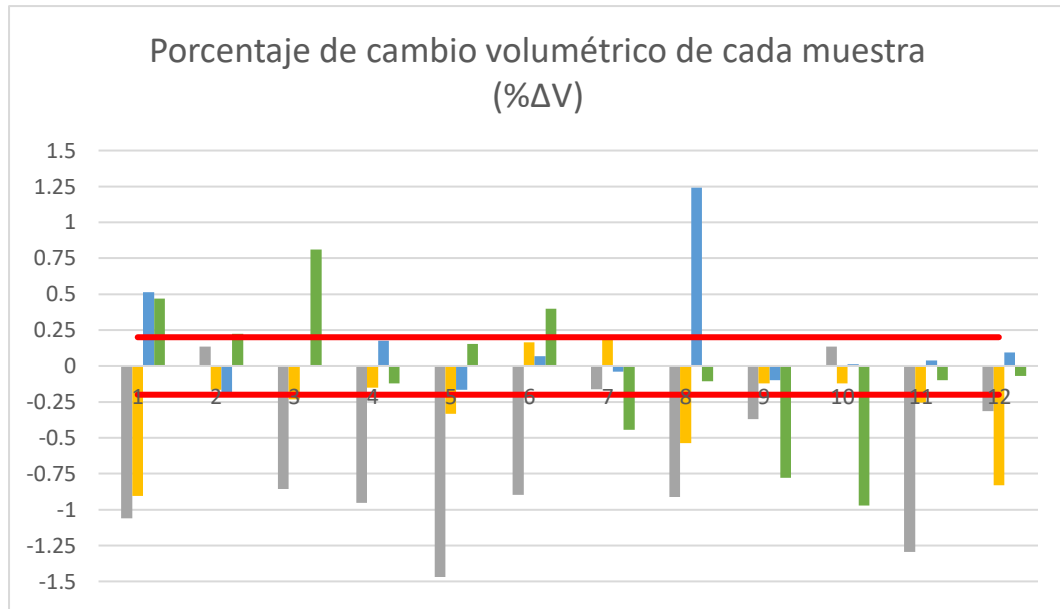


Figura 20. Gráfica de porcentaje de cambio volumétrico.

En relación con el porcentaje de cambio en volumen se observa que todas las muestras exceden al menos en algún tiempo de medición el 0.2% de cambio. Por lo que ninguna muestra se comportó estable dimensionalmente.

7.4 Porcentaje de cambio promedio

Tiempo	Δl (%)	Δb (%)	$\Delta \delta$ (%)	ΔV (%)
20h	0.001	0.013	-0.683	-0.669
48h	0.009	0.025	-0.976	-0.275
7 días	0.017	0.036	-0.861	0.136
28 días	-0.012	0.017	-0.858	-0.045

Tabla 7. Resumen porcentaje de cambio promedio

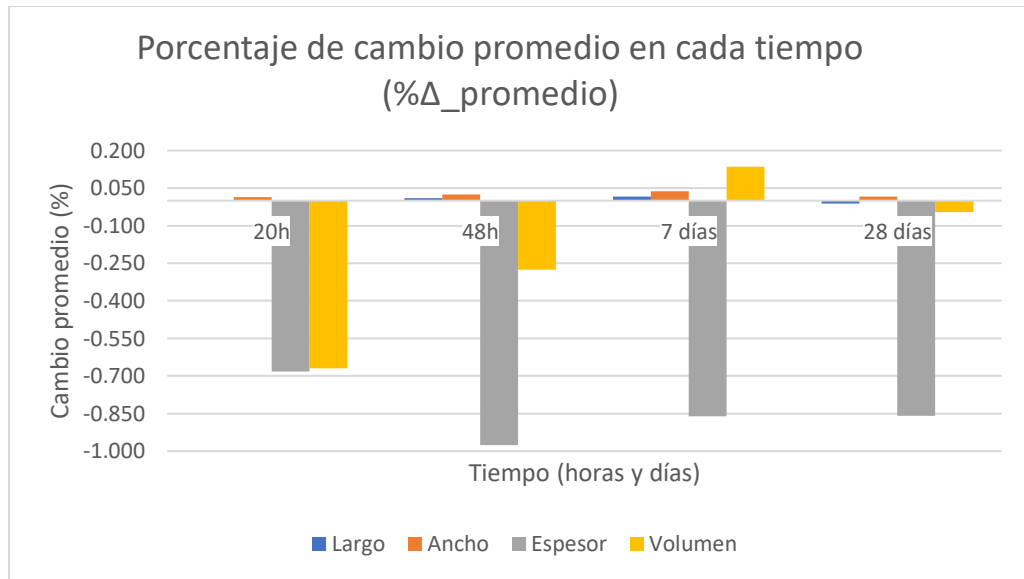


Figura 21. Gráfica de porcentaje de cambio promedio.

Para el cambio porcentual promedio se puede observar que el momento en que mayor variación de volumen hubo fue a las 48 horas, mientras que la mayor variación de espesor se produjo a las 20 horas. Para este cálculo promedio únicamente se pueden considerar al largo y ancho como estables dimensionalmente al no exceder el 0.2% de cambio.

7.5 Impacto del tiempo en las muestras

A continuación se intentó determinar si el tiempo era un factor importante en la estabilidad dimensional en cada una de las dimensiones (largo, ancho y espesor). Para esto, se calculó el análisis de varianza (ANOVA) de cada dimensión donde los grupos son los períodos de medición. Por lo que a continuación se presenta el ANOVA de cada una.

- Largo

LARGO
RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
20h	0.000555556	0.00030269
48h	0.004444444	0.00038249
7 días	0.013333333	0.00060606
28 días	-0.001666667	0.00084949

LARGO
ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.001574074	3	0.000524691	0.98039216	0.41067206	2.816465817
Dentro de los grupos	0.023548148	44	0.000535185			
Total	0.025122222	47				

Tabla 8. ANOVA del largo de las muestras ($\alpha=0.05$).

El valor F no supera el valor crítico para F de aproximadamente 2.816. Las medias poblacionales de los largos de las muestras de PLA son iguales a lo largo del tiempo.

- Ancho

ANCHO
RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
20h	0.010555556	0.00077138
48h	0.015555556	0.00064916
7 días	0.023333333	0.00065051
28 días	0.008333333	0.0003

ANCHO
ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.001592593	3	0.000530864	0.89557891	0.45102035	2.816465817
Dentro de los grupos	0.026081481	44	0.000592761			
Total	0.027674074	47				

Tabla 9. ANOVA del ancho de las muestras ($\alpha=0.05$).

El valor F no supera el valor crítico para F de aproximadamente 2.816. Las medias poblacionales de los anchos de las muestras de PLA son iguales a lo largo del tiempo.

- Espesor

ESPESOR
RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
20h	-0.033333333	0.00067879
48h	-0.047666667	0.00110388
7 días	-0.042	0.00091782
28 días	-0.041833333	0.0007967

ESPESOR
ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.001256917	3	0.000418972	0.47921126	0.69839446	2.816465817
Dentro de los grupos	0.038469	44	0.000874295			
Total	0.039725917	47				

Tabla 10. ANOVA del espesor de las muestras ($\alpha=0.05$).

El valor F no supera el valor crítico para F de aproximadamente 2.816. Las medias poblacionales de los espesores de las muestras de PLA son iguales a lo largo del tiempo.

- Volumen

VOLUMEN
RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
20h	12249.889	12118.2443
48h	12216.1007	12626.973
7d	12232.6877	14229.6689
28d	12227.0931	14636.0421

VOLUMEN
ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>n de las variac</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	7153.32152	3	2384.44051	0.17790705	0.91080773	2.81646582
Dentro de los	589720.211	44	13402.7321			
Total	596873.533	47				

Tabla 11. ANOVA del volumen de las muestras ($\alpha=0.05$).

El valor F no supera el valor crítico para F de aproximadamente 2.816. Las medias poblacionales de los volúmenes de las muestras de PLA son iguales a lo largo del tiempo.

7.6 Prueba 2

Sin embargo, se profundizó en el tema y se aplicó una segunda prueba, realizando 3 mediciones diarias durante dos semanas. Debido a que no era conveniente graficar 45 columnas por cada muestra para observar el comportamiento de los datos, se graficó el cambio promedio en cada tiempo de medición para el largo, ancho, espesor y volumen.

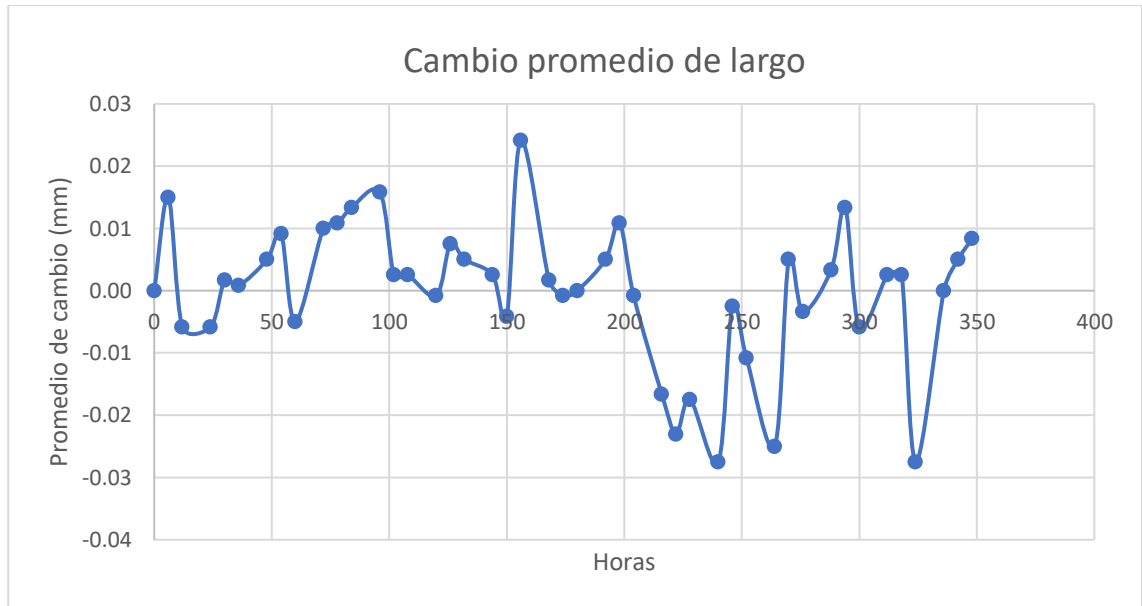


Figura 22. Gráfica de cambio promedio de largo.

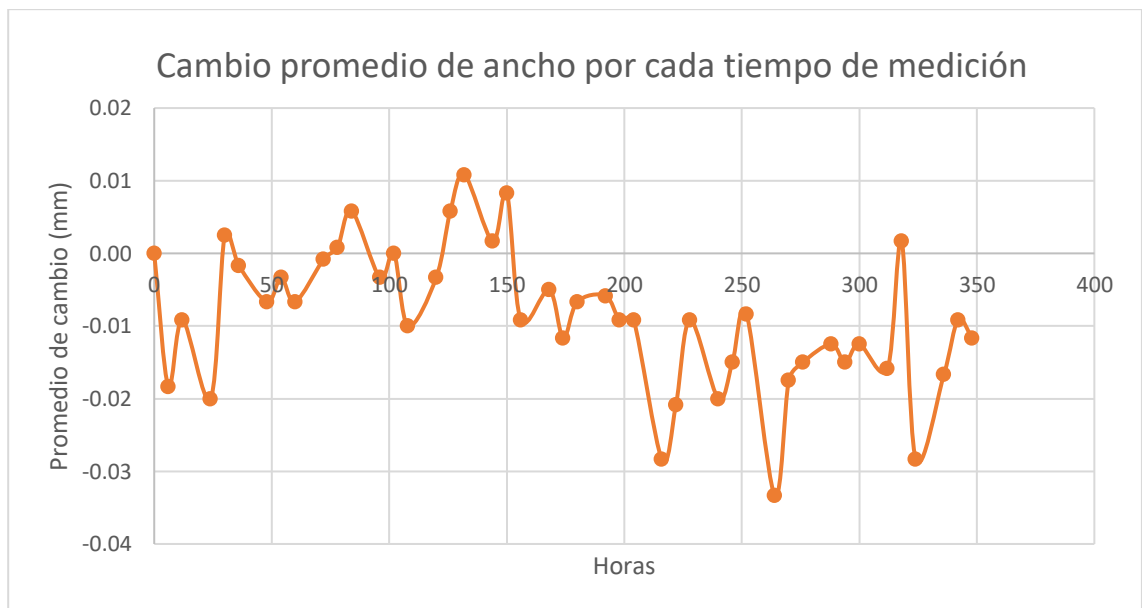


Figura 23. Gráfica de cambio promedio de ancho.

De las gráficas de largo y ancho se observa un comportamiento similar: disminución dimensional en las primeras 24 horas, aumento variable hasta las 100 horas, otra disminución entre las 150 y 222 horas. Por último un ligero aumento dimensional seguido de un pico de disminución.

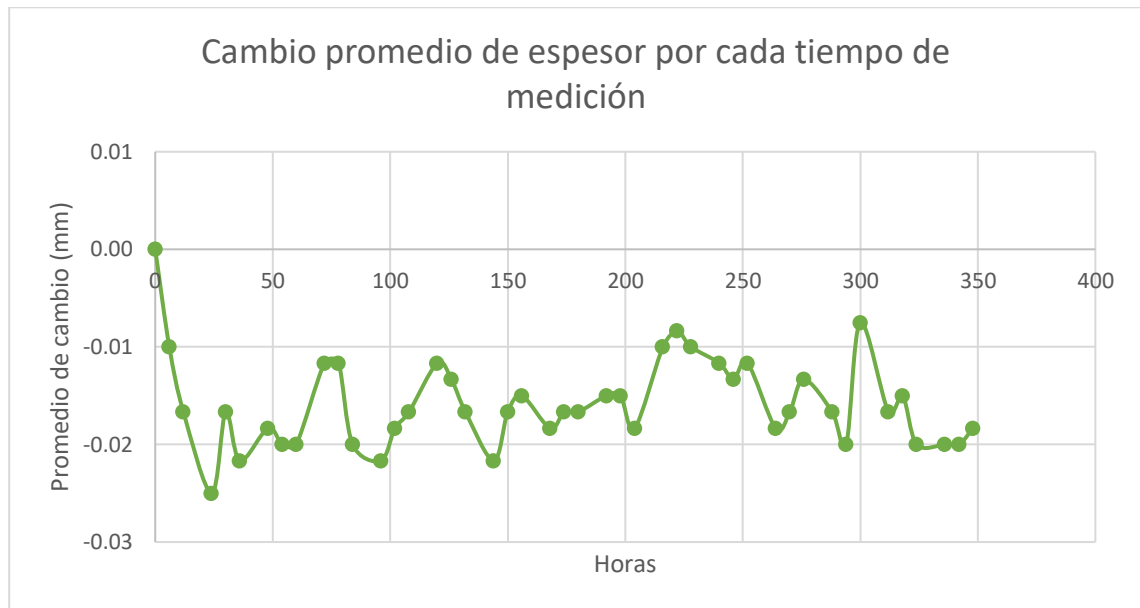


Figura 24. Gráfica de cambio promedio de espesor.

En las figuras 22 y 23, se observa un comportamiento variable en el promedio de las muestras con relación a las dimensiones iniciales, es decir, en determinado momento las dimensiones habían aumentado en relación a las iniciales y en otro momento disminuían. El espesor, por otro lado, presenta una variación únicamente de disminución y en ningún momento regresa a la dimensión inicial.

7.7 Tablas de control

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis que permitiera analizar las 3 dimensiones anteriores de forma unificada, por lo que dichas dimensiones se multiplicaron. Por lo tanto, se presentan como volúmenes en tablas de control, donde sus límites (superior e inferior) están definidos como ± 3 veces la desviación estándar (3σ).

A continuación se presenta el análisis de cada muestra donde la hoja de cálculo resaltaba los datos que tenían un comportamiento especial. Este comportamiento especial conocido como “señal” del proceso se colocó como “retenido” para graficar la tabla de control sin tomar en cuenta estos puntos y observar que significaba la señal. A partir de este procedimiento se puede observar de mejor manera el comportamiento de cada muestra.

Es importante aclarar que únicamente para la muestra 1 se presentan ambas gráficas (antes: Figura 25 y después de filtrar las señales: Figura 26), aunque el procedimiento se llevó a cabo de la misma manera para todas las muestras. Las gráficas mostradas a continuación de la muestra 2 a la 12 representan únicamente el comportamiento luego de filtrar las señales en cada una. (Ver gráficas sin filtro en Anexos)

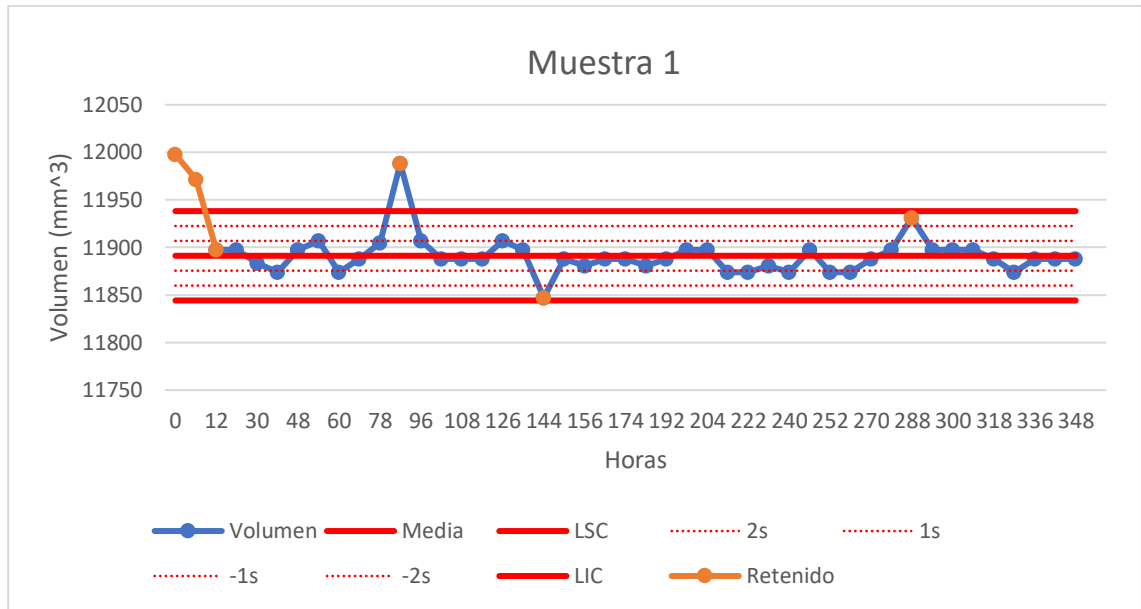


Figura 25. Tabla de control Muestra 1: Volumen 6 horas al día.

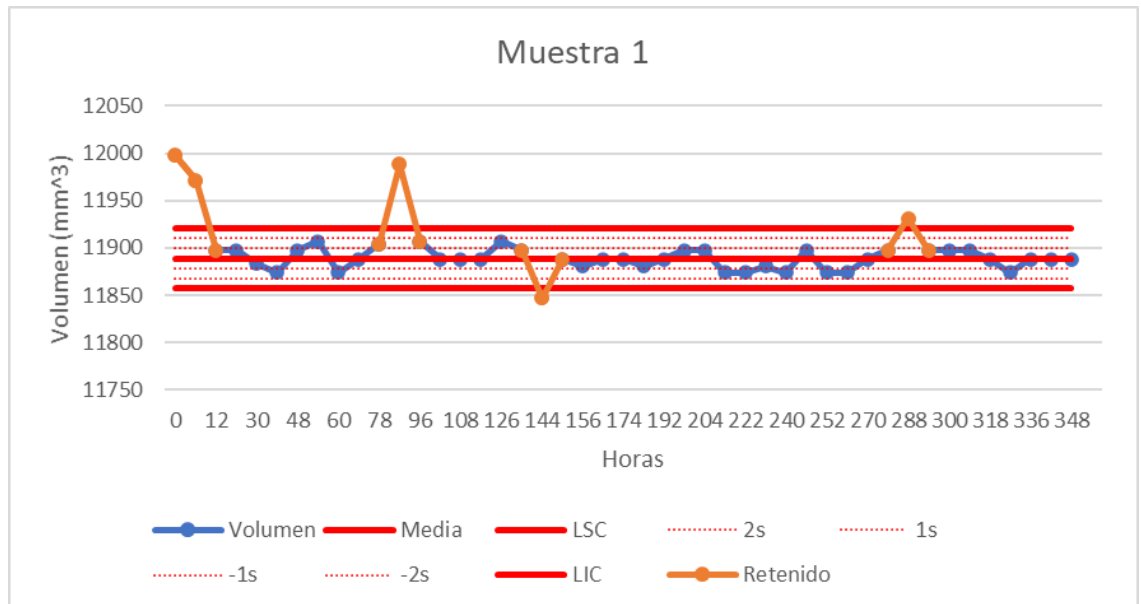


Figura 26. Tabla de control Muestra 1: Datos retenidos.

Media	LSC	2s	1s	-1s	-2s	LIC
11888.90	11920.69	11910.09	11899.50	11878.30	11867.70	11857.10

Tabla 12. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 1.

Para la muestra 1, en las primeras 24 horas se observa una disminución de volumen cercana a 100 mm^3 . Se pueden observar 4 puntos fuera de la región de control y otros 7 puntos en naranja marcados como “retenidos” por la presencia de una señal.

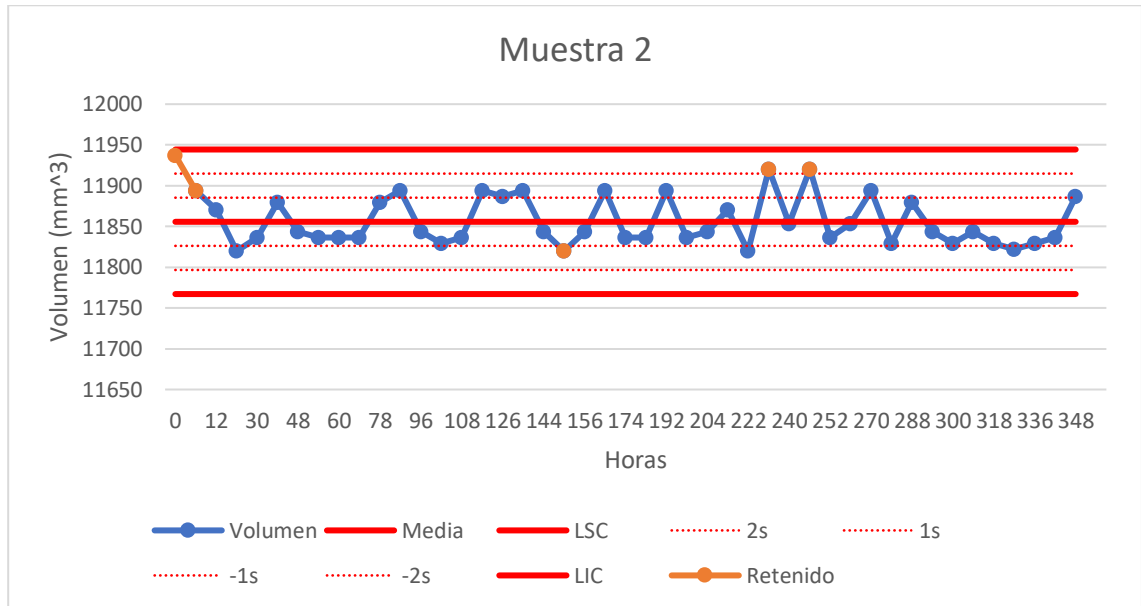


Figura 27. Tabla de control Muestra 2: Datos retenidos.

Media	LSC	2s	1s	-1s	-2s	LIC
11851.98	11927.86	11902.57	11877.27	11826.68	11801.39	11776.10

Tabla 13. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 2.

Para la muestra 2, en las primeras 24 horas se observa una disminución de volumen cercana a 110 mm^3 . Ningún punto se encuentra fuera de la región de control y 5 puntos en naranja marcados como “retenidos” por la presencia de una señal.

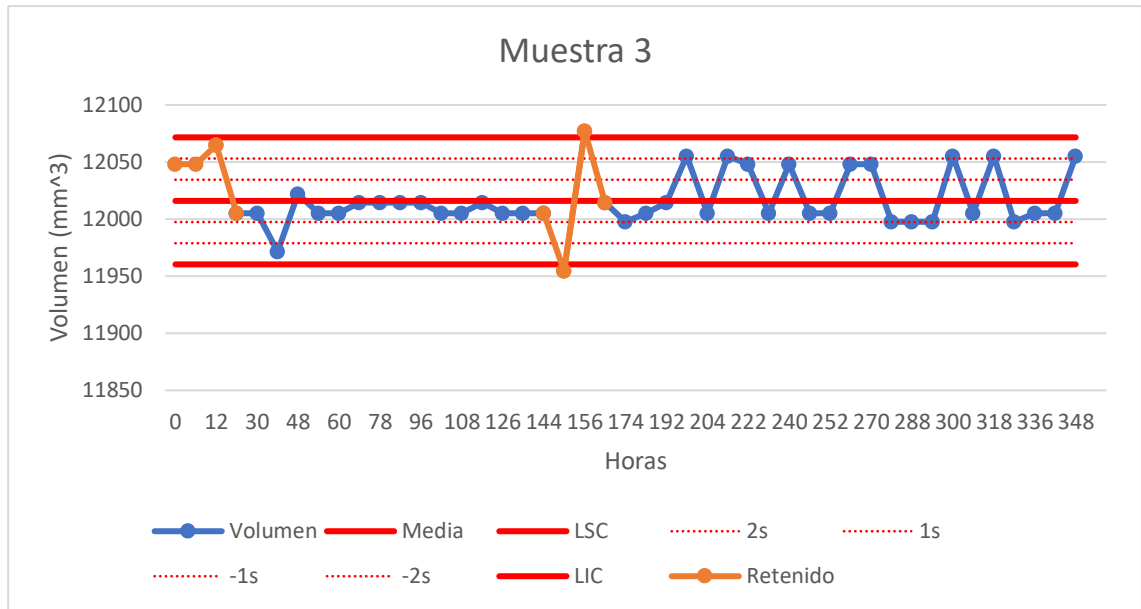


Figura 28. Tabla de control Muestra 3: Datos retenidos.

Media	LSC	2s	1s	-1s	-2s	LIC
12015.97	12071.61	12053.06	12034.52	11997.43	11978.88	11960.33

Tabla 14. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 3.

Para la muestra 3, en las primeras 36 horas se observa una disminución de volumen cercana a 90 mm^3 . Se pueden observar 2 puntos fuera de la región de control y otros 3 puntos en naranja marcados como “retenidos” por la presencia de una señal.

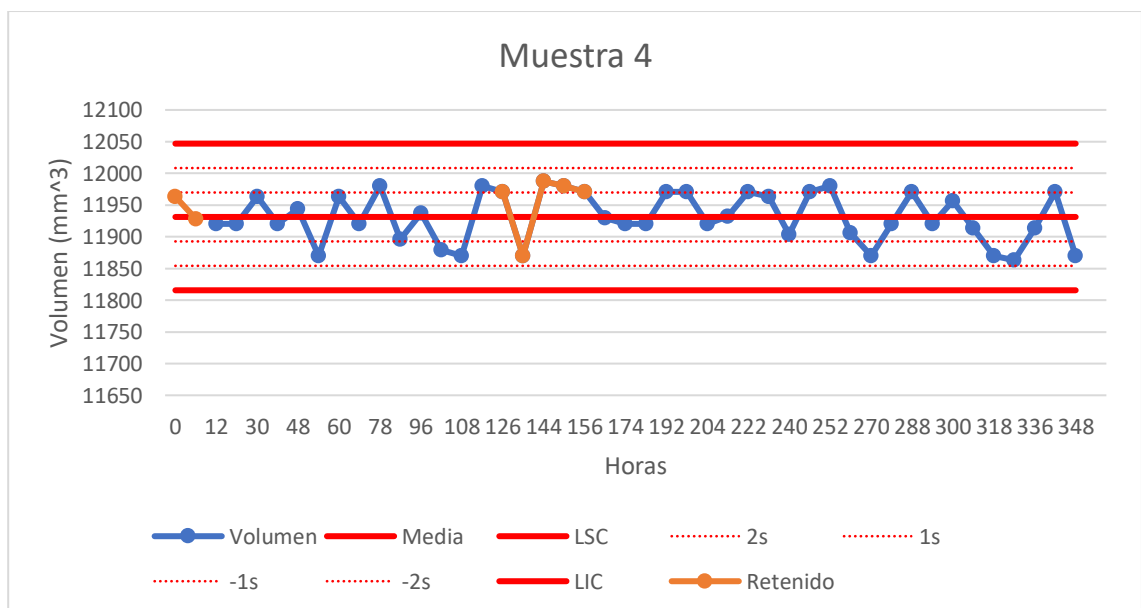


Figura 29. Tabla de control Muestra 4: Datos retenidos.

Media	LSC	2s	1s	-1s	-2s	LIC
11928.02	12042.00	12004.01	11966.02	11890.03	11852.04	11814.05

Tabla 15. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 4.

Para la muestra 4, en las primeras 24 horas se observa una disminución mínima de volumen cercana a 32 mm^3 . Hay 7 puntos en naranja marcados como “retenidos” por la presencia de una señal.

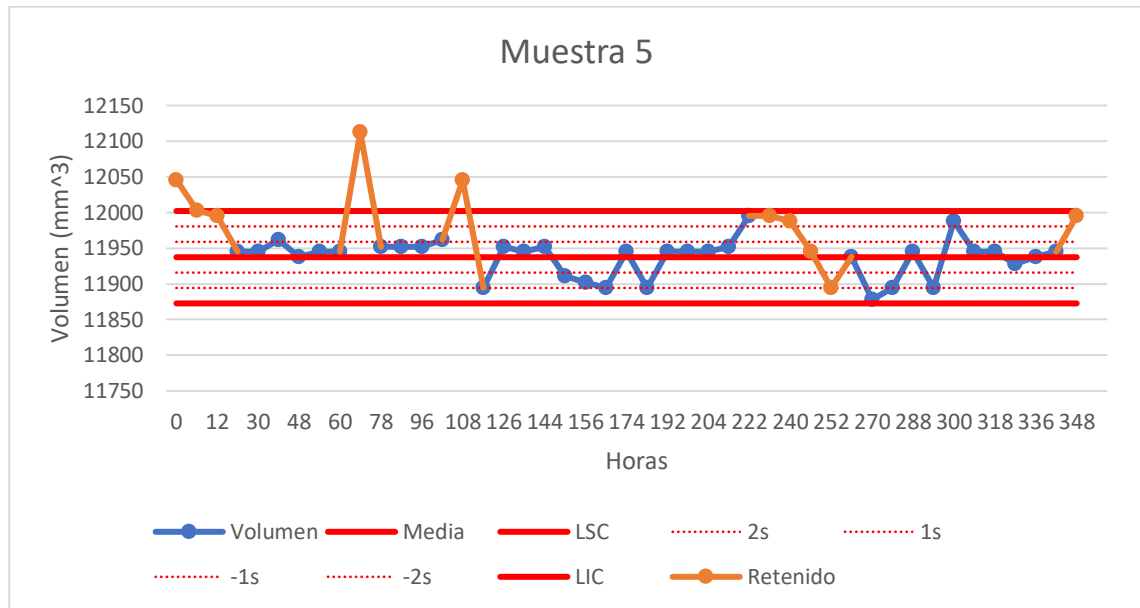


Figura 30. Tabla de control Muestra 5: Datos retenidos.

Media	LSC	2s	1s	-1s	-2s	LIC
11937.40	12002.13	11980.55	11958.97	11915.82	11894.24	11872.66

Tabla 16. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 5.

Para la muestra 5, en las primeras 24 horas se observa una disminución de volumen cercana a 100 mm^3 . Se pueden observar 3 puntos fuera de la región de control y otros 7 puntos en naranja marcados como “retenidos” por la presencia de una señal.

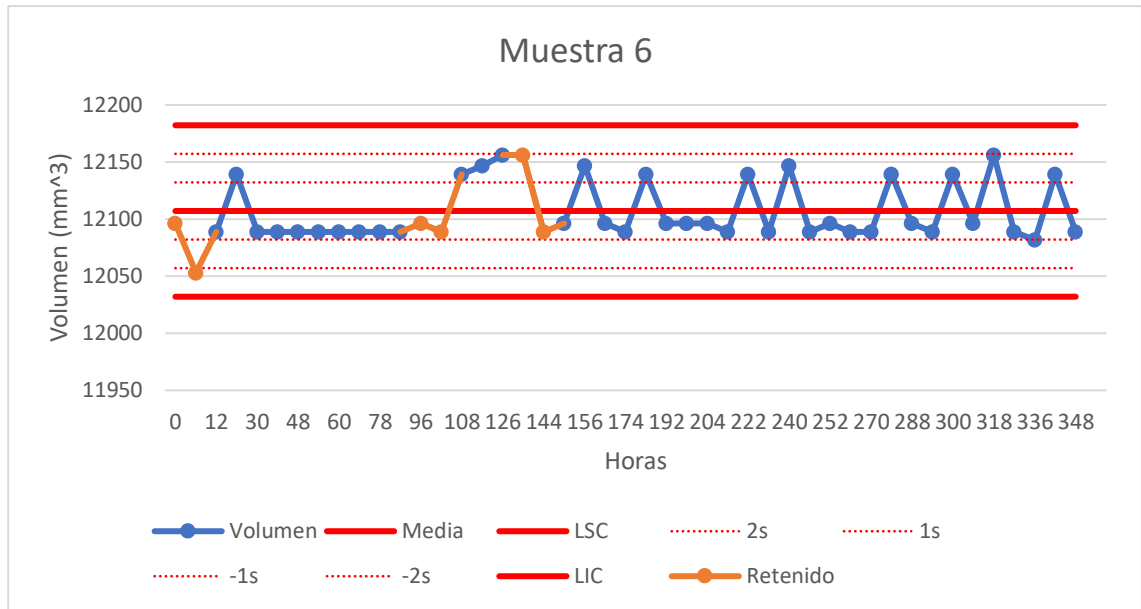


Figura 31. Tabla de control Muestra 6: Datos retenidos.

Media	LSC	2s	1s	-1s	-2s	LIC
12107.12	12182.21	12157.18	12132.15	12082.09	12057.06	12032.03

Tabla 17. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 6.

Para la muestra 6, en las primeras 6 horas se observa una disminución de volumen cercana a 44 mm^3 . Ningún punto está fuera de la región de control aunque si hay 6 puntos en naranja marcados como “retenidos” por la presencia de una señal.

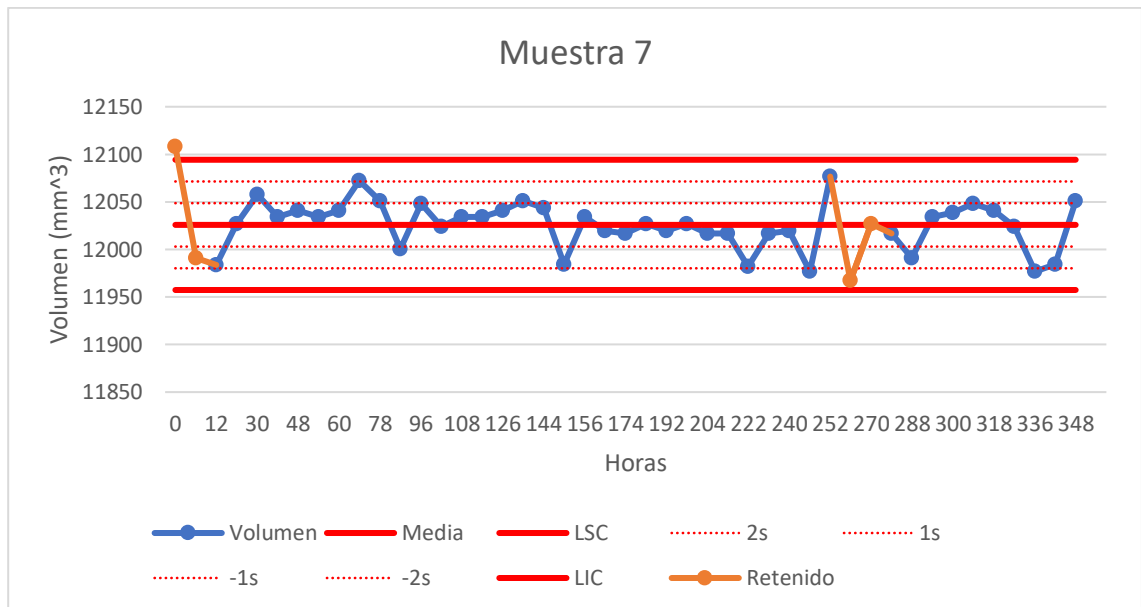


Figura 32. Tabla de control Muestra 7: Datos retenidos.

Media	LSC	2s	1s	-1s	-2s	LIC
12025.80	12094.27	12071.44	12048.62	12002.98	11980.15	11957.33

Tabla 18. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 7.

Para la muestra 7, en las primeras 12 horas se observa una disminución de volumen cercana a 125 mm^3 . Se puede observar 1 punto fuera de la región de control y otros 3 puntos en naranja marcados como “retenidos” por la presencia de una señal.

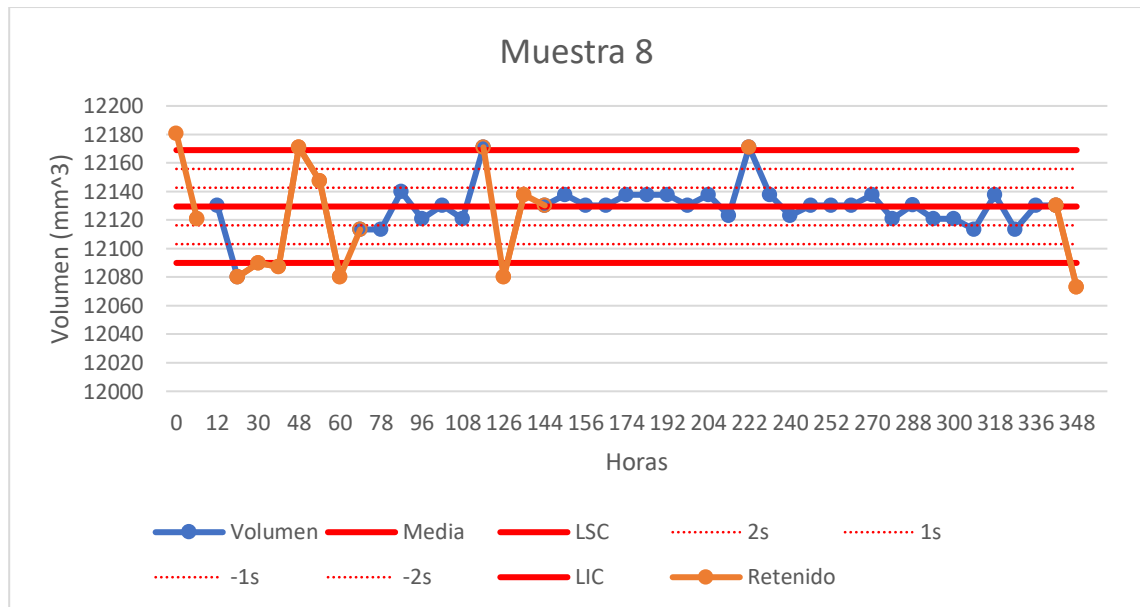


Figura 33. Tabla de control Muestra 8: Datos retenidos.

Media	LSC	2s	1s	-1s	-2s	LIC
12129.51	12169.03	12155.86	12142.68	12116.33	12103.16	12089.98

Tabla 19. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 8.

Para la muestra 8, en las primeras 24 horas se observa una disminución de volumen cercana a 100 mm^3 . Se pueden observar 10 puntos fuera de la región de control y otros 4 puntos en naranja marcados como “retenidos” por la presencia de una señal.

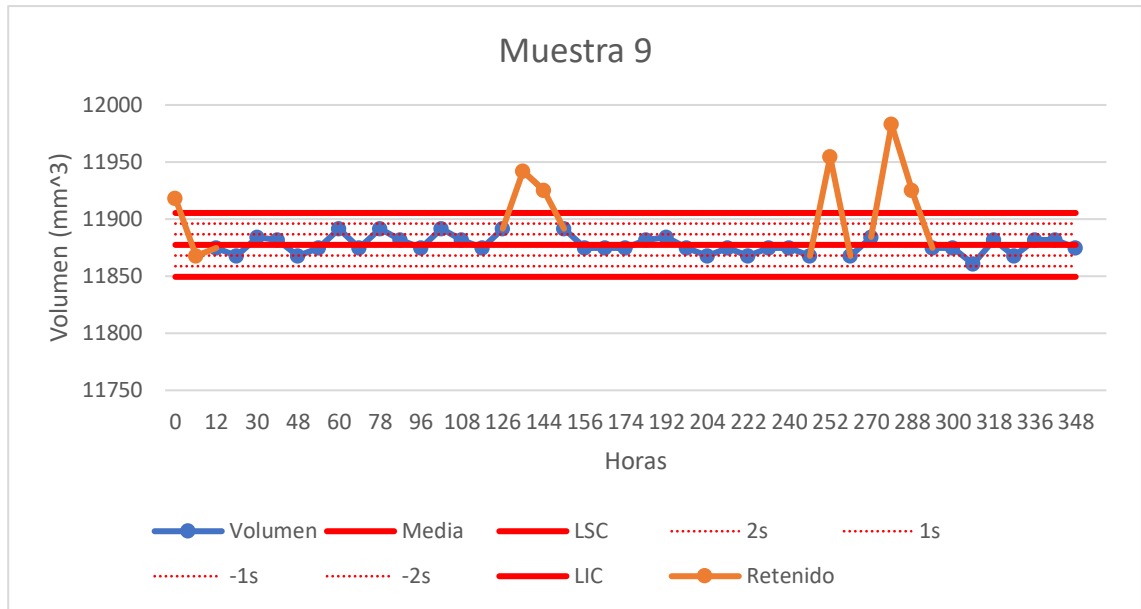


Figura 34. Tabla de control Muestra 9: Datos retenidos.

Media	LSC	2s	1s	-1s	-2s	LIC
11877.40	11905.39	11896.06	11886.73	11868.08	11858.75	11849.42

Tabla 20. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 9.

Para la muestra 9, en las primeras 6 horas se observa una disminución de volumen cercana a 44 mm³. Se pueden observar 6 puntos fuera de la región de control y un punto en naranja marcado como “retenido” por la presencia de una señal.

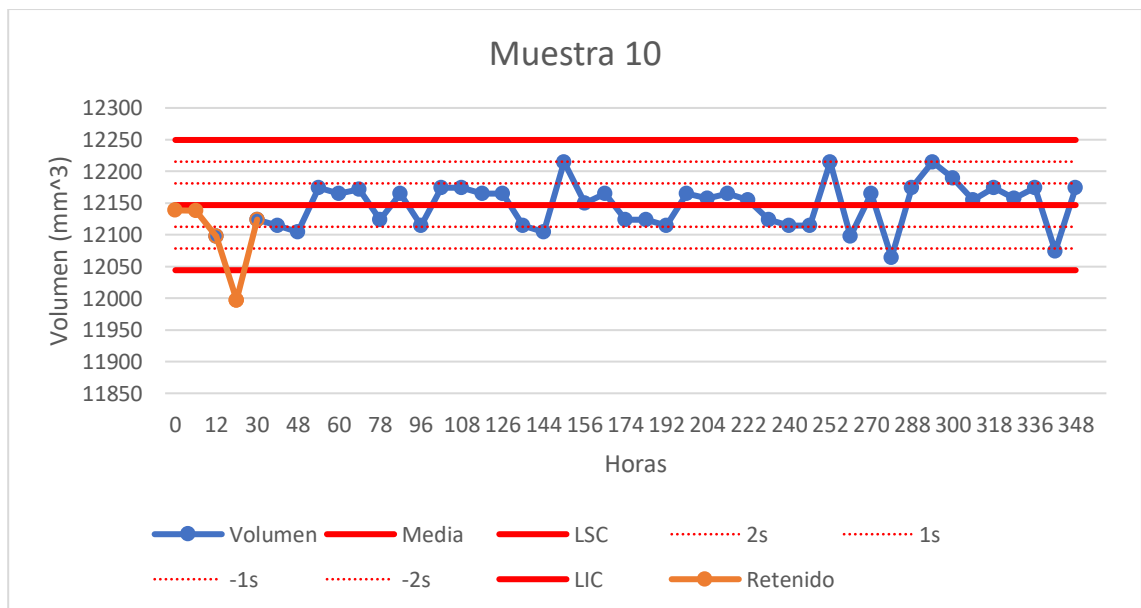


Figura 35. Tabla de control Muestra 10: Datos retenidos.

Media	LSC	2s	1s	-1s	-2s	LIC
12146.80	12249.49	12215.26	12181.03	12112.57	12078.34	12044.11

Tabla 21. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 10.

Para la muestra 10, en las primeras 24 horas se observa una disminución de volumen cercana a 140 mm^3 . Se puede observar 1 punto fuera de la región de control y 2 puntos en naranja marcados como “retenidos” por la presencia de una señal.

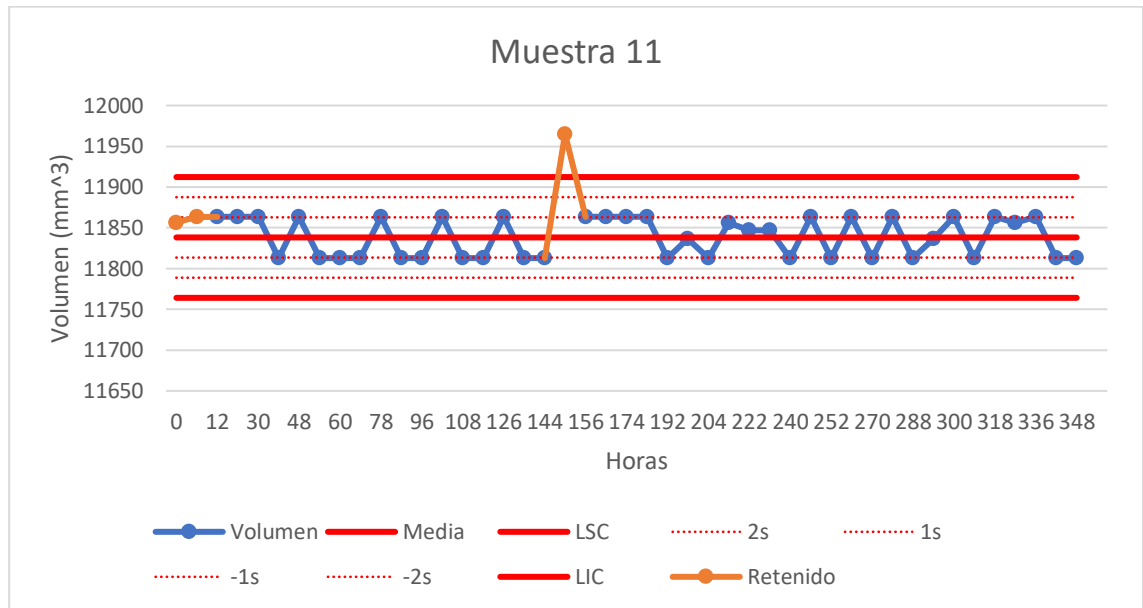


Figura 36. Tabla de control Muestra 11: Datos retenidos.

Media	LSC	2s	1s	-1s	-2s	LIC
11838.22	11912.29	11887.60	11862.91	11813.53	11788.85	11764.16

Tabla 22. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 11.

Para la muestra 11, en las primeras 30 horas se observa un volumen constante. Se puede observar 1 punto fuera de la región de control y 2 puntos en naranja marcados como “retenidos” por la presencia de una señal.

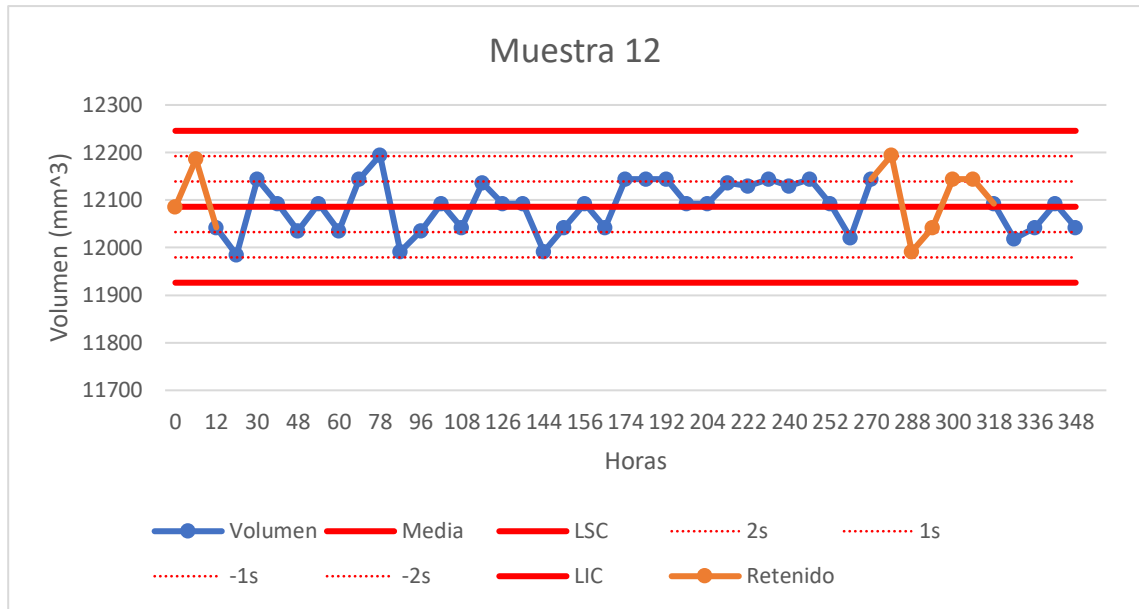


Figura 37. Tabla de control Muestra 12: Datos retenidos.

Media	LSC	2s	1s	-1s	-2s	LIC
12085.94	12245.59	12192.37	12139.16	12032.72	11979.50	11926.28

Tabla 23. Media, regiones y límites del volumen de la muestra 12.

Para la muestra 12, en las primeras 24 horas se observa una disminución de volumen cercana a 100 mm^3 . Ningún punto se encuentra dentro de la región de control pero hay 7 puntos en naranja marcados como “retenidos” por la presencia de una señal.

A continuación se muestra una tabla resumiendo los datos calculados para cada muestra: media, límite superior e inferior de control y los respectivos factores de desviación estándar.

Muestra	Media	LSC	2s	1s	-1s	-2s	LIC
1	11888.90	11920.69	11910.09	11899.50	11878.30	11867.70	11857.10
2	11851.98	11927.86	11902.57	11877.27	11826.68	11801.39	11776.10
3	12015.97	12071.61	12053.06	12034.52	11997.43	11978.88	11960.33
4	11928.02	12042.00	12004.01	11966.02	11890.03	11852.04	11814.05
5	11937.40	12002.13	11980.55	11958.97	11915.82	11894.24	11872.66
6	12107.12	12182.21	12157.18	12132.15	12082.09	12057.06	12032.03
7	12025.80	12094.27	12071.44	12048.62	12002.98	11980.15	11957.33
8	12129.51	12169.03	12155.86	12142.68	12116.33	12103.16	12089.98
9	11877.40	11905.39	11896.06	11886.73	11868.08	11858.75	11849.42
10	12146.80	12249.49	12215.26	12181.03	12112.57	12078.34	12044.11
11	11838.22	11912.29	11887.60	11862.91	11813.53	11788.85	11764.16
12	12085.94	12245.59	12192.37	12139.16	12032.72	11979.50	11926.28

Tabla 24. Resumen de medias y límites de las 12 muestras.

7.8 Comportamiento según el color de las muestras

Como último análisis se intentó determinar si había relación entre el color del material de impresión y el comportamiento de la muestra. Para esto, se calculó ANOVA en general para ver la relación entre los grupos (muestras) y otro ANOVA para los grupos de color verde y morado.

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	11895.3721	779.452301
2	11857.528	962.718695
3	12018.479	662.716778
4	11931.8917	1461.07042
5	11951.7689	1993.99378
6	12105.7059	692.049311
7	12025.5725	821.908303
8	12126.6749	544.027044
9	11885.7248	609.370079
10	12143.0917	1728.50093
11	11842.0095	917.350229
12	12090.0927	3229.47782

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	5927077.52	11	538825.229	448.938853	1.058E-259	1.80678515
Dentro de los	633715.97	528	1200.21964			
Total	6560793.49	539				

Tabla 25. ANOVA para el volumen de todas las muestras de PLA ($\alpha=0.05$).

Con un 95% de confianza se obtuvo que las medias del volumen de todas las muestras de varían entre sí.

Color Morado

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Horas	56870.5266	44	1292.51197	1.50674837	0.03965974	1.46872203
Muestras	639604.523	3	213201.508	248.540077	4.2609E-54	2.67321783
Error	113231.634	132	857.815409			
Total	809706.684	179				

Tabla 26. ANOVA para PLA morado ($\alpha=0.05$)

Con un 95% de confianza se obtuvo que las medias del volumen de las muestras de color morado varían entre sí y entre cada tiempo de medición.

Color Verde

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Horas	46109.7143	44	1047.94805	1.25206329	0.15647242	1.44550382
Muestras	2023241	4	505810.25	604.329998	1.274E-101	2.42299095
Error	147307.935	176	836.976903			
Total	2216658.65	224				

Tabla 27. ANOVA para PLA verde ($\alpha=0.05$)

Con un 95% de confianza se obtuvo que las muestras de color verde varían entre sí, pero la media del comportamiento entre cada hora es igual.

VIII. Análisis de resultados

8.1 Porcentaje cambio promedio

El porcentaje de cambio para el largo y el ancho de las muestras no sobrepasó el 0.2% por el lado de contracción ni por el lado de expansión, pero si en el espesor. Se pudo observar incluso que el mayor cambio porcentual fue una contracción de casi el 2%. A pesar de que la muestra 2 y 7 presentaron el cambio menor, aun así, fue mayor a ese 2%. Esto se puede deber a que el espesor en comparación con las otras dimensiones es pequeño, por lo que al ocupar más área el largo y el ancho presentaron mejor estabilidad que terminó derivándose en la dimensión pequeña que fue la afectada. Este comportamiento permite identificar de forma evidente en las muestras 1, 5, 8 y 9 donde el cambio dimensional fue mínimo en el largo y ancho pero sus espesores fueron los de más variables. Cuando se daba el caso en que cualquiera de las dos dimensiones grandes (largo o ancho) experimentaban un cambio dimensional mayor al 0.05%, por lo menos en 3 tiempos de medición el cambio porcentual del espesor no excedió el 0.5% de contracción.

En cuanto al volumen, el comportamiento anterior se ve reflejado en que el espesor, por tener el mayor cambio porcentual de las 3 dimensiones, influyó en las proporciones totales de las piezas por lo que se pudo observar que las muestras 1, 5 y 8 presentaron el mayor cambio porcentual de volumen. Por lo que el espesor afecta directamente la estabilidad dimensional de la pieza.

8.2 Tiempo no fue significativo en la Prueba 1

Basado en el estudio realizado por medio del estándar SS-ISO 2796 no fue posible determinar a profundidad si el tiempo tenía efecto sobre las piezas ya que aunque eran pocos datos tenían una variación significativa entre sí. La probabilidad de que las medias entre los grupos (Tiempos de medición) no fueran iguales en alguna de las 3 dimensiones fue alta para las 3. Por esta razón se decidió realizar una segunda prueba donde el intervalo de medición fue diario para poder concluir sobre el efecto del tiempo en las dimensiones de las piezas.

8.3 Cambios promedio Prueba 2

En las gráficas de cambio promedio de cada una de las 3 dimensiones se pudo observar tendían a un comportamiento similar. Este comportamiento indicaba que durante las primeras horas en que las muestras estaban dentro del espacio acondicionado, las 3 dimensiones disminuyeron hasta un cierto valor. Por este comportamiento se puede decir que mientras las muestras estaban a temperatura ambiente tenían una dimensión en particular y al introducirlas en el espacio acondicionado, estas dimensiones se redujeron a

manera que se iban adaptando a las condiciones de temperatura y humedad de dicho espacio.

Se multiplicaron las variaciones respectivas para obtener el volumen de cada muestra y determinar la influencia del tiempo para cada una de estas. Por lo que dichos volúmenes se presentaron en tablas de control.

Cuando se graficó el volumen se tuvo que seleccionar varios puntos que estaban marcados por indicar alguna señal, para no tomarlos en cuenta al momento de graficar los límites superior e inferior para el comportamiento de cada pieza en particular. Al hacerlo, disminuía la desviación de los datos, por consiguiente los límites se encontraban más cercanos entre sí y se pudo apreciar una región donde el comportamiento de cada pieza era más constante.

Cuando un dato presentaba una variación de forma súbita podría estarse indicando que alguna de las 3 dimensiones que definían este punto estaba influenciada por: errores propios de medición y al calcular el volumen se produjo esta marcada variación o por el efecto de que la temperatura (o humedad relativa) hubiera cambiado. Esta última opción siendo la menos probable ya que el registro de temperatura y humedad relativa se llevó a cabo cuidadosamente y se hubiera reportado en el registro.

Al comparar la Prueba 1 con la Prueba 2 en cuanto al comportamiento dimensional, es evidente que en ambas pruebas la mayoría de las piezas tenían un decaimiento dimensional por lo menos en las primeras 24 horas. Por lo que se puede afirmar que las piezas al estar en un espacio de condiciones constantes tienden a acomodarse, una vez llegan a este punto el único parámetro que llega a afectar la estabilidad dimensional de las piezas es el tiempo (lo que en inglés se conoce como *ageing*).

8.4 Agrupación por colores

Para la agrupación por colores se estudiaron dos efectos: el efecto del tiempo para los colores morado y verde y el efecto de cada muestra. Se quería determinar si las medias de las muestras eran iguales agrupadas por color.

En cuanto a los resultados obtenidos para esta sección se pudo observar que tanto las muestras impresas de color morado como las muestras de color verde, el tiempo fue factor de cambio de volumen para las muestras de color morado pero no lo era para las muestras de color verde.

Por lo tanto, la estabilidad dimensional de volumen respecto al tiempo fue mejor en las muestras verdes que para las moradas. Sin embargo, entre muestras el comportamiento no fue similar aunque se agruparon por color.

IX. Conclusiones

1. Las dimensiones de largo y ancho, en las piezas de PLA demostraron ser dimensionalmente estables en condiciones de 23°C de temperatura y 70% de humedad relativa.
2. El espesor de las piezas siempre presentó una contracción dimensional con relación a las dimensiones iniciales.
3. El cambio dimensional de una pieza cuadrada de PLA será mayor en la dimensión de menor magnitud, en este caso, el espesor.
4. El espesor de una pieza cuadrada de PLA es un factor que influye también (y en gran medida) al cambio volumétrico de esta pieza.
5. La Prueba 1 demostró que el tiempo no influye en la estabilidad dimensional de las piezas.
6. A partir de la Prueba 2, se determinó que al almacenar las piezas en un espacio de condiciones constantes como temperatura y humedad, estas tienden a acomodarse a estas condiciones en las primeras 30 horas y luego permanecen relativamente estables.
7. Para el PLA, se demostró que la estabilidad dimensional no está definida por el color del material. Aunque el color verde presentó una variación menor.

X. Recomendaciones

1. Se recomienda analizar la estabilidad dimensional del PLA con piezas cúbicas (largo, ancho y espesor de iguales dimensiones) para observar el efecto del cambio en una dimensión sobre la otra.
2. Se recomienda profundizar en el análisis de la estabilidad dimensional de un solo color de PLA, ya que en esta investigación se utilizaron tres colores para doce muestras.
3. Se recomienda comparar el comportamiento dimensional del PLA con piezas de igual geometría pero diferente patrón de relleno interno de las piezas (zigzag, rejilla, líneas, hexagonal, giroide, etc) para evaluar el efecto que tiene el arreglo interior sobre la estabilidad de las piezas.
4. Se recomienda evaluar la exactitud de impresión de la impresora Ultimaker 3, es decir, comparar las dimensiones de diseño con las reales de impresión.
5. Se recomienda conseguir la mejor cámara o espacio acondicionado posible, con amplio espacio y visión clara para un control más adecuado de las piezas almacenadas.
6. Se recomienda estudiar el efecto de humedad y temperatura, cambiando las propiedades del espacio controlado para observar el comportamiento del materiales ante diferentes ambientes.
7. Se recomienda continuar con el estudio almacenando las muestras por 6 meses para comparar el comportamiento del material con los resultados de este trabajo.

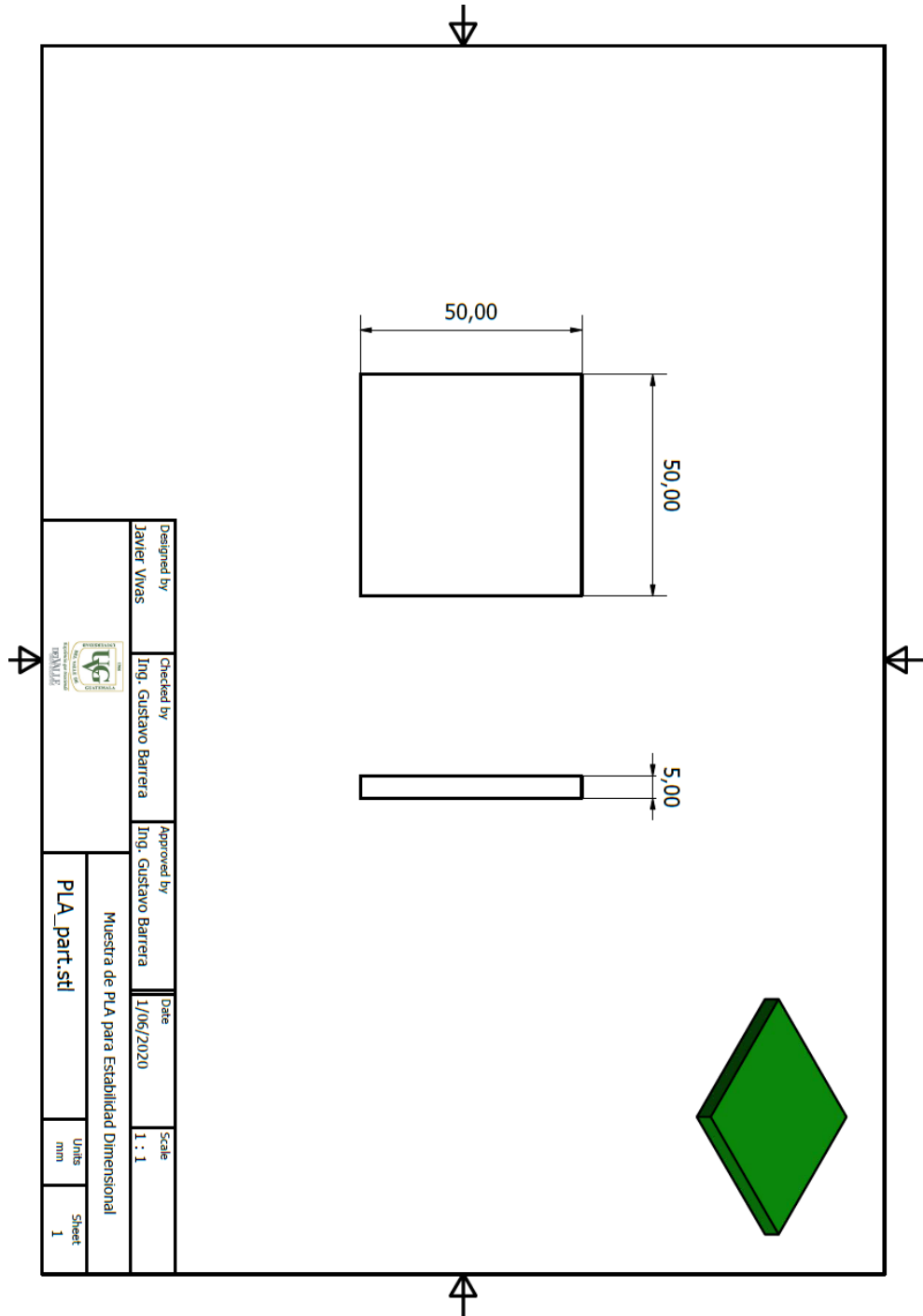
XI. Referencias


- 3D Printer Geeks. (marzo de 2019). *How much does PLA generally shrink?* Obtenido de <https://3dprintergeeks.com/3d-printing-shrinkage-compensation/>
- Amat, J. (enero de 2016). *ANOVA, análisis de varianza para comparar múltiples medias*. Obtenido de https://www.cienciadedatos.net/documentos/19_anova
- ASQ. (2020). *Control chart*. Obtenido de Control Chart: <https://asq.org/quality-resources/control-chart>
- ASTM International. (2012). *Standard Test Method for Linear Dimensional Changes of Nonrigid Thermoplastic Sheeting of Film at Elevated Temperature*: <http://file.yizimg.com/175706/2011123011152101.pdf>
- Azhikannickal, E., & Uhrin, A. (julio de 2019). *Muskingum University*. Obtenido de OH, USA.: <https://doi.org/10.18061/ojs.v119i2.6593>
- Biron, M. (2018). *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*. Cambridge: William Andrew.
- Durgashankar, R. (2018). *Dimensional stability of parts manufactured by additive technologies*. Liberec.
- Ensinger Plastics. (2020). *Plastic Solutions*. Obtenido de <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/plastic-material-selection/dimensionally-stable>
- Ensinger Plastics. (2020). *Plastic Solutions*. Obtenido de <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/plastic-material-selection/dimensionally-stable>
- Evans, B. (2012). En *Practical 3D Printers* (págs. 1-4). NY: Technology in Action.
- Evans, B. (2012). En *Practical 3D Printers* (págs. 1-4). NY: Technology in Action.
- Farah, S., Anderson, D., & Langer, R. (junio de 2016). *ScienceDirect*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/143478508.pdf>
- Faraldo, P., & Pateiro, B. (2013). *Tema 1. Estadística Descriptiva*. Universidad de Santiago de Compostela.
- Garancher, J., & Fernyhough, A. (2014). *Expansion an dimensional stability of semi-crystalline polylactic acid foams*. Obtenido de Polymer Degradation and Stability: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.12.037
- GE Additive. (2020). *Additive Manufacturing*. Obtenido de What is Additive Manufacturing?: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>
- Laiarinandrasana, L. (noviembre de 2019). *Polymeric Materials*. Francia: Mines Paris Tech.
- Lee, T. (2012). *Poly(lactic acid)*. Obtenido de Applications of Poly(lactic Acid): sciencedirect.com
- Martins, F., Branco, P., Reis, J., Navarro, I., & Mauricio, P. (noviembre de 2017). *Dimensional stability of two impression materials after a 6 month storage period*. Obtenido de NCBI: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5724799/>
- McKeen, L. W. (2017). En L. W. McKeen, *Film Properties of Plastics and Elastomers* (pág. 503). Cambridge: pdl.

- ScienceDirect. (2017). *Medical Biosensors for Point of Care (POC) Applications*:
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fused-deposition-modeling>
- SIS. (1986). *Cellular plastics rigid- Test for dimensional stability*. Swedish Standards Institution.
Obtenido de Cellular plastics rigid - Test for dimensional stability.
- Support, U. (2017). *Ultimaker 3. Installation and user manual*.
- Ultimaker Support. (2017). *Ultimaker 3. Installation and user manual*.
- Wittbrodt, B., & Pearce, J. (2015). *The effects of PLA color on Material Properties of 3D printed Components*. Michigan Technological University.

XII. Anexos

12.1 Plano de pieza para muestras de PLA



Designed by Javier Vivas	Checked by Ing. Gustavo Barrera	Approved by Ing. Gustavo Barrera	Date 1/06/2020	Scale 1 : 1	Units mm	Sheet 1
				Muestra de PLA para Estabilidad Dimensional		
				PLA_part.stl		

12.2 Acondicionamiento de piezas en espacio controlado



Figura 38. Muestras de la 1 a la 4

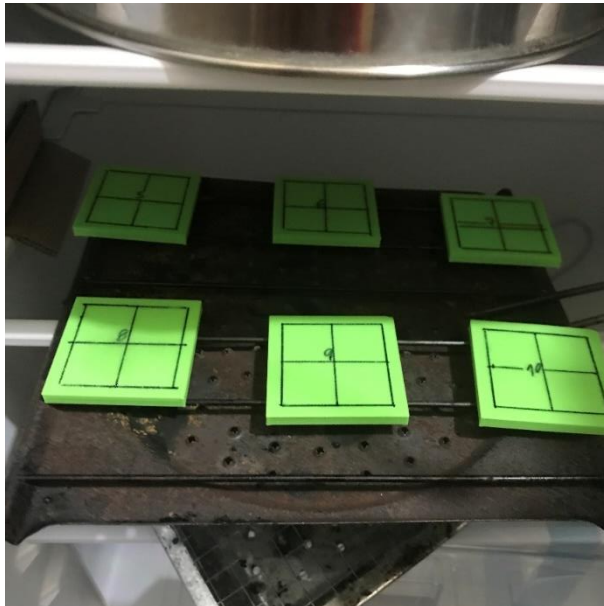


Figura 39. Muestras de la 5 a la 10



Figura 40. Muestras 11 y 12

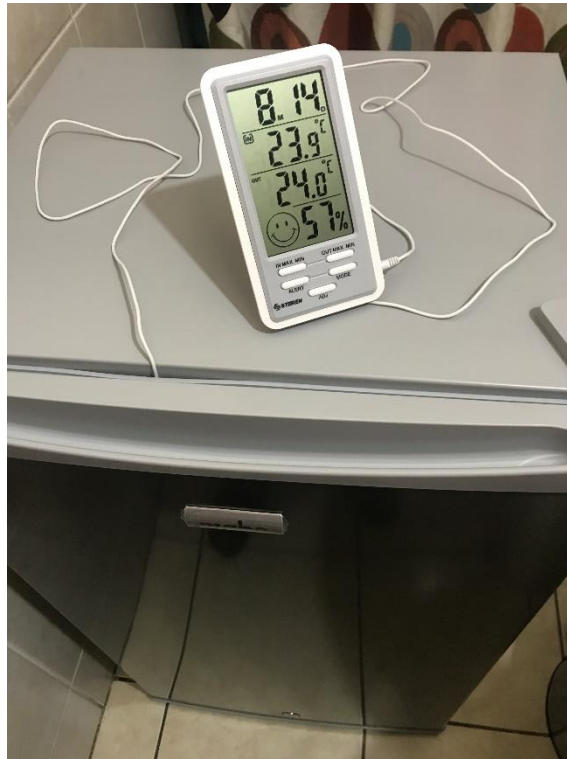


Figura 41. Pruebas iniciales para acondicionamiento



Figura 42. Adaptación de espacio acondicionado

12.3 Proceso de medición en cada dimensión para las muestras.

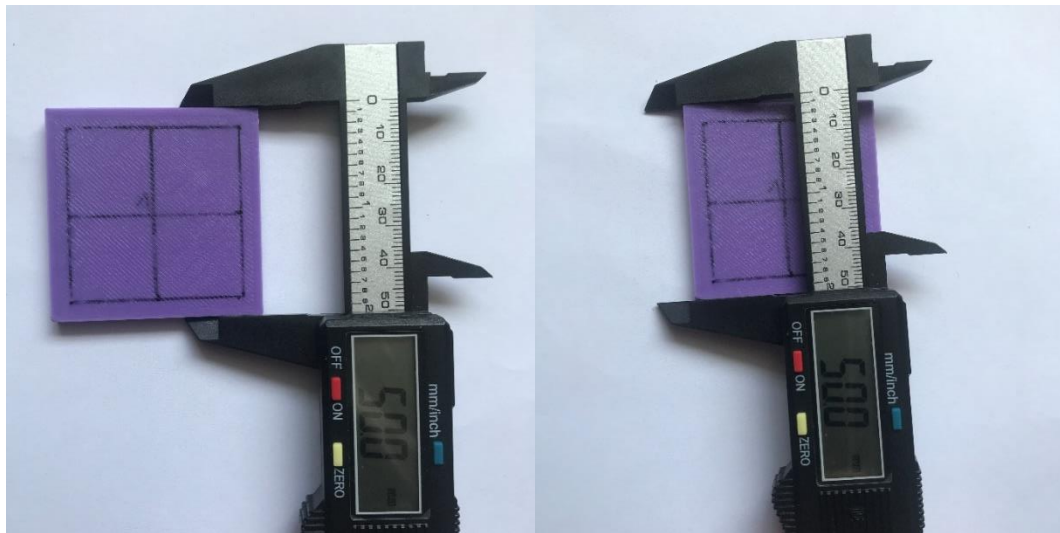


Figura 43. 2 de 3 posiciones de medición de largo

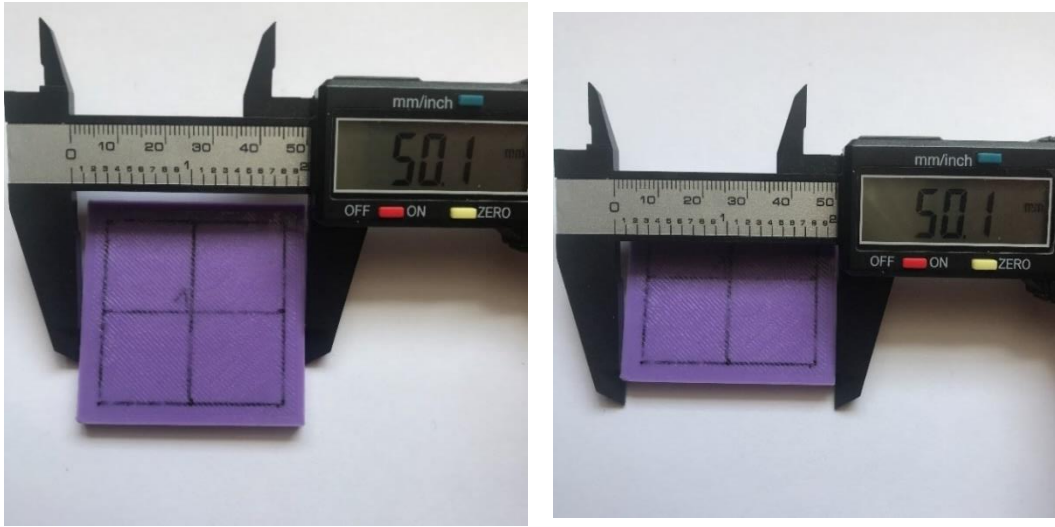


Figura 44. 2 de 3 posiciones de medición de ancho

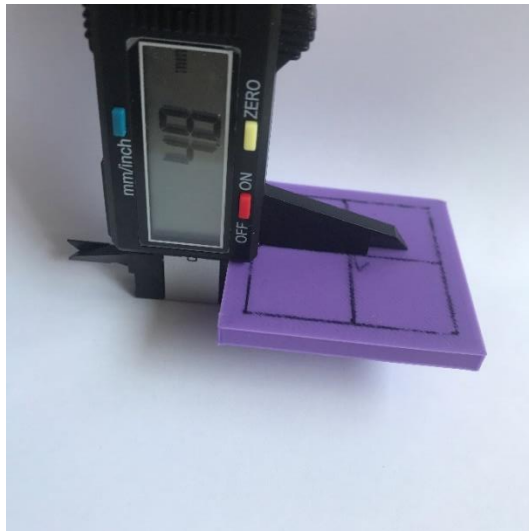
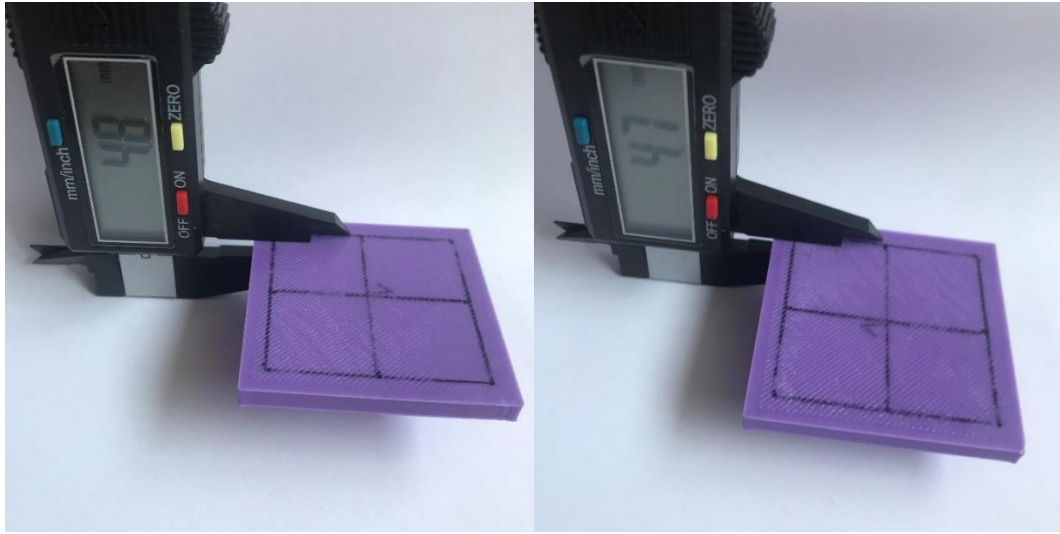


Figura 45. 3 de 5 posiciones de medición de espesor

12.4 Tablas de volumen de control sin datos retenidos. Muestras de la 2 a 12

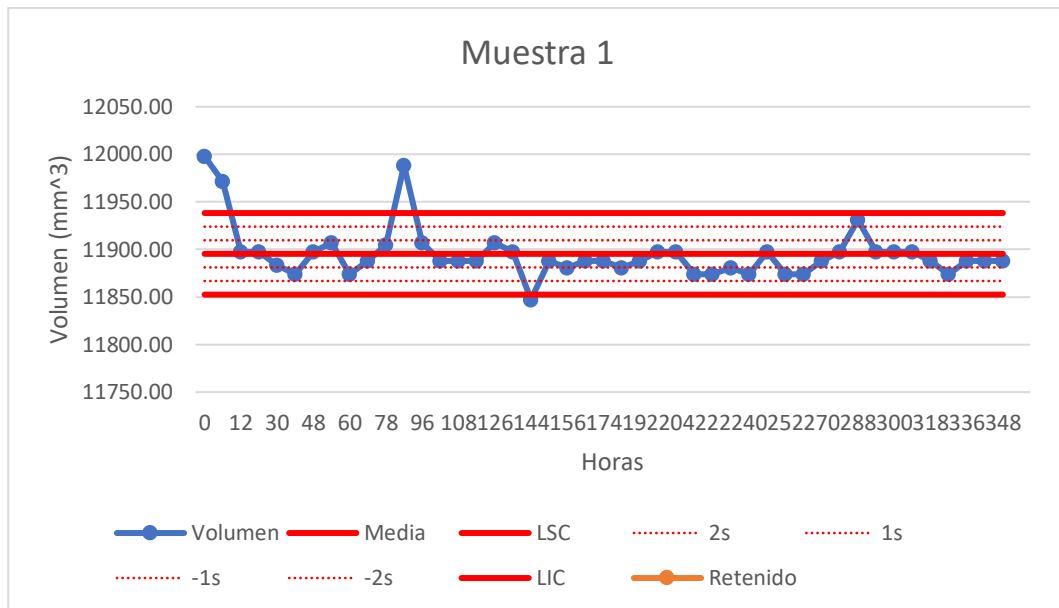


Figura 46. Volumen de control Muestra 1

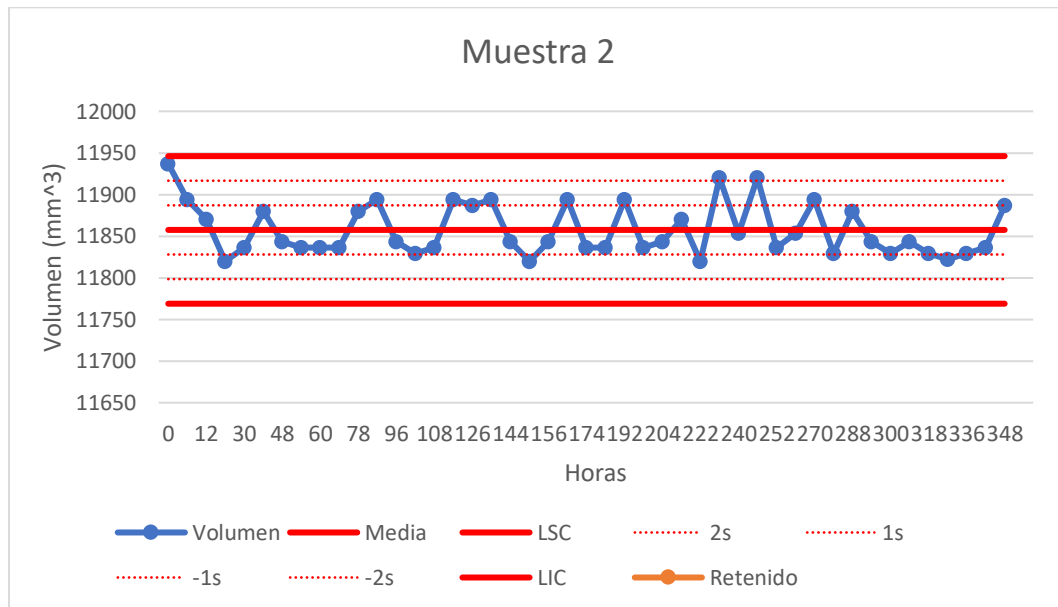


Figura 47. Volumen de control Muestra 2

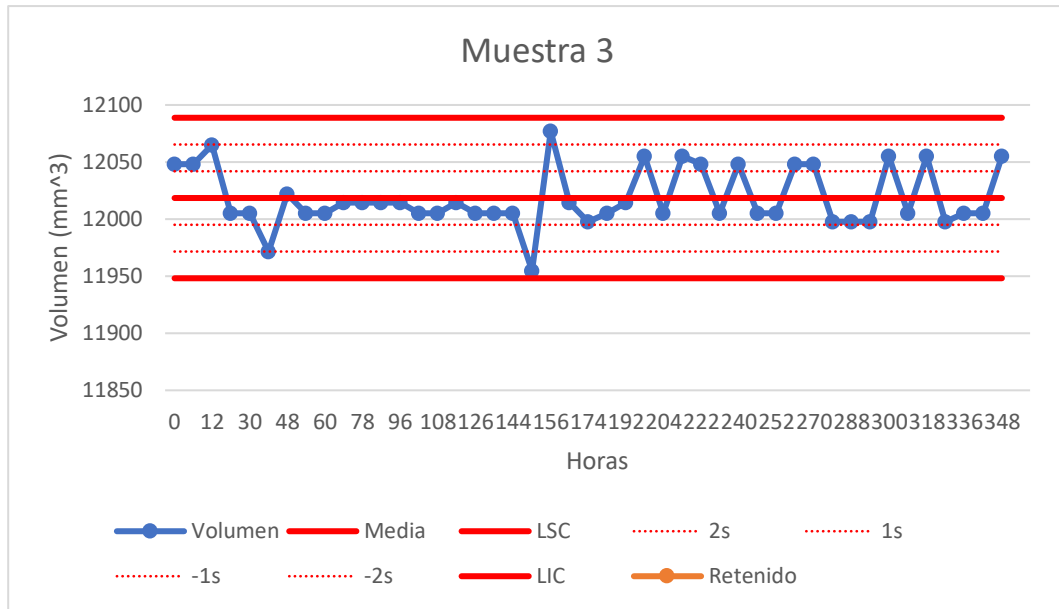


Figura 48. Volumen de control Muestra 3

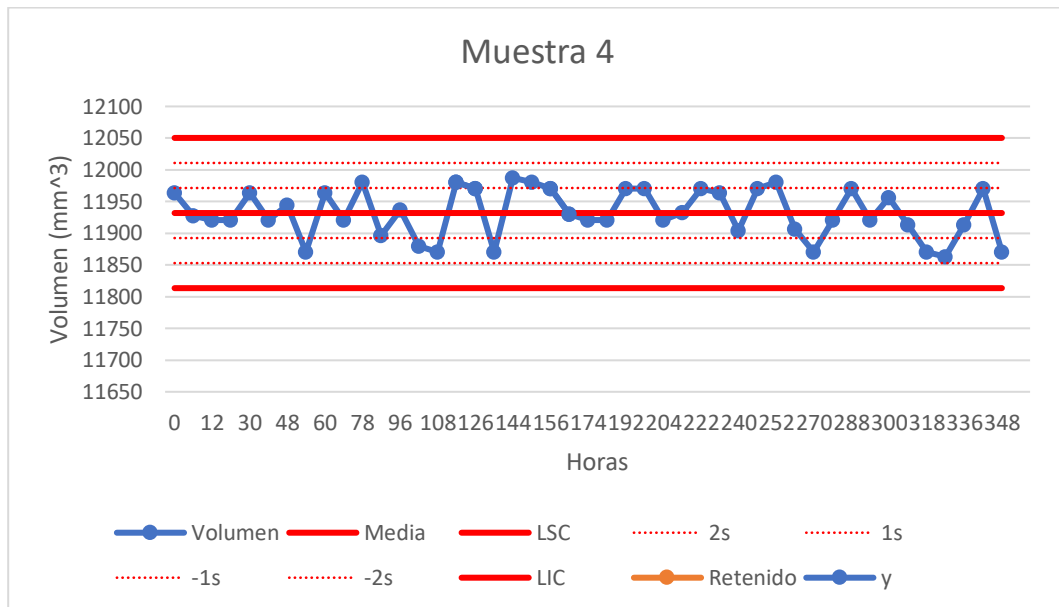


Figura 49. Volumen de control Muestra 4

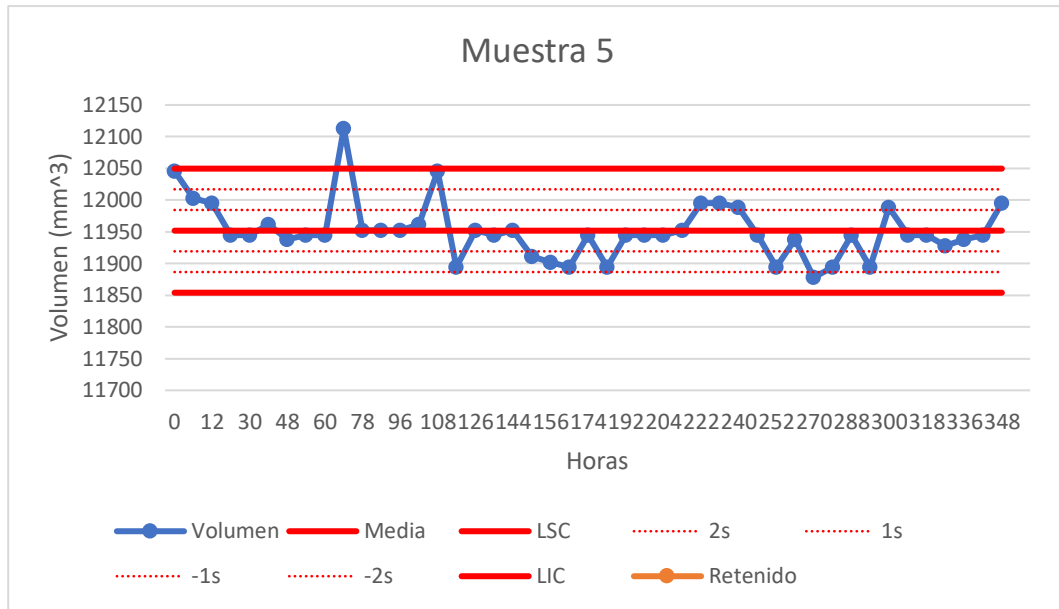


Figura 50. Volumen de control Muestra 5

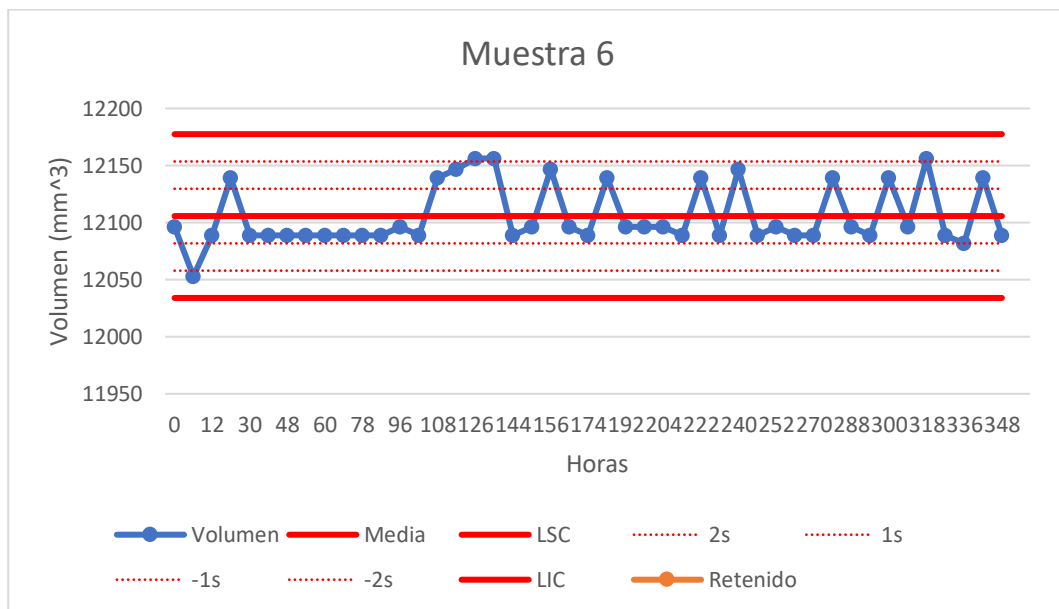


Figura 51. Volumen de control Muestra 6

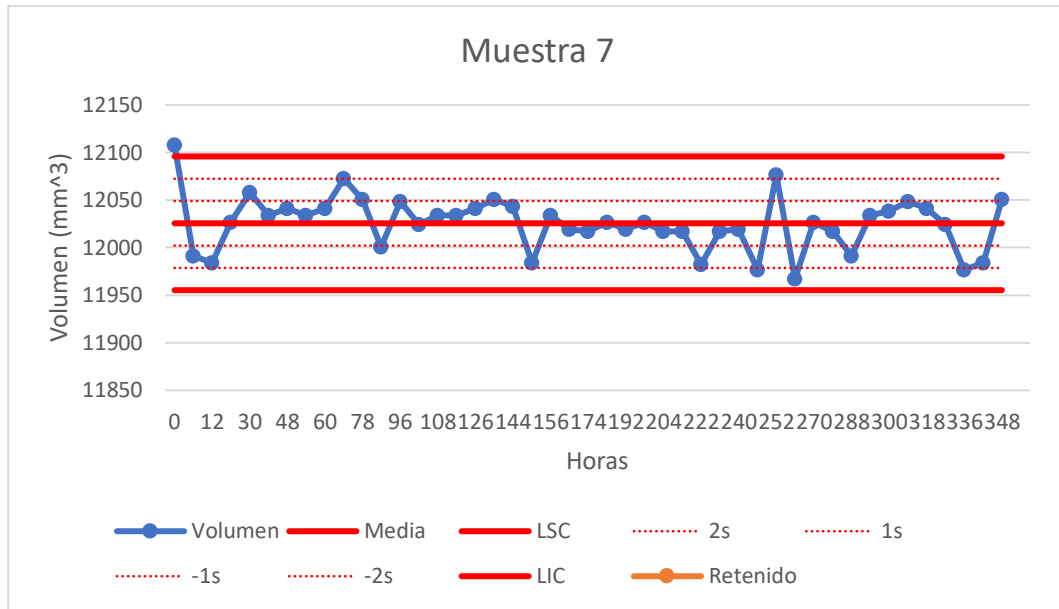


Figura 52. Volumen de control Muestra 7

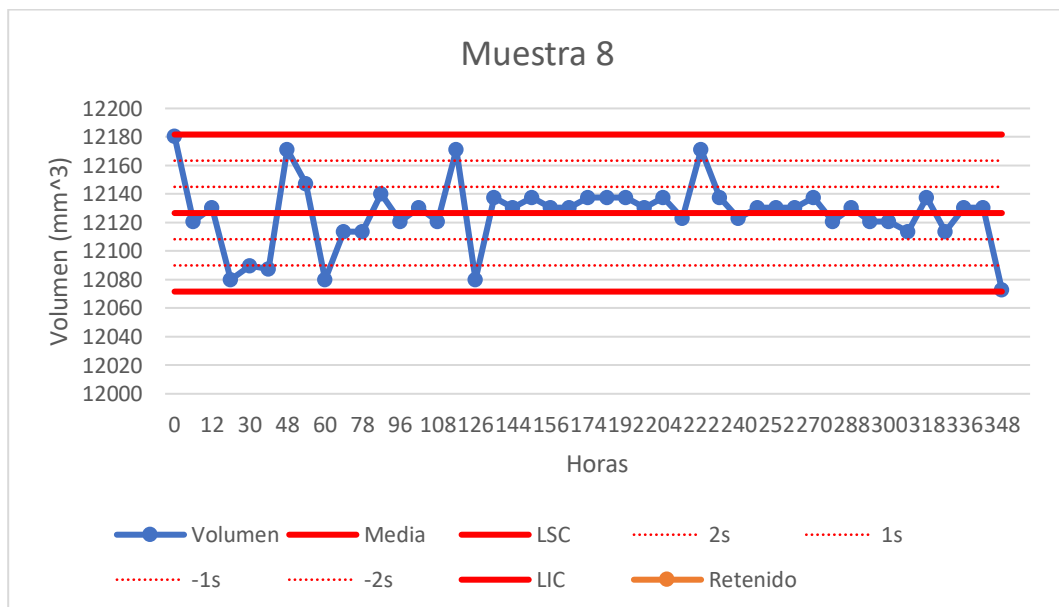


Figura 53. Volumen de control Muestra 8

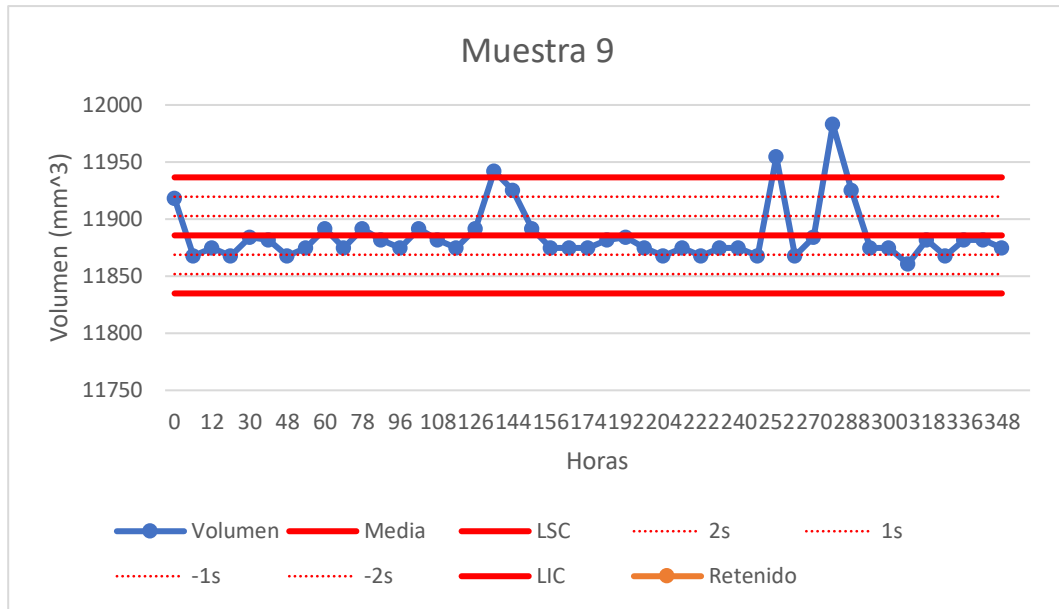


Figura 54. Volumen de control Muestra 9

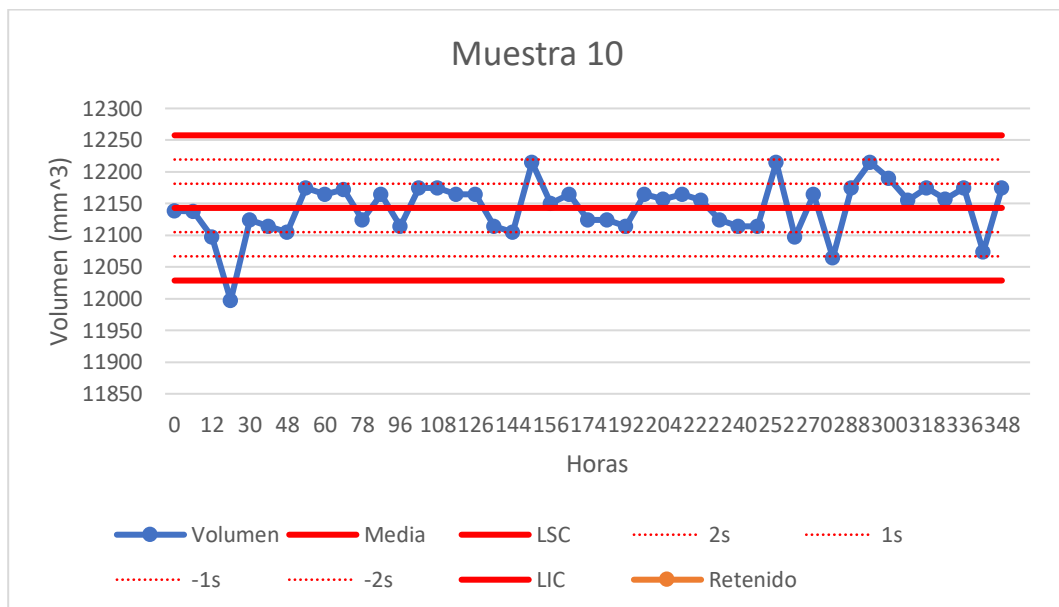


Figura 55. Volumen de control Muestra 10

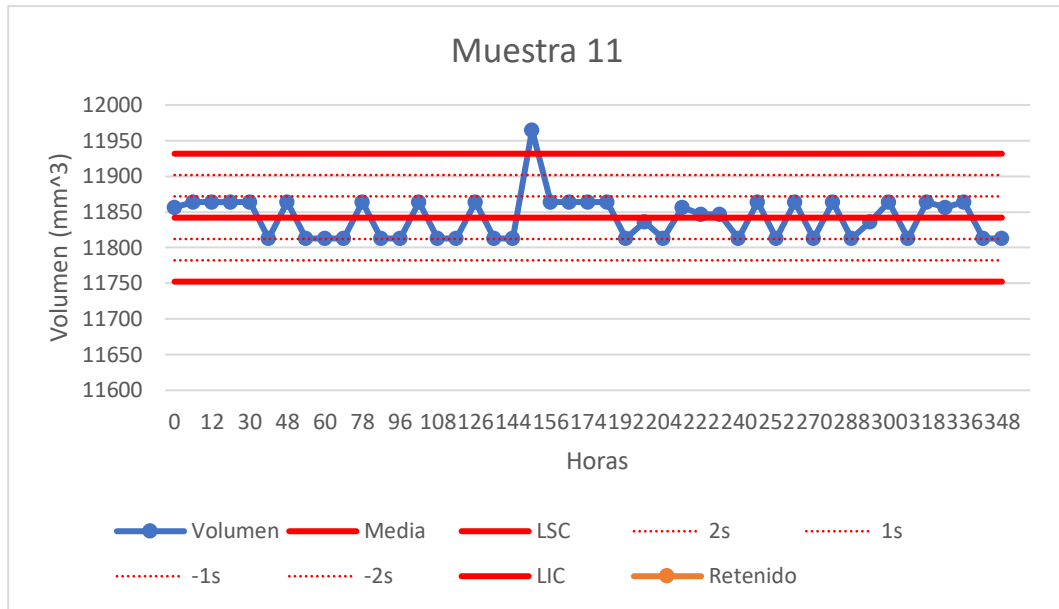


Figura 56. Volumen de control Muestra 11

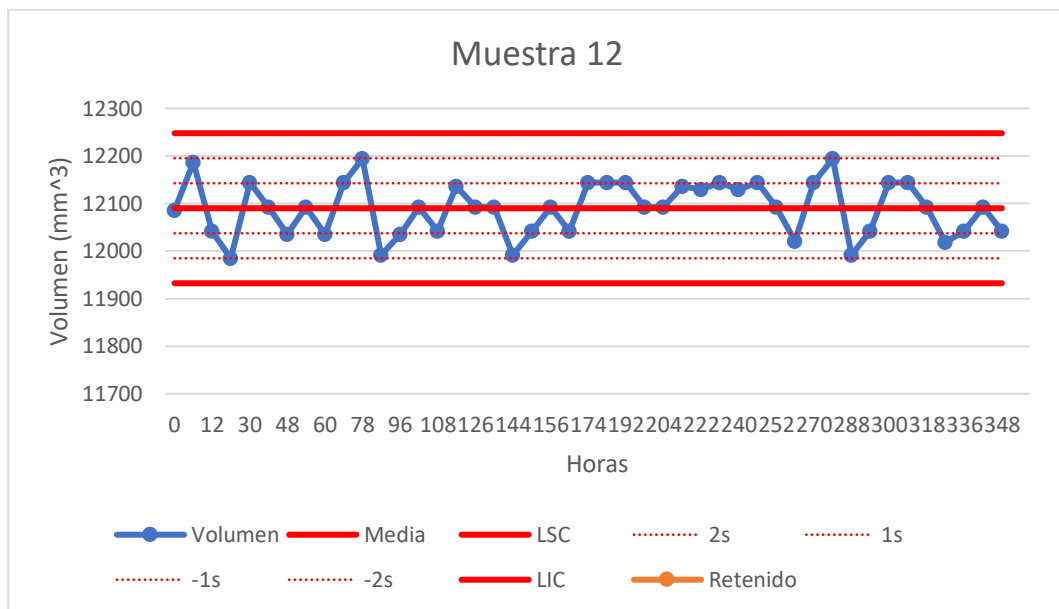


Figura 57. Volumen de control Muestra 12