



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Área de Conocimiento: Ingeniería de los Procesos de Fabricación

Trabajo Fin de Grado

Diseño de un artefacto de ensayos para su aplicación en
impresora 3D con tecnología FDM

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Juan Carlos González Vico

Tutor: Francisco Javier Trujillo Vilches

Cotutor: Sergio Martín Béjar

Málaga, junio de 2023

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por haberme apoyado y siempre haber estado brindándome todo el apoyo que he necesitado para poder completar este TFG, sin ellos no sé qué tan lejos hubiese podido llegar.

A D. Francisco Javier Trujillo y D. Sergio Martin, mis tutores que me han guiado y ayudado en toda la realización de este trabajo. Su guía ha sido invaluable para mi crecimiento académico.

Y finalmente a D. Manuel Herrera. Agradezco su dedicación en el taller de máquinas-herramientas y su constante disposición para resolver mis dudas.

RESUMEN

En este Trabajo Fin de Grado se ha diseñado y fabricado un artefacto de ensayo (test artifact) con el fin de establecer un criterio objetivo y uniforme para evaluar y comparar distintas tolerancias geométricas de elementos impresos en procesos de fabricación aditiva. En concreto, el trabajo se ha focalizado en tecnologías de deposición por hilo (FDM, Fused Deposition Modelling). Para ello, se ha diseñado el artefacto de ensayo siguiendo unos rasgos básicos y características establecidas por la comunidad internacional. Posteriormente, se procedió a la impresión de los artefactos, utilizando diferentes materiales y modificando distintas variables del proceso de impresión, con el objetivo de analizar su influencia sobre la calidad superficial de las mismas. De esta forma, se realizó un control de tolerancias a escala micro geométrica (rugosidad superficial) y macro geométrica (desviaciones de forma). El artefacto de pruebas diseñado ha permitido realizar un análisis de sensibilidad de la evolución de las tolerancias controladas, en función del tipo de máquina utilizada, material o parámetros de impresión. Esta información será utilizada por el grupo de investigación TEP933 "Ingeniería de Fabricación" de la Universidad de Málaga para realizar una calibración de las distintas impresoras que posee y que aplican esta tecnología.

SUMMARY

In this Final Degree Project, a test artifact has been designed and manufactured in order to establish an objective and uniform criterion to evaluate and compare different geometric tolerances of printed elements in additive manufacturing processes. Specifically, the work has focused on Fused Deposition Modelling (FDM) techniques. For this, the test artifact has been designed following some basic features and characteristics established by the international community. Subsequently, the artifacts were printed, using different materials and modifying different variables of the printing process, with the aim of analysing their influence on the surface quality. In this way, a control of tolerances was carried out on a micro-geometric (surface roughness) and macro-geometric (shape deviations) scale. The designed test artifact has allowed a sensitivity analysis of the evolution of the controlled tolerances to be carried out, depending on the type of machine used, material or printing parameters. This information will be used by the research group TEP933 "Manufacturing Engineering" of the University of Malaga to perform a calibration of their different printers that apply this technology.

ÍNDICE GENERAL

Índice

Índice	6
Índice de tablas	9
Índice de figuras	10
1. Introducción.....	13
1.1. Contexto	13
1.2. Objetivos.....	14
1.3. Estructura de la memoria.....	14
2. Introducción al concepto y diseño de artefactos de ensayo en fabricación aditiva	16
2.1. Introducción a la fabricación aditiva.....	16
2.2. Clasificación de diferentes tipos de AM.....	16
2.2.1. Extrusión de material (FDM).....	17
2.2.2. Fotopolimerización VAT	17
2.2.3. Fusión en lecho de polvo	18
2.2.4. Inyección de material (MJ).....	18
2.2.5. Inyección de aglutinante (BJ)	19
2.2.6. Deposición directa de energía (DED).....	19
2.2.7. Laminado en hojas	20
2.3. Materiales usados en la impresión 3D.....	20
2.3.1. Metales.....	20
2.3.2. Polímeros.....	21
2.3.3. Cerámicos.....	21
2.3.4. Materiales inteligentes	21
2.3.5. Materiales especiales	22
2.4. Las aplicaciones de la impresión 3D	22
2.4.1. Industria aeroespacial.....	22
2.4.2. Industria automovilística	23
2.4.3. Industria culinaria.....	23

2.4.4.	Industria sanitaria	23
2.4.5.	Industria de la construcción	24
2.4.6.	Industria electrónica	24
2.5.	Integridad superficial	26
2.5.1.	Desviaciones macro geométricas	27
2.5.2	Desviaciones micro geométricas	28
2.6.	Artefacto de ensayo.....	29
2.6.1.	Concepto de artefacto de ensayo	29
2.6.2.	Ejemplos de artefactos de ensayo.....	29
2.6.3.	Rasgos básicos de los artefactos de ensayo.....	32
2.	Metodología experimental.....	35
3.1.	Diseño del artefacto de ensayo	35
3.2.	Características de impresión de los artefactos	38
3.3.	Evaluación del control geométrico.....	40
3.3.1.	Medidas con el micrómetro de exteriores.....	41
3.3.2.	Medidas con el pie de rey digital.....	41
3.3.3.	Medidas con el medidor de altura.....	41
3.3.4.	Medidas tomadas con el juego de galgas de espesores	42
3.4.	Evaluación de desviaciones micro geométricas	42
3.5.	Evaluación de desviaciones macro geométricas	44
3.5.1.	Desviaciones de redondez.....	45
3.5.2.	Desviaciones de cilindricidad.....	46
3.5.3.	Desviaciones de rectitud	47
4.	Resultados y Discusión.....	49
4.1.	Introducción.....	49
4.2.	Análisis de desviaciones geométricas	49
-	Escaleras	49
-	Pendientes.....	53
-	Agujeros.....	55

- Torre	57
- Elementos finos	59
- Pirámides	63
4.3. Evaluación de desviaciones micro geométricas	65
- Torre	65
- Escaleras	67
- Pendientes.....	69
4.4. Evaluación de desviaciones macro geométricas	72
- Redondez.....	72
- Cilindricidad	73
- Rectitud	74
5. Conclusiones.....	76
5.1. Líneas futuras de investigación	77
6. Bibliografía	79
Anexos	84

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de propiedades de las principales tecnologías en AM.....	25
Tabla 2. Conceptos de integridad superficial.	26
Tabla 3. Tipos y símbolos para indicar las tolerancias macro geométricas.	27
Tabla 4. Resumen de las características de impresión de los artefactos.....	40
Tabla 5. Medias geométricas de Escalera extrusión.....	50
Tabla 6. Medias geométricas de Escalera hueco.....	51
Tabla 7. Medias geométricas de Pendientes.	54
Tabla 8. Medias geométricas de Agujeros.....	56
Tabla 9. Medias geométricas de la Torre.....	58
Tabla 10. Medias geométricas de Elementos finos extrusión.	60
Tabla 11. Medias geométricas de Elementos finos hueco.....	61
Tabla 12. Medias geométricas de “Pirámides”.....	63
Tabla 13. Valores obtenidos de Ra y Rz para la Torre.....	65
Tabla 14. Valores obtenidos de Ra y Rz para las Escaleras.....	67
Tabla 15. Valores obtenidos de Ra y Rz para las pendientes 15-45°.....	69
Tabla 16. Valores obtenidos de Ra y Rz para las pendientes 45-75°.....	69
Tabla 17. Redondez media obtenida de la medidora de forma.....	72
Tabla 18. Cilindricidad media obtenida de la medidora de forma.	73
Tabla 19. Rectitud media obtenida de la medidora de forma.	74

Índice de figuras

Figura 1. Clasificación de tecnologías AM.....	16
Figura 2. Elementos de impresoras basadas en FDM.....	17
Figura 3. Mecanismo del proceso de estereolitografía.....	18
Figura 4. Mecanismo del proceso de fusión en lecho de polvo	18
Figura 5. Elementos de impresoras basadas en MJ.....	19
Figura 6. Mecanismo del proceso de BJ.	19
Figura 7. Elementos de impresoras basadas en DED.....	20
Figura 8. Mecanismo de impresión 3D por laminado en hojas.....	20
Figura 9. Prótesis de titanio imprimida en 3D para un paciente con cáncer.	21
Figura 10. Pieza de arcilla imprimida en 3D.....	21
Figura 11. Asas de titanio impresas en 3D.....	22
Figura 12. Impresión con chocolate.....	22
Figura 13. Automóvil fabricado casi en su totalidad a partir de piezas imprimidas en 3D.....	23
Figura 14. Postre de chocolate imprimido en 3D.....	23
Figura 15. Primera casa impresa en 3D de modo integro.	24
Figura 16. Perfil efectivo de una superficie.....	28
Figura 17. Artefacto de ensayo comúnmente llamado “circle-diamond-square artifact”.	30
Figura 18. Modelo sólido de artefactos de ensayo usado por mahesh.....	30
Figura 19. Modelo sólido de “user part”.....	31
Figura 20. Modelo sólido Usado en las pruebas de repetitividad.....	31
Figura 21. Modelo sólido de “All-in-one”.....	32
Figura 22. Modelo sólido de “Octagon”.	32
Figura 23. Geometría de las escaleras.....	35
Figura 24. Geometría de las pendientes.	36
Figura 25. Geometría de los agujeros.....	36
Figura 26. Geometría de la Torre.....	36
Figura 27. Geometría de los elementos finos.....	37
Figura 28. Geometría de las pirámides.	37
Figura 29. Geometría general del Artefacto.....	37
Figura 30. Visualización del artefacto en IdeaMaker.....	38
Figura 31. Plantillas de impresión de PLA de IDEAMAKER.....	38
Figura 32. Relleno tipo Gyroid.....	39
Figura 33. Micrómetro de exteriores MITUTOYO.....	41
Figura 34. Pie de rey MITUTOYO.....	41
Figura 35. Juego de galgas de espesores utilizado.....	42
Figura 36. Rugosímetro MITUTOYO modelo SURFTEST SJ-210.....	43
Figura 37. Superficies de la Torre medidas con el rugosímetro.....	43
Figura 38. Superficies de las Escaleras medidas con el rugosímetro.....	44
Figura 39. Superficies de las Pendientes medidas con el rugosímetro.....	44
Figura 40. Medidora de forma midiendo un artefacto de ensayo.....	45
Figura 41. Forma de medición de redondez realizado por la medidora de forma.....	46
Figura 42. Forma de medición de cilindridad realizado por la medidora de forma....	46
Figura 43. Forma de medición de rectitud realizado por la medidora de forma.....	47
Figura 44. Representación de la leyenda para el elemento “Escaleras”.....	49
Figura 45. Variación geométrica de la Escalera-extrusión del PLA.....	50
Figura 46. Variación geométrica de la Escalera-extrusión del ABS.....	51
Figura 47. Variación geométrica de la Escalera-Hueco del PLA.....	52

Figura 48. Variación geométrica de la Escalera-Hueco del ABS.	52
Figura 49. Representación de la leyenda para el elemento “Pendientes”.....	53
Figura 50. Variación geométrica de las Pendientes del PLA.	54
Figura 51. Variación geométrica de las Pendientes de ABS.....	55
Figura 52. Representación de la leyenda para el elemento “Agujeros”.	55
Figura 53. Variación geométrica de los Agujeros de PLA.....	56
Figura 54. Variación geométrica de los Agujeros de ABS.	57
Figura 55. Representación de la leyenda para el elemento “Torre”.	58
Figura 56. Variación geométrica de la Torre de PLA.	58
Figura 57. Variación geométrica de la Torre de ABS.....	59
Figura 58. Representación de la leyenda para el elemento “Elementos finos”.	59
Figura 59. Variación geométrica de la Paredes finas-Extrusión de PLA.	60
Figura 60. Variación geométrica de la Paredes finas-Extrusión de ABS.....	61
Figura 61. Variación geométrica de la Paredes finas-Hueco de PLA.	62
Figura 62. Variación geométrica de la Paredes finas-Hueco de ABS.	62
Figura 63. Representación de la leyenda para el elemento “Pirámides”.....	63
Figura 64. Variación geométrica de la Pirámides de PLA.....	64
Figura 65. Variación geométrica de la Pirámides de ABS.	64
Figura 66. Representación de planos de rugosidad analizados para el elemento “Torre”.	65
Figura 67. Rugosidad media aritmética de la Torre en PLA y ABS.....	66
Figura 68. Máxima altura de perfil de la Torre en PLA y ABS.....	66
Figura 69. Representación de planos de rugosidad analizados del elemento “Escaleras”.	67
Figura 70. Rugosidad media aritmética de las Escaleras en PLA y ABS.....	68
Figura 71. Máxima altura de perfil de las Escaleras en PLA y ABS.....	68
Figura 72. Representación de planos de rugosidad analizados del elemento “Pendientes”.	69
Figura 73. Rugosidad media aritmética de las Pendientes en PLA.	70
Figura 74. Máxima altura de perfil de las Pendientes en PLA.	70
Figura 75. Rugosidad media aritmética de las Pendientes en ABS.	71
Figura 76. Máxima altura de perfil de las Pendientes en ABS.....	71
Figura 77. Redondez media de los diferentes diámetros de la torre en PLA y ABS....	72
Figura 78. Cilindricidad media de los diferentes diámetros de la torre en PLA y ABS.	73
Figura 79. Rectitud media de los diferentes diámetros de la torre en PLA y ABS.....	74

Capítulo 1: Introducción

1. Introducción

1.1. Contexto

Fabricación aditiva (AM, additive manufacturing) es el término formalizado que sustituye al término previamente usado denominado prototipado rápido (RP, Rapid Prototyping). El término Rapid Prototyping describe un proceso de fabricación aditiva de un diseño para llevar a cabo pruebas de forma, ajuste, funcionales o una combinación de estas [1]. El prototipado rápido consiste en crear rápidamente un sistema o una pieza antes de la versión final y su posterior comercialización; es decir, permite crear un modelo básico o prototipo del que se derivará el producto final. Este proceso sitúa el énfasis en la rapidez con la que se crea el modelo cuyas ventajas son que permite probar diferentes ideas y proporcionar un feedback constante durante el proceso de desarrollo [2].

Sin embargo, el término PR no describe con precisión las tecnologías a las que hace referencia. Este hecho se debe a que dichas tecnologías se desarrollaron para crear prototipos, pero actualmente se usan con más propósitos. El incremento de la potencia de procesamiento y la reducción de costes de almacenamiento masivo de datos indujo una mejora de las máquinas de impresión. El aumento en la calidad de las piezas se tradujo en modelos que se asemejan más al producto final. En consecuencia, se puso de manifiesto la necesidad de buscar un nuevo término. Un comité técnico perteneciente a la Asociación Americana internacional de Pruebas y Materiales (ASTM International) alcanzó un consenso sobre la nueva terminología a adoptar, dando así comienzo al uso del término fabricación aditiva [1].

El principio básico de la tecnología de AM se fundamenta en que un modelo, inicialmente generado usando un sistema de diseño tridimensional asistido por ordenador (3D CAD, three dimension computer-aided design), puede fabricarse directamente sin la necesidad de un proceso de planificación. La tecnología AM simplifica de forma significativa el proceso de producción de objetos 3D a partir de los datos CAD. La AM solo requiere detalles dimensionales básicos a diferencia de otros procesos de manufacturación que necesitan un análisis detallado de la geometría para determinar detalles como el orden en el que diferentes características han de fabricarse o qué herramientas y procesos utilizar [3].

La clave del funcionamiento de la AM radica en la adición de material en capas. Cada capa es una sección fina derivada del diseño 3D [4]. Esto permite la fabricación de productos con geometrías complejas, muchas veces imposibles de obtener mediante procedimientos tradicionales de conformado.

Aunque las normas de la organización internacional de estandarización (ISO, International Organization for Standardization) definen siete familias de procesos de AM, existe una gran variedad de máquinas disponibles en el mercado que aplican diferentes tecnologías sobre una amplia variedad de materiales. El número cada vez mayor de estas máquinas y procesos plantea la necesidad de desarrollar herramientas y métodos para evaluar sus capacidades y limitaciones. Para ello, se suelen utilizar los denominados artefactos de referencia o de ensayos. Estos elementos consisten en un modelo 3D que comprende una serie de características y formas geométricas definidas, en una sola pieza, que sirven como base común para hacer comparaciones. Aunque se

pueden encontrar numerosos ejemplos en la bibliografía de este tipo de artefactos de referencia, no existe una norma que defina de forma clara sus características

Por otro lado, una de las líneas de investigación más importantes del grupo de investigación TEP933 “Ingeniería de Fabricación” se centra en el análisis y optimización de procesos de AM. Para ello, se está realizando un análisis paramétrico que permita determinar la influencia de los distintos parámetros de entrada a estos procesos sobre las tolerancias dimensionales y geométricas de piezas fabricadas mediante el uso de AM.

1.2. Objetivos

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es realizar el diseño y fabricación de un artefacto de ensayos que permita realizar una comparativa de las tolerancias dimensionales y geométricas de piezas obtenidas mediante técnicas de deposición por hilo para polímeros (FDM, Fused Deposition Modelling). Para ello se tendrán en cuenta los aparatos de control metrológico de los que dispone el grupo de investigación. Este artefacto permitirá realizar un análisis de sensibilidad de la evolución de las tolerancias controladas, en función del tipo de máquina utilizada, material o parámetros de impresión.

1.3. Estructura de la memoria

Este Trabajo de Fin de Grado se estructura en seis capítulos que se describen a continuación:

En el Capítulo 1 se presenta una breve justificación de la necesidad de realizar este trabajo, así como los objetivos establecidos.

El Capítulo 2 se dedica a la revisión de los aspectos teóricos relevantes relacionados con el concepto de “test artifact” y su diseño.

El Capítulo 3 detalla la metodología experimental seguida, incluyendo una explicación de los ensayos realizados. Seguidamente, en el en el Capítulo 4 se lleva a cabo una discusión de los resultados obtenidos para, finalmente, realizar una presentación de las principales conclusiones de este trabajo en el Capítulo 5, así como las principales líneas futuras de investigación.

En el último capítulo, el Capítulo 7, se incluyen las referencias bibliográficas consultadas durante la realización de este trabajo, para dar crédito a las fuentes utilizadas.

Capítulo 2: Introducción al concepto y diseño de artefactos de ensayo en fabricación aditiva

2. Introducción al concepto y diseño de artefactos de ensayo en fabricación aditiva

2.1. Introducción a la fabricación aditiva

La fabricación aditiva también se conoce como técnicas aditivas, procesos aditivos, fabricación de capas aditivas o fabricación en capas. Se define como el proceso de unión de materiales generalmente capa a capa con el fin de fabricar objetos funcionales a partir de datos de modelos 3D [1].

La fabricación aditiva ha demostrado presentar potencial para crear rápidamente piezas complejas y personalizadas individualmente. De hecho, las piezas con estructuras reticulares, geometrías complejas o una porosidad diseñada son difícil o incluso imposible de obtener con técnicas convencionales de fabricación. A pesar de las claras ventajas que presenta la fabricación aditiva, siguen existiendo algunos obstáculos que impiden su uso extendido como es el caso de deficiencias en la precisión y el acabado de la superficie de las piezas, los materiales, las propiedades de dichos materiales y la velocidad del proceso.

2.2. Clasificación de diferentes tipos de AM

De acuerdo con el estándar de ASTM, existen siete diferentes variedades de tecnologías de impresión 3D (Figura 1): extrusión de material (FDM, Fused Deposition Modeling), polimerización VAT, fusión en lecho de polvo, inyección de material (MJ, Material Jetting), inyección de aglutinante (BJ, Binder Jetting), deposición directa de energía (DED, Directed Energy Deposition) y laminado en hojas. Cada una de ellas tiene aplicaciones diferentes.

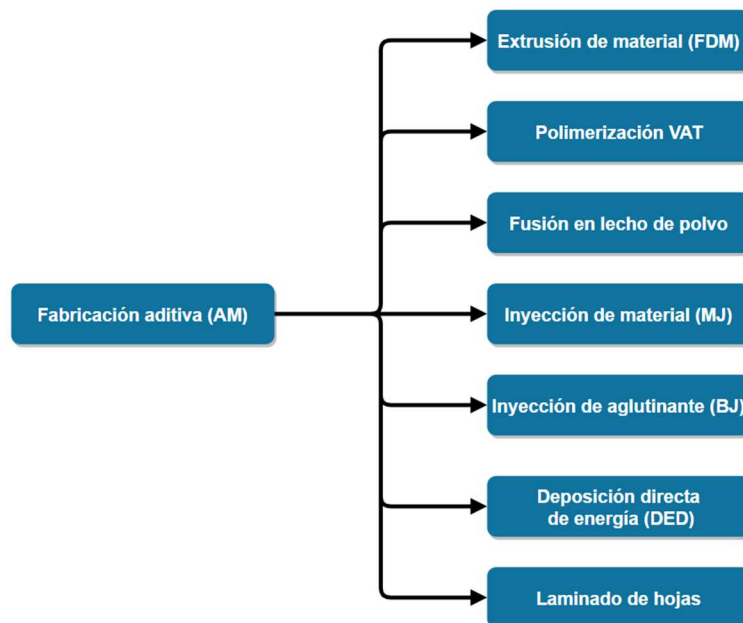


Figura 1. Clasificación de tecnologías AM.

2.2.1. Extrusión de material (FDM)

La impresión 3D basada en la extrusión FDM fue desarrollada a principios de 1990 y usa diferentes plásticos como material principal, aunque también algunos tipos de comida o células vivas. El material empleado se calienta hasta alcanzar un estado semilíquido y se deposita en haces de grosor muy pequeño. En caso de ser necesario soporte estructural, la impresora deposita un material que puede ser posteriormente extraído. Los materiales son administrados a través de una boquilla o un orificio [1]. Aun siendo el coste del proceso bajo, puede crear piezas totalmente funcionales [5].

La tecnología FDM está considerada como uno de los métodos más sencillos. Contiene 3 elementos principales: una placa de impresión, la bobina de filamento que sirve como material de impresión y un extrusor (Figura 2).

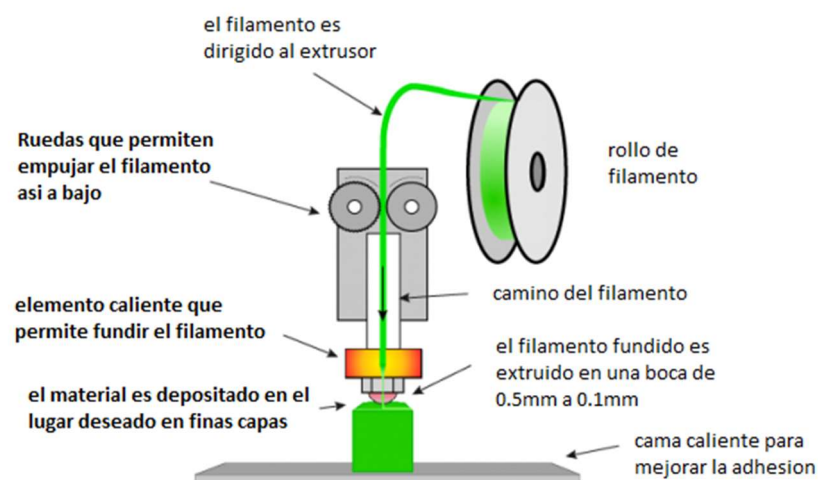


Figura 2. Elementos de impresoras basadas en FDM [6].

El proceso de trabajo es el siguiente: el filamento se carga a la impresora 3D para que pase por la cabeza de extrusión donde se calentará a la temperatura necesaria y se fundirá. Entonces la impresora empezará a mover la cabeza de extrusión a las coordenadas especificadas, dejando el material fundido para que se enfríe y se endurezca. Y una vez que acabe con una capa pasará a la siguiente hasta que la pieza esté formada.

El FDM es uno de los procesos más usados actualmente por tener el menor coste de impresión y ser más simple de utilizar.

2.2.2. Fotopolimerización VAT

Esta tecnología se basa en la fotopolimerización, que se refiere al tratamiento de polímeros fotosensibles con un láser, luz o ultravioleta. El material empleado inicialmente está en estado líquido y se endurecerá con la exposición a la fuente de energía (Figura 3) [1]. Los parámetros más importantes a tener en cuenta son el tiempo de exposición la longitud de onda y la potencia de la fuente de energía. Existen dos variedades de polimerización VAT: estereolitografía (SLA) y proceso digital de la luz (DLP) [7].

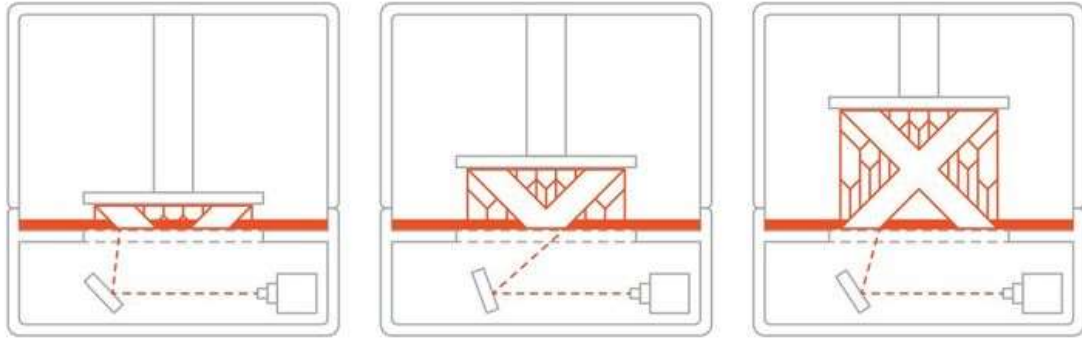


Figura 3. Mecanismo del proceso de estereolitografía [8].

2.2.3. Fusión en lecho de polvo

La tecnología de fusión en lecho de polvo utiliza energía térmica (por ejemplo, un haz de electrones o un láser) para fundir selectivamente regiones de un lecho de polvo (Figura 4) [1]. Esta tecnología usa principalmente materiales metálicos, cerámicos y polímeros. Existen diferentes tipos de fusión de polvo: fusión selectiva por láser, fusión por haz de electrones y sinterizado directo del metal por láser [9].

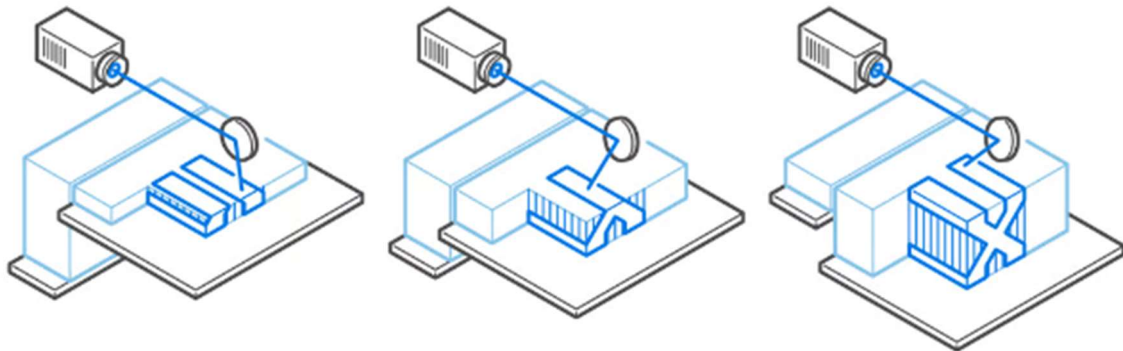


Figura 4. Mecanismo del proceso de fusión en lecho de polvo [10].

2.2.4. Inyección de material (MJ)

La inyección de material se produce gota a gota y se deposita de manera selectiva [1]. Para ello, el cabezal de impresión administra gotas de un material fotosensible que, bajo luz ultravioleta, se solidifica (Figura 5). Así, va construyendo capa por capa la pieza. Es posible la impresión de piezas usando materiales cerámicos, polímeros y biológicos [11].

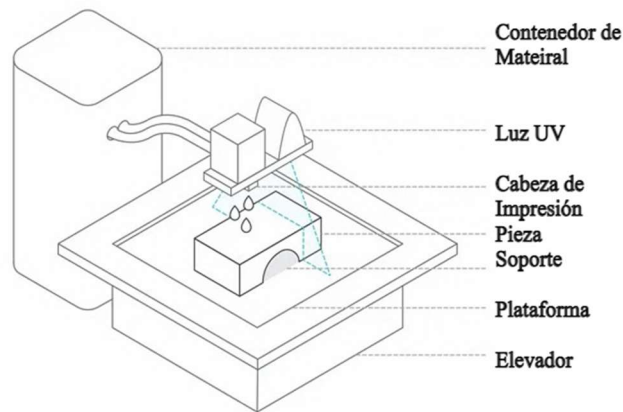


Figura 5. Elementos de impresoras basadas en MJ [12].

2.2.5. Inyección de aglutinante (BJ)

La inyección de aglutinante es una impresión rápida que utiliza un agente líquido que se deposita selectivamente para unir partículas de polvo [1]. Los materiales empleados incluyen elementos metálicos, cerámicos, arenas y polímeros. Para formar las capas, se utiliza un aglomerante químico (Figura 6). La inyección de aglutinante es un proceso rápido, barato y con la capacidad de imprimir elementos de gran tamaño [7].

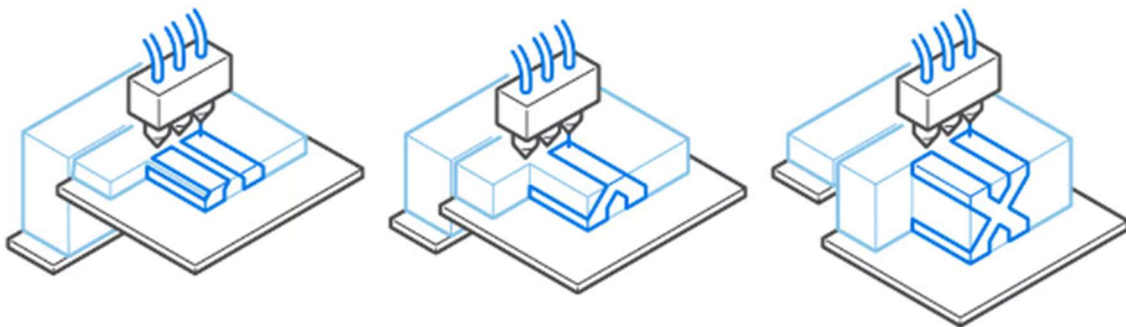


Figura 6. Mecanismo del proceso de BJ [13].

2.2.6. Deposición directa de energía (DED)

La deposición directa de energía emplea energía térmica focalizada para alcanzar el punto de fusión de los materiales y, por consiguiente, unirlos (Figura 7) [1]. Es un proceso de impresión complejo que se utiliza para reparar o añadir material a piezas existentes. Esta tecnología generalmente utiliza metales o híbridos metálicos en forma de cable o polvo. El principio del proceso de deposición directa de energía es similar al de extrusión de material; se diferencia en que la boquilla no está fija y puede moverse en múltiples direcciones [4].

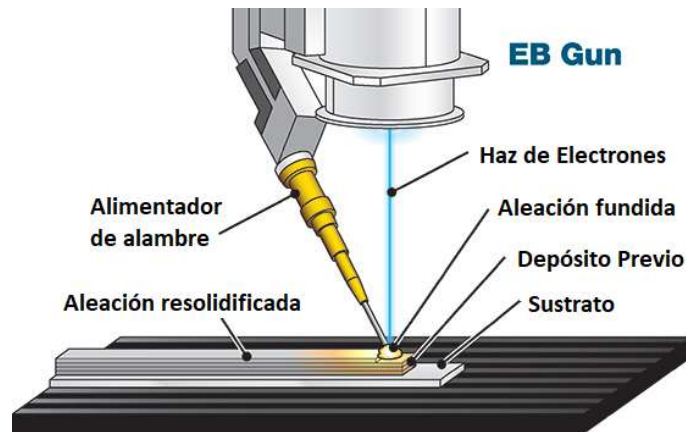


Figura 7. Elementos de impresoras basadas en DED [12].

2.2.7. Laminado en hojas

El laminado en hojas consiste en la unión de capas de material para formar un objeto (Figura 8) [1]. Es un proceso es asequible y permite realizar impresiones a todo color. Además, el manejo del material es relativamente fácil y el exceso de material puede ser reciclado [14].

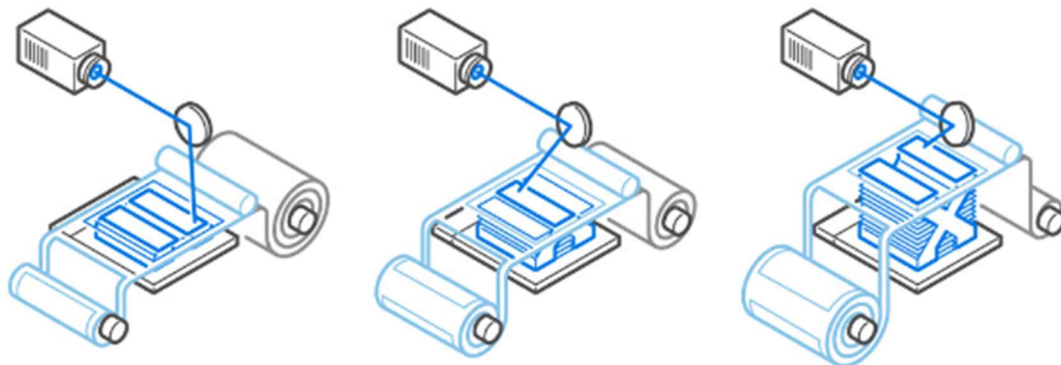


Figura 8. Mecanismo de impresión 3D por laminado en hojas [15].

2.3. Materiales usados en la impresión 3D

La tecnología de impresión 3D es capaz de producir piezas funcionales en una alta variedad de materiales incluyendo metales, materiales cerámicos y polímeros, además de combinaciones de estos.

2.3.1. Metales

El uso de metales es muy relevante en las industrias aeroespacial, automovilística, de manufacturación y de aplicaciones médicas debido a sus propiedades físicas excelentes que permiten producir formas complejas desde partes de órganos humanos hasta piezas aeroespaciales [16]. Se usan generalmente aleaciones de aluminio, aleaciones con base de cobalto, aleaciones con base de níquel, aceros inoxidables y aleaciones de titanio (Figura 9). Estas últimas presentan propiedades únicas como ductilidad, baja densidad y alta resistencia a la corrosión y a la oxidación. En consecuencia, las

aleaciones de titanio se utilizan en condiciones de alta temperatura y estrés, por ejemplo, en las industrias aeroespacial y biomédica [17].

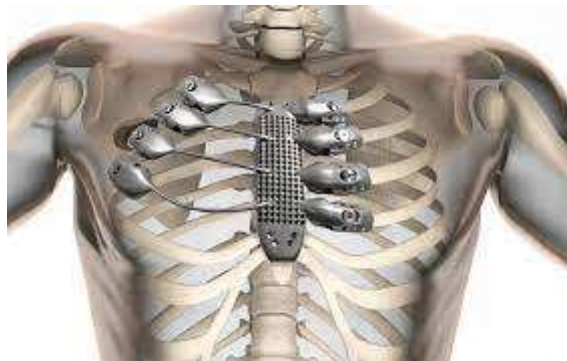


Figura 9. Prótesis de titanio imprimida en 3D para un paciente con cáncer [18].

2.3.2. Polímeros

La impresión 3D de componentes de polímeros va desde prototipos hasta estructuras finales con geometrías intrincadas. Comúnmente, se emplean filamentos termoplásticos como el ácido poliláctico (PLA), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), polipropileno (PP) o polietileno (PE) [19]. Recientemente, se está introduciendo el uso de termoplásticos con un mayor punto de fusión. Sin embargo, los de menor punto de fusión se siguen utilizando extensamente por su bajo coste, bajo peso y flexibilidad [20].

2.3.3. Cerámicos

Los materiales cerámicos se caracterizan por ser duros, duraderos y resistentes al fuego (Figura 10). Dado que la cerámica se puede encontrar en forma líquida, se puede crear cualquier geometría y forma, de ahí que sean considerados muy útiles en el sector de la construcción y la industria aeroespacial. Ejemplos de estos materiales son la alúmina, los cristales bioactivos y la circonia [21].



Figura 10. Pieza de arcilla imprimida en 3D [22].

2.3.4. Materiales inteligentes

Los materiales inteligentes se caracterizan por su potencial para alterar la geometría y la forma del objeto en respuesta a condiciones externas tales como la temperatura o el agua [23]. Un ejemplo de material inteligente son las aleaciones con memoria de forma (SMP), como es el caso de las aleaciones de titanio y níquel que se utilizan en implantes biomecánicos (Figura 10) [24].



Figura 11. Asas de titanio impresas en 3D [25].

2.3.5. Materiales especiales

Algunos ejemplos de materiales especiales son los siguientes:

- Comida. La impresión 3D de comida permite crear comida saludable, ajustando los ingredientes de los materiales sin afectar a los nutrientes o el gusto de los ingredientes (Figura 12) [26].



Figura 12. Impresión con chocolate [27].

- Polvo lunar. Se han realizado pruebas con impresiones 3D usando polvo lunar que podría tener aplicaciones en el futuro [28].
- Textiles. La industria de la moda comenzó a usar la impresión 3D por su versatilidad [28].

2.4. Las aplicaciones de la impresión 3D

2.4.1. Industria aeroespacial

La tecnología de impresión 3D proporciona un elevado nivel de libertad de diseño de los componentes y su producción. En la industria aeroespacial, la impresión 3D tiene potencial para fabricar piezas ligeras y geometrías mejoradas y complejas, con la consiguiente reducción en el requerimiento de energía [29]. También se ha aplicado en la producción de piezas de repuesto de algunos componentes aeroespaciales, como los motores. Las piezas del motor se dañan fácilmente; este hecho hace que el motor requiera un reemplazo regular. La impresión 3D es una buena solución para la adquisición de dichos repuestos [30].

2.4.2. Industria automovilística

Las aplicaciones de la tecnología de impresión 3D en la industria automovilística han permitido la producción de estructuras más complejas y ligeras en menos tiempo. Ford es líder en la impresión 3D de prototipos y piezas de motores. No solo se ha usado en coches: es destacable el caso de Local Motors que ha fabricado un autobús sin conductor, eléctrico, inteligente y reciclable (Figura 13) [31].



Figura 13. Automóvil fabricado casi en su totalidad a partir de piezas impresas en 3D [32].

2.4.3. Industria culinaria

La impresión 3D en la industria culinaria permite que materiales específicos sean mezclados y procesados para formar diferentes estructuras y formas. El principal interés radica en el desarrollo de comida personalizada que se ajuste a necesidades nutricionales particulares como es el caso de pacientes, niños, atletas o mujeres embarazadas. Para ello, se reduce la presencia de ingredientes innecesarios y se aumenta la cantidad de ingredientes saludables (figura 11) [33].



Figura 14. Postre de chocolate impreso en 3D [34].

2.4.4. Industria sanitaria

La tecnología de impresión 3D puede ser usada para imprimir órganos o tejidos como piel, hueso o cartílago, útiles en la investigación farmacéutica o contra el cáncer. También puede emplearse con intención educativa o divulgativa para la creación de modelos, por ejemplo, anatómicos. Algunos componentes biomédicos que se pueden imprimir con la tecnología de impresión 3D son los siguientes:

- Piel. Se puede replicar la estructura natural de la piel con un bajo coste. Su uso para probar medicamentos, cosméticos o productos químicos haría innecesario el uso de animales [34].

- Fármacos. La impresión 3D puede controlar de forma precisa el tamaño y la dosis de los fármacos, aumentando su eficiencia y reproducibilidad [9].
- Cartílago y hueso. Con el objetivo de reemplazar, respectivamente, cartílago o hueso que hayan sido dañados por traumatismos o enfermedades. Es una alternativa a los trasplantes autólogos y alogénicos [35].
- Tejidos. Con el fin de reemplazar, restaurar, mantener o mejorar la función de dichos tejidos. Se pueden imprimir para que sean biocompatibles y presenten la superficie química apropiada [36].
- Órganos que presenten insuficiencias. Causadas por defectos genéticos, enfermedades o accidentes [37].
- Modelos de tejidos cancerosos. Útil tanto en investigación como en el tratamiento de pacientes [38].

2.4.5. Industria de la construcción

El uso de la tecnología de impresión 3D en la industria de la construcción se está extendiendo con el modelado de información de construcción (BIM, Building information modeling) que permite la representación digital de características funcionales y físicas. Es útil durante todo el ciclo de vida de un edificio, desde el diseño hasta la demolición. Se pueden imprimir componentes individuales o edificios completos (Figura 15). La impresión 3D es respetuosa con el medio ambiente, rápida y barata [39].



Figura 15. Primera casa impresa en 3D de modo integro [40].

2.4.6. Industria electrónica

La impresión 3D ya se usa ampliamente en la industria electrónica para dispositivos electrónicos estructurales, como es el caso de componentes electrónicos activos o electrodos. En comparación con los electrodos comerciales, el área de superficie y el diseño de los electrodos 3D puede personalizarse para que se adapte a una aplicación particular. Los componentes electrónicos activos son aquellos capaces de amplificar y controlar cargas de flujo de electricidad [38]. Algunos ejemplos son transistores, rectificadores controlados por silicón, diodos, diodos emisores de luz (LEDs)... La impresión 3D permite un proceso elaborado de fabricación que se adapte a sus funciones complejas [41].

Tabla 1. Resumen de propiedades de las principales tecnologías en AM.

		tecnologías						
		Extrusión de material	Fotopolimerización VAT	Fusión en lecho de polvo	Inyección de material	Inyección de aglutinante	Deposición directa de energía	Laminado en hojas
Propiedades	Coste inicial	Bajo	Alto	Alto	Alto	Medio	Alto	Bajo
	Precisión	Media/Baja	Alta	Alta	Alta	Media	Alta	Media
	Durabilidad	Media	Baja	Muy Alta	Alta	Media	Alta	Baja
	Calidad superficial	Media	Alta	Media	Alta	Media	Alta	Baja
	Velocidad de producción	Media	Media	Media	Alta	Media	Alta	Alta
	Material de soporte	Si	Si	No	No	Si	No	No
	Entorno	No requerimientos especiales	Uso de productos químicos, necesidad de alta ventilación	No requerimientos especiales	No requerimientos especiales	Uso de productos químicos, necesidad de alta ventilación	Control de la atmosfera, para no contaminar el material	No requerimientos especiales
	Aplicaciones más comunes	Prototipado rápido, piezas y herramientas personalizadas	Prototipado rápido, joyería personalizada, aplicaciones dentales.	piezas finales y reparaciones en industria aeroespacial y automotriz.	Prototipado funcional, fabricación de herramientas y piezas personalizadas.	Prototipado a todo color, modelos arquitectónicos y artísticos.	Fabricación de componentes metálicos complejos, prototipado rápido en electrónica.	Modelos arquitectónicos, prototipado rápido en construcción y diseño de productos.
	Materiales más comunes	PLA, ABS, PETG, TPU, Nylon, HIPS	Resinas fotosensibles específicas	Polímeros (nylon, polipropileno), aluminio, acero inoxidable, titanio)	Termoplásticos	Yeso, arena, cerámica	Metales (acero inoxidable, aluminio, titanio), cerámicas	Papel, cartón, materiales compuestos (papel con resina, papel con metal)

**La calidad de las propiedades mencionadas se evalúa en relación con las demás tecnologías de Manufactura Aditiva (AM).*

2.5. Integridad superficial

La fabricación aditiva ha revolucionado el campo de la producción de piezas y componentes, ofreciendo ventajas significativas en términos de diseño personalizado, flexibilidad y reducción de residuos [2]. Sin embargo, a pesar de sus numerosos beneficios, la AM también presenta algunos inconvenientes en comparación con los procesos de fabricación tradicionales, como el mecanizado, el conformado plástico y la fundición entre otros.

Uno de los principales desafíos que enfrenta la AM en muchas de sus tecnologías utilizadas es un menor nivel de precisión en términos de tolerancias dimensionales y geométricas, así como propiedades mecánicas de peor calidad, comprometiendo de forma directa la integridad superficial de las piezas fabricadas.

En sí, el término integridad superficial es un amplio concepto, pero se puede definir como el estado en el que se encuentra una superficie tras un proceso de fabricación y como este va a afectar a la funcionalidad de el mismo elemento, desde el punto de vista de la apariencia, la funcionalidad y la vida útil del mismo [42].

Las propiedades incluidas dentro del concepto de integridad superficial aparecen en la tabla 2:

Tabla 2. Conceptos de integridad superficial.

Macro geométricas	Micro geométricas	Físico-químicas
Redondez	Rugosidad superficial	Microdureza
Rectitud	Microgrietas	Deformación plástica
Cilindricidad	Macrogrietas	Resistencia a la corrosión
Concentricidad	Desgarros superficiales	Resistencia a la tracción
Oscilación radial	Partículas adheridas	Resistencia a la fatiga
Oscilación radial total (Entre otras)	Ondulación superficial (Entre otras)	Transformaciones de fase (Entre otras)

Las propiedades macro geométricas y micro geométricas se cuantifican mediante la tolerancia, lo que se refiere a la discrepancia entre las medidas nominales o teóricas del diseño y las medidas efectivas de cada pieza impresa. La complejidad de la geometría, la inclinación de la superficie y las formas de la pieza son factores importantes que influyen en la calidad de la superficie [43].

Cada una de las piezas que se producen presenta desviaciones entre las medidas que se esperan teóricamente según su diseño y las medidas efectivas de cada pieza. Dichas desviaciones se deben a limitaciones en el proceso de producción que pueden tener su origen en el material, el operario, la maquinaria y otros factores. Estas desviaciones pueden ser tan grandes que, cuando se ensamblan las diferentes piezas de un conjunto, pueden generar problemas que invaliden su utilidad [44].

Mientras que las propiedades físicoquímicas hacen referencia a la micro dureza, las tensiones residuales, la resistencia a la tracción, la resistencia a la corrosión y la resistencia a la fatiga entre otros tal y como se observa en la tabla anterior [45].

2.5.1. Desviaciones macro geométricas

Existen dos tipos de tolerancias que se utilizan para medir las desviaciones macro geométricas: dimensionales y geométricas (Forma, Orientación, Localización y Alabeo) [46].

Las tolerancias dimensionales miden la diferencia entre la dimensión real de una pieza y su valor teórico, y se establece un rango aceptable de valores máximos y mínimos para que la pieza sea aceptada [47].

Por otro lado, las tolerancias geométricas establecen un intervalo aceptable para un elemento geométrico determinado y son causadas por una serie de factores, como el mal estado de la máquina-herramienta, deformaciones en la pieza, o dilataciones térmicas. Estas tolerancias se dividen en orientación, forma, localización o alabeo, y se miden mediante palpadores o con referencias matemáticas de cálculo [46].

En esta tabla se pueden observar las diferentes desviaciones geométricas existentes.

Tabla 3. Tipos y símbolos para indicar las tolerancias macro geométricas [46].

Tolerancias	Características	Símbolo
Forma	Rectitud	—
	Planitud	□
	Redondez	○
	Cilindricidad	∅
	Perfil de una línea	⤿
	Perfil de una superficie	⤿
Orientación	Paralelismo	//
	Perpendicularidad	⊥
	Angularidad	∠
	Perfil de una línea	⤿
	Perfil de una superficie	⤿
Localización	Posición	⊕
	Concentricidad (dos centros)	◎
	Coaxialidad (dos ejes)	◎
	Simetría	≡
	Perfil de una línea	⤿
	Perfil de una superficie	⤿
Alabeo	Alabeo radial	↗
	Alabeo axial	↗↘

2.5.2 Desviaciones micro geométricas

Las especificaciones del acabado superficial de una pieza deben cumplir la función de su aplicación. El acabado influye en diversos factores, como el aspecto, la fricción, la lubricación, la resistencia al desgaste y la fatiga [48]. Sin embargo, lograr una mejora en el acabado superficial implica un aumento en el costo de fabricación, por lo que se busca un compromiso entre las mejoras alcanzables y las necesidades reales de la aplicación en cuestión.

El acabado superficial afecta a diferentes características:

- Funcionalidad: resistencia a la fatiga, corrosión, microdureza.
- Lubricación: Superficie de pistones, rodamientos.
- Desgaste.
- Estanqueidad: Piezas de depósitos de alta presión.
- Aspectos estéticos: Superficies de moldes y matrices.
- Brillos, adherencia.

La rugosidad superficial se estudia dentro de la denominada textura superficial. Esta es una medida de las desviaciones aleatorias o repetitivas de la superficie geométrica, y es responsable de características anteriormente citadas. La rugosidad es solo una parte de la textura superficial, la cual incluye otros aspectos como la ondulación, la forma, los surcos y las imperfecciones superficiales [49].

El perfil efectivo de la pieza lo conforman los perfiles de rugosidad, ondulación y forma. Para poder realizar un estudio de la rugosidad, es necesario separarla de los demás componentes de la textura superficial (Figura 16).

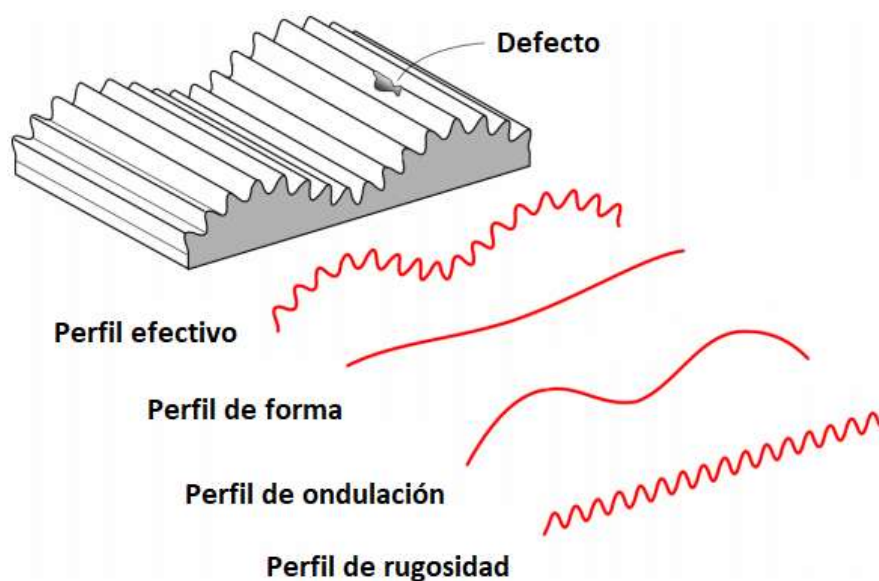


Figura 16. Perfil efectivo de una superficie.

2.6. Artefacto de ensayo

La integridad superficial es un aspecto fundamental en diversos campos de la ciencia, la ingeniería y la tecnología. Sin embargo, para garantizar el funcionamiento, durabilidad y rendimiento de componentes es necesario llevar a cabo pruebas exhaustivas y precisas que permitan determinar los valores de distintas variables relacionadas con el concepto de integridad superficial [50].

Del mismo modo, y dado el gran número de variables que intervienen en un proceso de fabricación aditiva, tal y como se ha puesto de manifiesto en este capítulo, existe la necesidad de crear una estándar para poder comparar el funcionamiento de distintas impresoras, parámetros de impresión y materiales, es decir, establecer un criterio objetivo y uniforme para evaluar y comparar los resultados obtenidos en diferentes sistemas. Este es el propósito de un artefacto de ensayo.

2.6.1. Concepto de artefacto de ensayo

Un artefacto de ensayo es una pieza diseñada con el propósito de ser comparada con el modelo diseñado con el objetivo de realizar una evaluación cuantitativa del funcionamiento de un proceso de fabricación, como es el caso de la fabricación aditiva.

Estableciendo un artefacto de ensayo estándar se pueden comparar distintas máquinas o procesos entre sí. Además, la mayoría de los errores pueden verse representados en la pieza. En consecuencia, será posible determinar si se producen fallos en el proceso de impresión o en la propia impresora 3D. Sin embargo, es difícil vincular los errores en el artefacto de ensayo con los fallos específicos. De ahí la importancia de un buen diseño del artefacto que permita identificar el área a reparar o mejorar [51].

Unas de las claras ventajas del uso de artefactos de ensayo es que diferentes máquinas o procesos que produzcan el mismo artefacto pueden ser fácilmente comparados. Además, puede ser utilizada como método de verificación del rendimiento de diferentes productos y aspectos de producción [52].

La necesidad de artefactos de ensayo se debe a que la fabricación aditiva presenta desafíos únicos en comparación con otros métodos más tradicionales. Ya que la fabricación aditiva crea objetos mediante la deposición de capas sucesivas existe una mayor dependencia del producto a la precisión de la máquina y la calidad del material utilizado [53].

2.6.2. Ejemplos de artefactos de ensayo

Actualmente existe una variedad de artefactos de ensayo, desde diseños individuales para la comprobación visual de diferentes elementos de uso genérico hasta artefactos estandarizados para evaluar el rendimiento de las impresoras y procesos más específicos. Por ellos vamos a realizar una revisión de diferentes artefactos actualmente utilizados:

1. *The circle-diamond-square artifact*

El “circle-diamond-square artifact” es un artefacto de ensayo cuya fortaleza radica en su sencillez, en donde cada característica prueba un aspecto específico (Figura 17). Gracias a ello la pieza es fácil de medir y existen varias opciones de medición

disponibles. Y por ello los errores observados en una característica específica se pueden atribuir a un aspecto específico del rendimiento del centro de mecanizado.

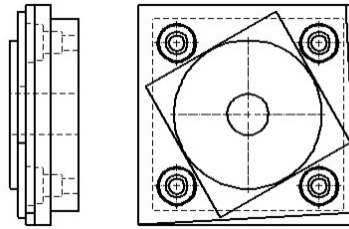


Figura 17. Artefacto de ensayo comúnmente llamado “circle-diamond-square artifact” [54].

Este artefacto de ensayo se utiliza para los ensayos de centros de mecanizado en ISO 10791-7:2020. En este documento se especifican las tolerancias y valores máximos aceptables para los centros de mecanizado de uso general y de precisión normal [55].

2. *The Mahesh artifact*

Este diseño innovador para artefactos de diseño tiene la intención de evaluar la precisión y la calidad superficial de los procesos de prototipado rápido, específicamente la precisión dimensional la desviación de la superficie y la capacidad de reproducir detalles finos (Figura 18) [56].

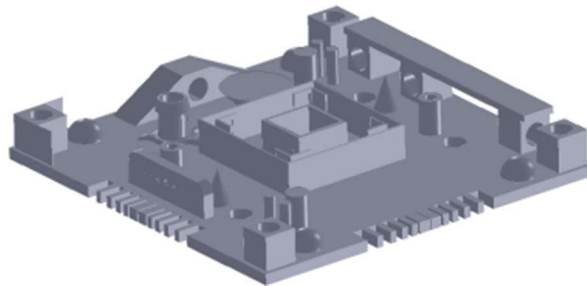


Figura 18. Modelo sólido de artefactos de ensayo usado por mahesh [56].

3. *user part*

El desarrollo de nuevos materiales y procesos individuales dio lugar a los primeros artefactos de ensayo dedicados a la mejora y optimización del proceso. Con ello la denominada "pieza de usuario" es una de las primeras piezas de prueba diseñadas para evaluar cuantitativamente la precisión de sistemas de estereolitografía (Figura 19) [57].

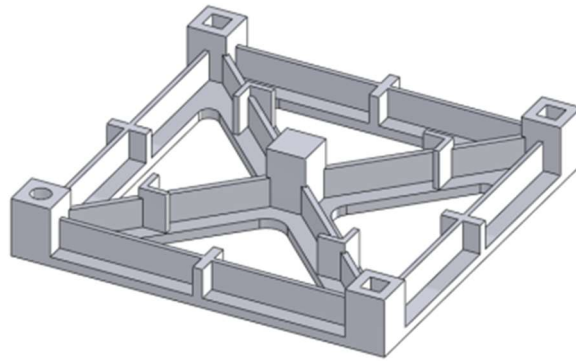


Figura 19. Modelo sólido de “user part” [58].

Este específicamente fue diseñado por SLA en 1990 para obtener la precisión de la maquinaria en el plano x-y, ya que en los primeros años la empresa nuevos materiales estaban siendo desarrollados e introducidos en el sistema. Por ello la necesidad de tener un artefacto dedicado a la optimización de los procesos [58].

4. *DSML artifact*

Este artefacto se enfocó en analizar la repetitividad de la tecnología de DMLS (Direct metal laser sintering) (Figura 20). Esta es una cualidad esencial para producir piezas con la misma calidad y precisión en diferentes ocasiones [59].

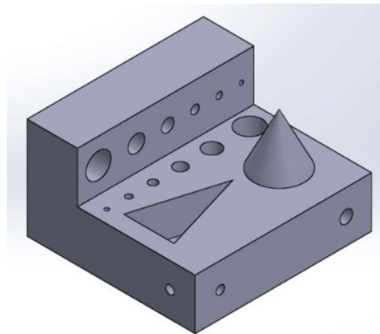


Figura 20. Modelo sólido Usado en las pruebas de repetitividad [59].

En donde afirman que orientación de la pieza a ser cuidadosamente considerada para seguridad o una calidad óptima del producto [59].

5. *Artefactos creados por particulares*

En la actualidad, con la popularización de la impresión 3D se ha permitido que los particulares tengan acceso a métodos de producción, siendo capaces de diseñar artefactos de ensayo que se adapten a las necesidades propias.

De esta manera se crearon artefactos de ensayo comúnmente usados por diferentes comunidades de impresión 3D a través de internet. Algunos de los artefactos más comunes son:

All-in-one: Es un artefacto que incluye todo tipo de formas, comúnmente usado para detectar posibles problemas de calibración y ajustar la impresora 3D. Creado por majda107 (Figura 21).

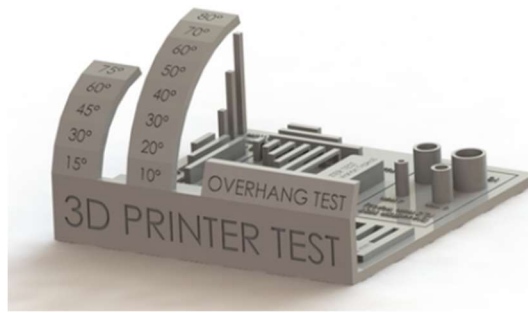


Figura 21. Modelo sólido de “All-in-one” [60].

Octagon: Un artefacto de ensayo en forma de octógono, el cual se centra en cada lateral en un aspecto diferente de la impresión 3D, incluyendo 21 elementos que comprobar (Figura 22).

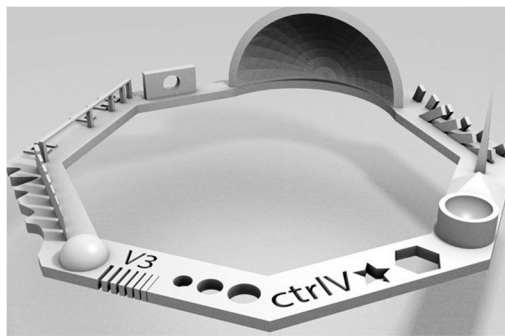


Figura 22. Modelo sólido de “Octagon” [60].

Existen más artefactos de ensayo creados por diferentes empresas y usuarios para abordar diversas necesidades y aplicaciones en el campo de la fabricación aditiva, demostrando la versatilidad y el potencial para obtener información precisa sobre las piezas.

2.6.3. Rasgos básicos de los artefactos de ensayo

En el diseño de artefactos de ensayo los investigadores vieron la necesidad de que los resultados producidos fueran cuantitativos y fiables, por ello se establecieron unas reglas básicas en todos los diseños [61]:

- Ser lo suficientemente grande para probar el rendimiento de la máquina tanto en el extremo de la plataforma, como en el centro.
- Tener un número considerable de características pequeñas, medianas y grandes
- No tardar demasiado en construirse.
- No consumir una gran cantidad de material
- Ser fácil de medir
- Tener características que se asimilen a una pieza real.
- Tener geometrías simples, permitiendo una perfecta definición de la geometría.
- No requerir un post tratamiento
- Ser fácilmente ser repetible

Y aunque existe una amplia variedad de artefactos de ensayo, todos presentan estas características comunes. Este hecho se debe principalmente a la necesidad de crear unas reglas para establecer un estándar en la precisión [43].

Por otra parte, los rasgos geométricos del artefacto variaran según el uso de este, pero la mayoría de los diseños tienen elementos “reales” encima de una base circular o rectangular. Estos elementos que se repiten en todos los artefactos son los siguientes:

- Orificios, extrusiones y cilindros rectangulares en varias direcciones.
- Orificios, extrusiones y cilindros circulares en varias direcciones.
- Orificios y extrusiones esféricos.
- Extrusiones cónicas.
- Rampas con diferentes inclinaciones y ejes.
- Muecas laterales.
- Características finas (en función del tamaño de impresión).
- Extrusiones delgadas.

Para el diseño del artefacto en este trabajo se tendrán en cuenta esta serie de normas y características. Además, se buscará un diseño ergonómico y fácil de utilizar, para que el artefacto sea práctico y eficiente en su manejo durante la realización de las pruebas y permita una comparativa precisa y confiable de las tolerancias dimensionales y geométricas.

En este caso, tenemos el objetivo de diseñar un artefacto con el fin de realizar una comparativa de tolerancias dimensionales y geométricas utilizando diferentes aparatos de control metrológicos que estén a nuestra disposición en el Taller del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Málaga. Y que nos permitan evaluar la calidad y la precisión de las piezas impresas con tecnología FDM.

En resumen, la creación de nuestro propio artefacto de ensayo nos permitirá adaptarlo a nuestras necesidades específicas, integrarlo con los equipos de medición disponibles, personalizarlo según criterios relevantes.

Capítulo 3: Metodología experimental

2. Metodología experimental

En este apartado se expondrá la metodología experimental en la cual se desarrollará el proceso de diseño del artefacto y su fabricación. Y la planificación de los distintos ensayos que se realizarán para una posterior evaluación del control geométrico y dimensional.

3.1. Diseño del artefacto de ensayo

Para un buen diseño del artefacto se debe primero conocer el propósito principal que tendrá. En este proyecto, el propósito principal del artefacto es la evaluación geométrica de las piezas fabricadas mediante FDM y la obtención de unas tolerancias fiables las cuales podamos analizar y comparar con la altura de capa.

El programa utilizado para el diseño es SolidWorks, un programa CAD de modelado 2D y 3D, el cual también permite extraer planos técnicos que utilizados a lo largo del trabajo.

El artefacto y sus elementos fueron diseñados con una proporción de tamaño que permitiera realizar las medidas sin dificultad, pero no en exceso, ya que siguen siendo prototipos que deben imprimirse en el menor tiempo posible. Como resultado se obtuvo un artefacto con unas dimensiones finales de 160 x 160 x 62 mm.

El diseño tiene seis elementos principales basados en los rasgos citados anteriormente en el apartado 2.6.3 y han sido incluidos en el artefacto por diferentes motivos:

- Escaleras: es uno de los elementos más utilizados en los artefactos ya que este está encargado de comprobar las variaciones geométricas entre superficies planas y paralelas, consistiendo en una extrusión y un hueco con un total de seis escalones (Figura 23).

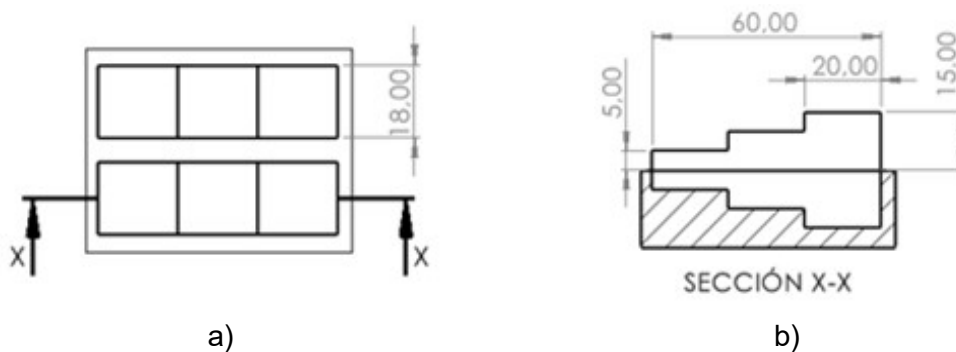


Figura 23. Geometría de las escaleras (a) Planta (b) Perfil.

- Pendientes: otro de los elementos principales más utilizados de los artefactos, el cual es utilizado principalmente en este proyecto para la comprobación micro geométrica de perfiles a diferentes inclinaciones (Figura 24).

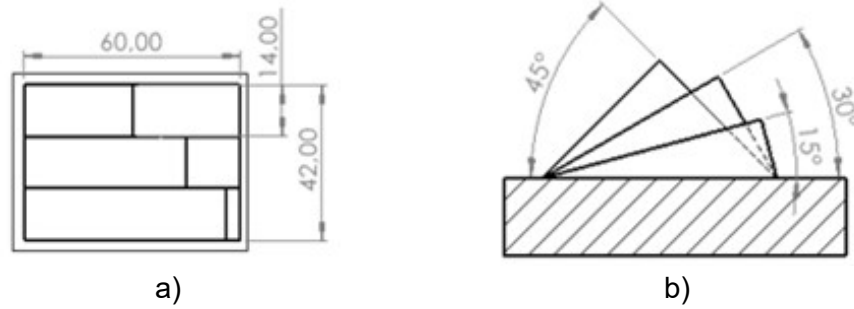


Figura 24. Geometría de las pendientes (a) Planta (b) Perfil.

- Agujeros: son un elemento genérico que atraviesa toda la pieza, y el cual está presente en todo tipo de diseños (Figura 25).

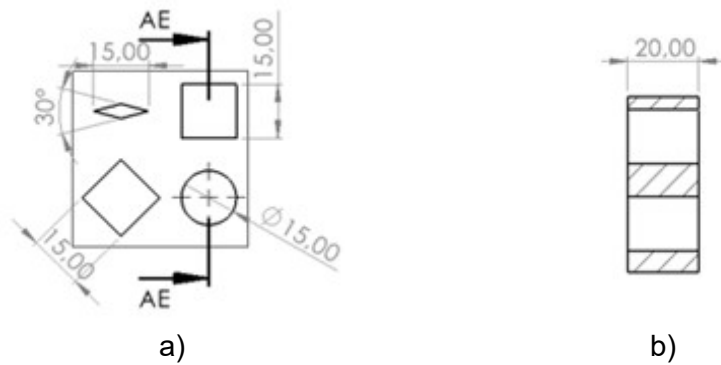


Figura 25. Geometría de los agujeros (a) Planta (b) Perfil.

- Torre: es el elemento principal del proyecto, en él realizaremos las tres evaluaciones geométricas que explicaremos posteriormente. Siendo el único elemento en él se realizarán evaluaciones macro geométricas, dando uso a la medidora de forma (Figura 26).

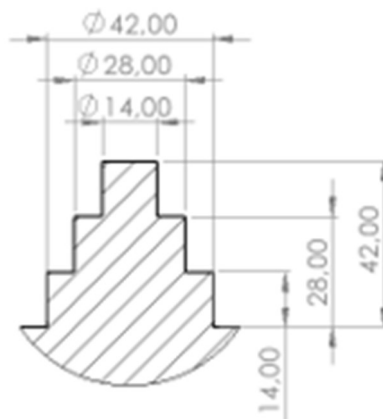


Figura 26. Geometría de la Torre.

- Elementos finos: es el elemento en este artefacto que se utiliza para medir pequeñas características, cercanas al diámetro de extrusión. El diámetro del extrusor es de 0,4 mm por lo que la pared de menor espesor será de 1 mm (Figura 27).

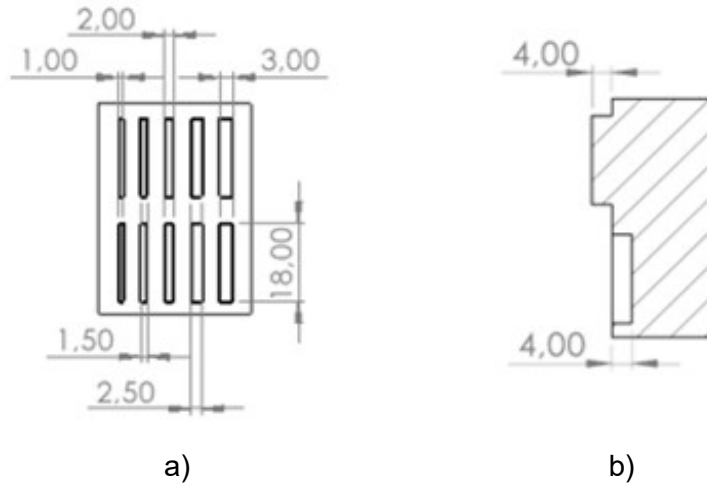


Figura 27. Geometría de los elementos finos (a) Planta (b) Perfil.

- Pirámides: es otro elemento el cual también se utiliza para medir pequeñas características, y en este caso comprobar la altura real de cada una (Figura 28).

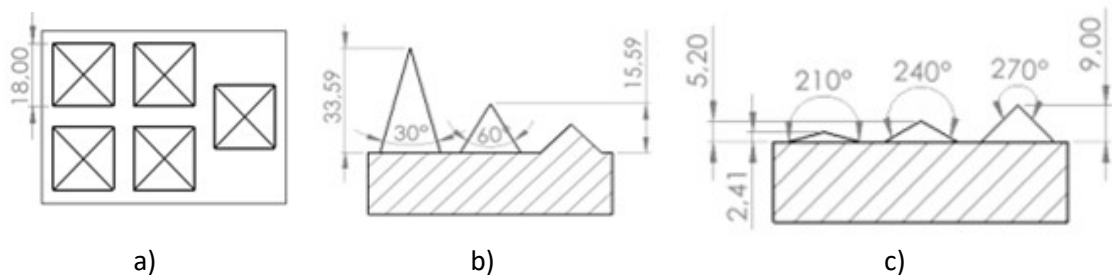


Figura 28. Geometría de las pirámides (a) Planta (b) Perfil frontal (c) Perfil posterior.

Todos los elementos citados anteriormente están situados encima del cuerpo principal del artefacto con un espesor de 20 milímetros, lo cual facilitará su medición y asegura la calidad de impresión estos.

Una vez diseñados todos los elementos del artefacto se utilizó el espacio restante para crear un cajetín en el cual está la información básica del proyecto (Figura 29).

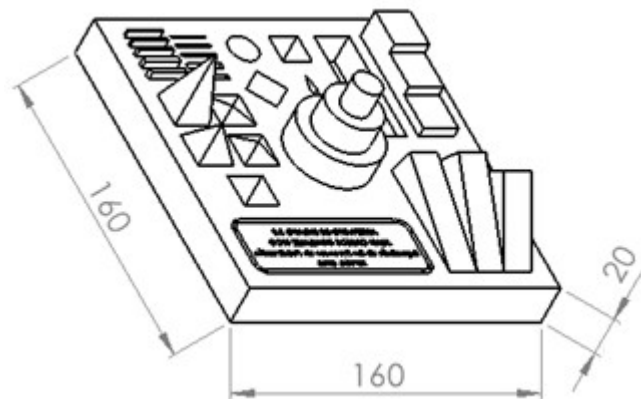


Figura 29. Geometría general del Artefacto.

3.2. Características de impresión de los artefactos

Una vez decidido el diseño del artefacto es necesario decidir las características que se tendrán en cuenta en la impresión de estos.

Para lograr esto, se debe transferir el archivo creado en SolidWorks a IdeaMaker, un Software de impresión 3D de código abierto diseñado para la creación y optimización de modelos 3D para impresoras FDM/FFF (Figura 30). Desde esta aplicación se introducirán todas las características de impresión del artefacto.

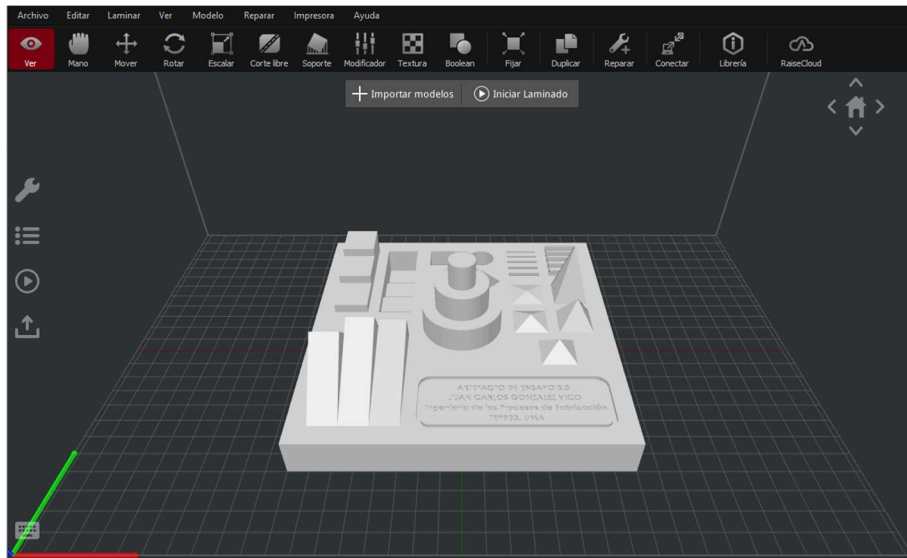


Figura 30. Visualización del artefacto en IdeaMaker.

Para introducir las características de impresión se debe crear una plantilla de impresión para cada artefacto, en este momento se decidió que se imprimirían seis artefactos, tres de PLA y tres de ABS, con 0.1, 0.2 y 0.3 milímetros de altura de capa (Figura 31).

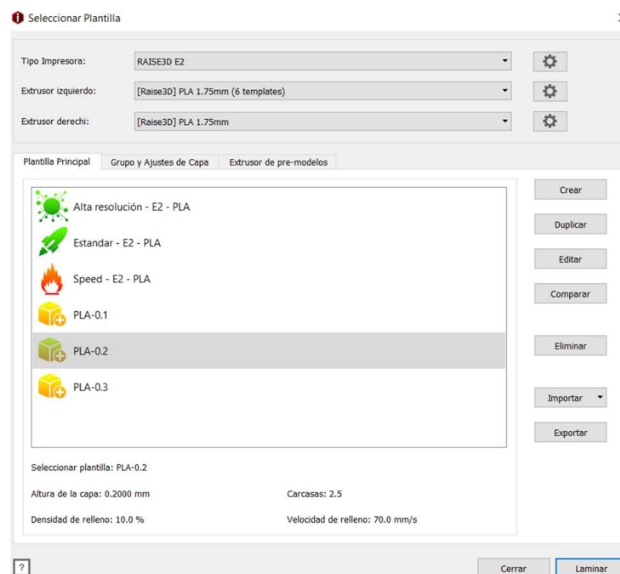


Figura 31. Plantillas de impresión de PLA de IDEAMAKER.

En estas seis plantillas están todos los parámetros de impresión del artefacto, los más importantes y que permanecen constantes en todos los artefactos son:

- Velocidad de impresión de 60mm/s. Esta velocidad garantiza que el material fundido tenga tiempo suficiente para enfriarse y solidificarse antes de que se deposite una nueva capa. El rango común para este tipo de impresoras este 30-150 mm/s
- Relleno al 10% con patrón Gyroid (patrón recomendado por IDEAMAKER) (Figura 32). Se utilizó un relleno el 10% para reducir el peso del artefacto, ahorrar material y reducir el tiempo de impresión.
- Uso único del extrusor izquierdo de 0.4 mm



Figura 32. Relleno tipo Gyroid.

Y en la impresión 3D, el último parámetro principal es la temperatura de impresión y la temperatura de la cama, la cual dependen de material usado, y en este proyecto utilizamos la temperatura recomendada por los fabricantes de los rollos usados.

-PLA: Temperatura de extrusión de 225 [°C] y la cama a 60 [°C]

-ABS: Temperatura de extrusión de 240 [°C] y la cama a 105 [°C]

Una vez definidos todos los parámetros, podemos comenzar la impresión de los artefactos, este es un proceso sencillo donde solo se necesita introducir el archivo creado por IdeaMaker en la impresora 3D, comprobar que el rollo de material está cargado y que la cama donde se imprimirá la pieza este limpia.

En la tabla 4 se representa las características de impresión más importantes:

Tabla 4. Resumen de las características de impresión de los artefactos.

Características de impresión	PLA	ABS
Altura de capa	0,1 / 0,2 / 0,3 [mm]	
Extrusor	Izquierdo	
Ancho del extrusor	0,4 [mm]	
Densidad del Relleno	10%	
Tipo de patrón de relleno	Gyroid	
Capas de relleno solidas	4	
Soportes	Ninguno	
Plataforma	Falda	
Temperatura de extrusor	225 [°C]	240 [°C]
Temperatura de cama	60 [°C]	105 [°C]
Velocidad de impresión	60 [mm/s]	
Velocidad de relleno	60 [mm/s]	

Una vez comienza la impresión solo es necesario vigilar el artefacto durante media hora para comprobar que las primeras capas se mantiene pegadas. Posteriormente se deja la pieza imprimiendo y se vuelve una vez que esté terminada, generalmente después de 10-20 horas dependiendo del artefacto.

3.3. Evaluación del control geométrico

Una vez impresos los artefactos, el primer ensayo que realizamos fue evaluar la geometría de todos los elementos. Para ello, utilizamos diferentes instrumentos de medida disponibles en el Taller del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Málaga.

Se ha utilizado el mismo criterio de medición para todos los elementos del artefacto, realizando cuatro mediciones con el instrumento más adecuado para cada dimensión tomada.

Por último, se mantiene una codificación uniforme para todas las medidas tomadas, lo cual contribuirá a una mejor comprensión de las tablas presentadas en el apartado 5, correspondiente al análisis y los resultados obtenidos.

-Diámetro (S_x)

-Altura (A_x)

-Largo (L_x)

-Ancho (B_x)

-Plano de medición (P_x)

3.3.1. Medidas con el micrómetro de exteriores

Utilizamos los micrómetros de exteriores de rangos 0-25 y 25-50 mm para medir los diámetros de la torre, estos micrómetros de KALKUM EZQUERRA SL tienen una resolución de 0.001 mm y error instrumental de 1 μm (Figura 33).



Figura 33. Micrómetro de exteriores MITUTOYO [62].

3.3.2. Medidas con el pie de rey digital

El pie de rey digital de la marca MITUTOYO es un instrumento de medición muy preciso y útil para la evaluación del control geométrico (Figura 34). Su resolución de 0,01 mm nos permite obtener medidas con una gran precisión.



Figura 34. Pie de rey MITUTOYO [62].

Además, es un instrumento fácil de manejar, y su pantalla digital permite una lectura rápida y precisa de las medidas. Es gracias a esta versatilidad que utilizamos el Pie de rey para tomar diferentes mediciones del artefacto:

- Todas las medidas relacionadas a las escaleras y agujeros.
- Los anchos de las extrusiones de las paredes finas.
- Los anchos y las bases de las rampas.

3.3.3. Medidas con el medidor de altura.

Los medidores de altura Digimatic son instrumentos de medición utilizados para obtener mediciones precisas de alturas y profundidades (Figura 35).



Figura 35. Medidor de altura Digimatic de MITUTOYO [62].

El medidor de altura digimatic MITUTOYO cuenta con una resolución de 0,01 mm, lo que garantiza mediciones altamente precisas. Su diseño ergonómico y pantalla digital facilitan su manejo y permiten una lectura rápida y precisa de las medidas obtenidas.

Solo fue utilizado para tomar las mediciones de altura de las pirámides.

3.3.4. Medidas tomadas con el juego de galgas de espesores

Se ha utilizado un juego de galgas para medir el ancho máximo de los huecos en las paredes finas, es el único elemento el cual se expresa en las tablas con solo un dato por la naturaleza del instrumento de medición (Figura 36).



Figura 36. Juego de galgas de espesores utilizado.

3.4. Evaluación de desviaciones micro geométricas

En este apartado, hemos llevado a cabo un ensayo para obtener los perfiles de diferentes rugosidades superficiales del artefacto de prueba. Los parámetros más significativos que hemos medido son la rugosidad media aritmética (Ra) y la máxima altura del perfil (Rz).

Para realizar este ensayo, hemos utilizado un rugosímetro SURFTEST SJ-210 (Figura 37). Este instrumento nos ha permitido medir con precisión la rugosidad de las distintas caras del artefacto. Para facilitar su uso, hemos montado el rugosímetro en un soporte que nos ha permitido maniobrarlo con facilidad y tomar mediciones en diferentes inclinaciones. Además, hemos utilizado un nivelador para asegurarnos de que las mediciones se realizan de manera precisa y consistente.



Figura 37. Rugosímetro MITUTOYO modelo SURFTEST SJ-210 [62].

La medición de la rugosidad superficial se realizó según la norma UNE-EN ISO 4288: 1998 [63]. Los parámetros utilizados se indican a continuación.

- Filtro: distribución gaussiana normal;
- Longitud de muestreo (l_s): 2,5 μm ;
- Longitud de corte (l_c): 0,8 mm.

A continuación, se presentan las figuras 38, 39 y 40 que muestran todos los perfiles del artefacto de ensayo en los que se ha realizado un ensayo para obtener la rugosidad superficial.

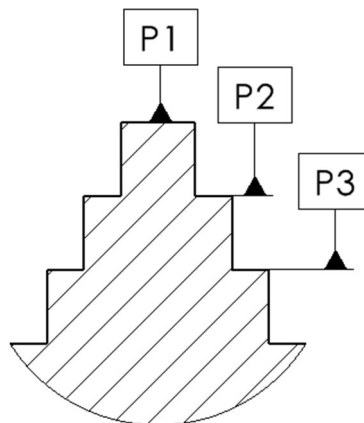


Figura 38. Superficies de la Torre medidas con el rugosímetro.

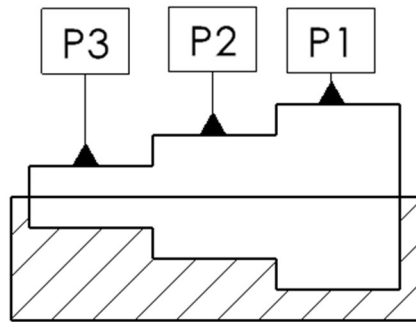


Figura 39. Superficies de las Escaleras medidas con el rugosímetro.

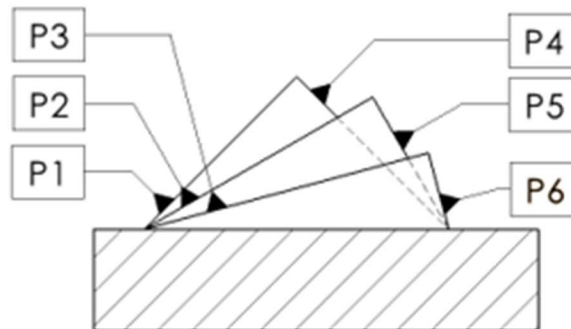


Figura 40. Superficies de las Pendientes medidas con el rugosímetro.

3.5. Evaluación de desviaciones macro geométricas

Con la medidora de forma ACCRETECH modelo RONCOM NEX y el software ACCTEE, hemos podido evaluar con precisión las desviaciones macro geométricas del artefacto de prueba y obtener datos precisos y fiables. Esto nos ha permitido realizar un análisis detallado del rendimiento del artefacto.

Los datos que se han estudiado y nos hemos enfocado han sido:

- Redondez (RON): Medida que cuantifica la cercanía de una figura geométrica a una forma perfectamente redonda o circular.
- Cilindricidad (CYL): Medida que cuantifica la cercanía de una figura geométrica a una forma perfectamente cilíndrica.
- Rectitud (STR): Calidad de una forma o superficie de ser perfectamente recta.

Con el fin de garantizar la repetibilidad se realizaron varias mediciones a lo largo de todo el artefacto de ensayo. La redondez se controló en cuatro secciones equidistantes y la rectitud se controló en cuatro generatrices separadas a 90, estos valores se representaron con el valor medio.

Antes de utilizar la medidora, es necesario posicionar el artefacto de prueba y calibrarlo para poder alinear el centro de la pieza con el eje de rotación de la medidora. A continuación, se utiliza una plantilla que introducimos al programa para que éste realice los diferentes movimientos en la toma de datos (Figura 41).



Figura 41. Medidora de forma midiendo un artefacto de ensayo.

3.5.1. Desviaciones de redondez

La redondez exige que cualquier línea circunferencial esté contenida dentro de la zona de tolerancia formada entre dos círculos coplanares con una diferencia en radio de t [64]. Para la medición de las desviaciones de redondez, se pueden emplear cuatro métodos diferentes:

- Método del círculo de mínimos cuadrados.
- Método del círculo de zona mínima.
- Método del mínimo círculo circunscrito.
- Método del máximo círculo inscrito.

En este análisis, el cálculo de redondez utilizado fue el método del círculo de mínimos cuadrados, en este método un círculo se ajusta al perfil medido de modo que la suma de los cuadrados de los alejamientos de los datos del perfil desde este círculo sea mínima. El valor de redondez se define como la diferencia entre los máximos alejamientos del perfil desde este círculo [65].

En las mediciones de redondez, se mantiene el palpador en una posición estática mientras la pieza gira (Figura 42). Después de medir el diámetro completo, el palpador se desplaza hacia arriba hasta el siguiente punto de medición. Asegurando una evaluación completa de la Torre.

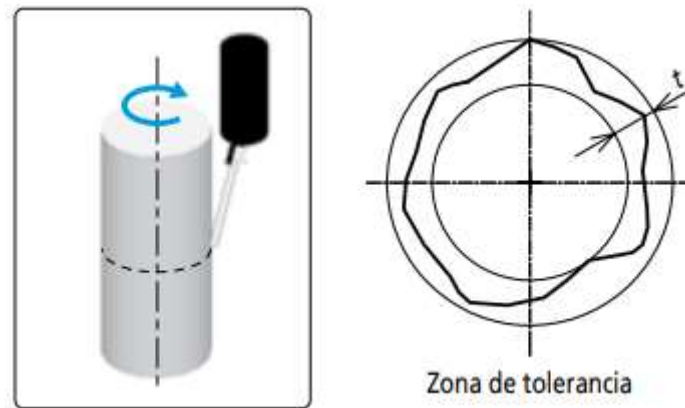


Figura 42. Forma de medición de redondez realizado por la medidora de forma [64].

3.5.2. Desviaciones de cilindridad

La desviación de cilindridad se define mediante una zona de tolerancia delimitada por dos cilindros coaxiales separados por una distancia t (Figura 43). Estos cilindros se calculan utilizando la redondez en diferentes secciones para establecer la zona de tolerancia.

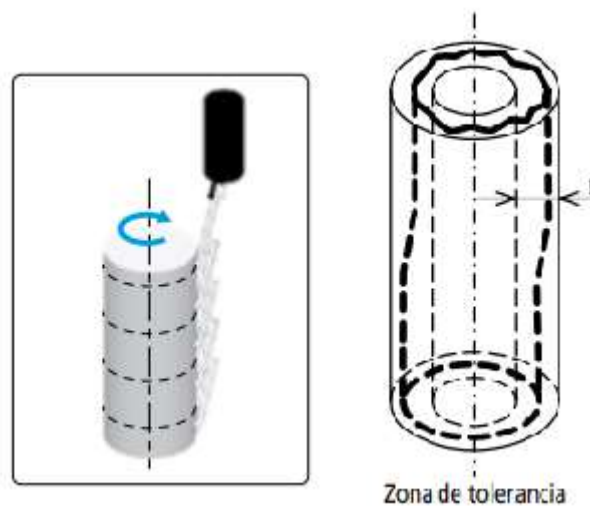


Figura 43. Forma de medición de cilindridad realizado por la medidora de forma [64].

El cálculo se realiza mediante el método de ajuste por mínimos cuadrados, donde el valor de la cilindridad se determina como la diferencia de radio entre el círculo máximo inscrito y el círculo mínimo en cada sección transversal de medición en relación con el centro coaxial del eje de referencia. El eje de referencia se establece mediante una línea de ajuste por mínimos cuadrados de los centros de la circunferencia de ajuste por mínimos cuadrados [66].

3.5.3. Desviaciones de rectitud

La tolerancia de las desviaciones de rectitud en el plano considerado se define mediante dos líneas paralelas o un cilindro de diámetro especificado. Esta tolerancia se aplica a aristas, ejes y generatrices (Figura 44). Para su cálculo, se utiliza el método de ajuste por mínimos cuadrados, donde la desviación de rectitud se determina como la distancia entre el punto más alejado y el menos alejado de la recta de mínimos cuadrados [67].

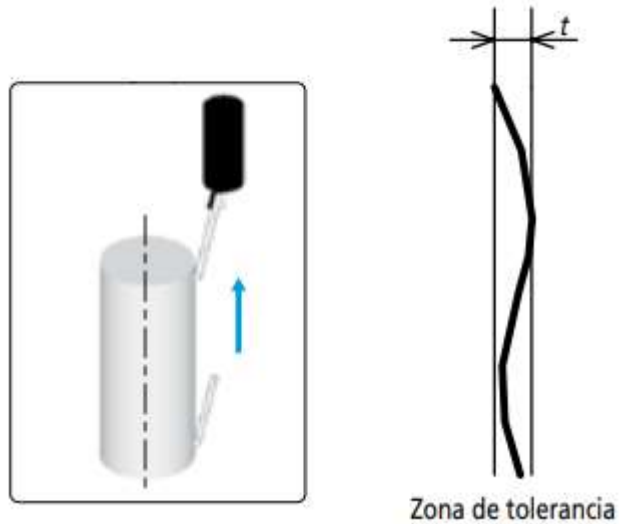


Figura 44. Forma de medición de rectitud realizado por la medidora de forma [64].

Capítulo 4: Resultados y discusión

4. Resultados y Discusión

4.1. Introducción

En este apartado se expondrán y analizarán los datos obtenidos en los ensayos descritos en la sección de metodología experimental. Se llevará a cabo un análisis de cómo las diferentes alturas de capa afectan a la geometría del artefacto. El análisis se iniciará mediante la comparación de los valores reales de todos los elementos con los valores teóricos y realizando una comparativa entre ambos materiales, ABS y PLA.

Posteriormente, se procederá al análisis de las desviaciones microgeométricas obtenidas de los tres elementos estudiados. Y, por último, se realizará un análisis de los datos obtenidos de la media de forma para evaluar las desviaciones macrogeométricas.

4.2. Análisis de desviaciones geométricas

En este apartado se va a realizar un análisis de todos los resultados obtenidos del artefacto, este análisis se realizará por partes y comprobando cada elemento del artefacto.

El análisis geométrico se ha realizado comparando el valor nominal con el valor real, de manera que todas las figuras mostradas en este apartado comparan la desviación media nominal en función de la altura de capa.

- Escaleras

La leyenda utilizada de las siguientes tablas y figuras va a concordar con las siguientes variables mostradas en la Figura 45:

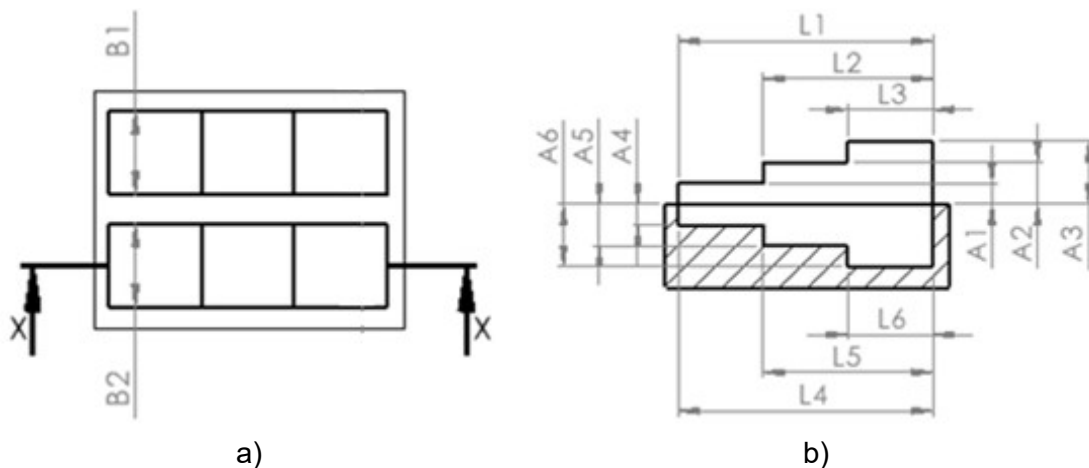


Figura 45. Representación de la leyenda para el elemento Escaleras (a) Planta (b) perfil.

En la tabla 5 y 6 se muestran los valores medios obtenidos de las medidas realizadas sobre el artefacto. Los resultados expuestos en las tablas han sido representados en las figuras 46, 47, 48 y 49 con el fin de evaluar las desviaciones geométricas.

Tabla 5. Medias geométricas de Escalera Extrusión.

		Medias geométricas (mm)						
		Extrusión						
		Longitud			Altura			Anchura
Material	Altura de capa (mm)	L1	L2	L3	A1	A2	A3	B1
PLA	0,1	60,10	40,10	20,07	5,05	10,06	15,00	18,08
	0,2	60,13	40,13	20,13	5,06	9,98	14,80	18,15
	0,3	60,44	40,27	20,27	4,89	9,95	15,07	18,34
ABS	0,1	59,98	40,00	20,00	5,06	10,05	15,01	18,01
	0,2	60,02	40,12	20,08	5,02	10,04	14,96	18,10
	0,3	60,15	40,25	20,20	4,89	9,99	14,98	18,29

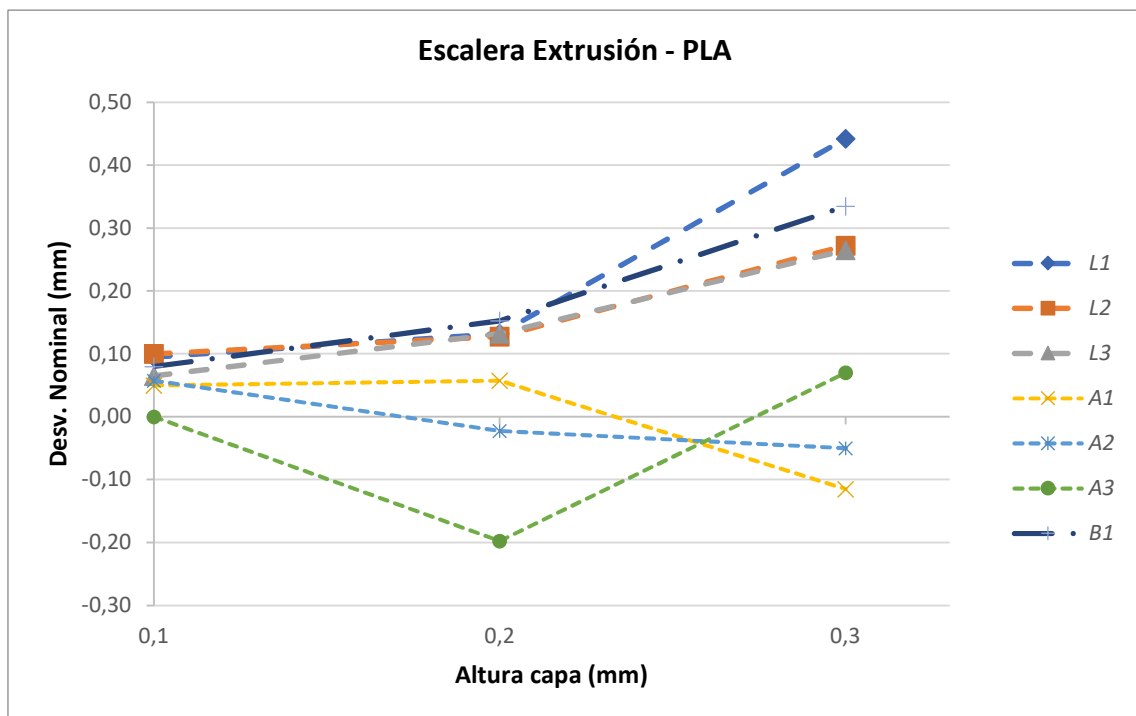


Figura 46. Variación geométrica de la Escalera Extrusión del PLA.

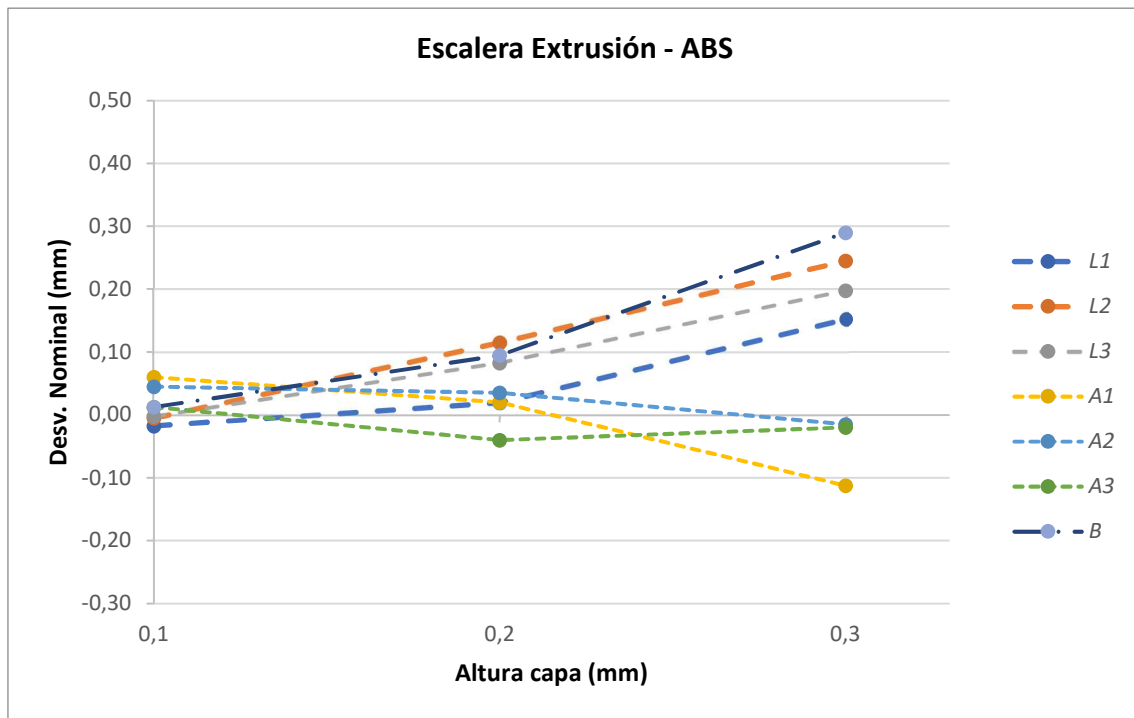


Figura 47. Variación geométrica de la Escalera Extrusión del ABS.

Tabla 6. Medias geométricas de Escalera Hueco.

		Medias geométricas (mm)						
		Hueco						
		Longitud			Altura			Anchura
Material	Altura de capa (mm)	L4	L5	L6	A4	A5	A6	B2
PLA	0,1	59,79	39,91	19,62	5,01	10,05	15,07	17,93
	0,2	59,71	39,83	19,85	5,06	10,09	15,08	17,92
	0,3	59,64	39,68	19,50	5,13	10,37	15,13	17,90
ABS	0,1	59,68	39,54	19,70	5,02	10,03	15,02	17,85
	0,2	59,56	39,69	19,67	5,05	10,08	15,36	17,78
	0,3	59,25	39,54	19,57	5,16	10,28	15,01	17,60

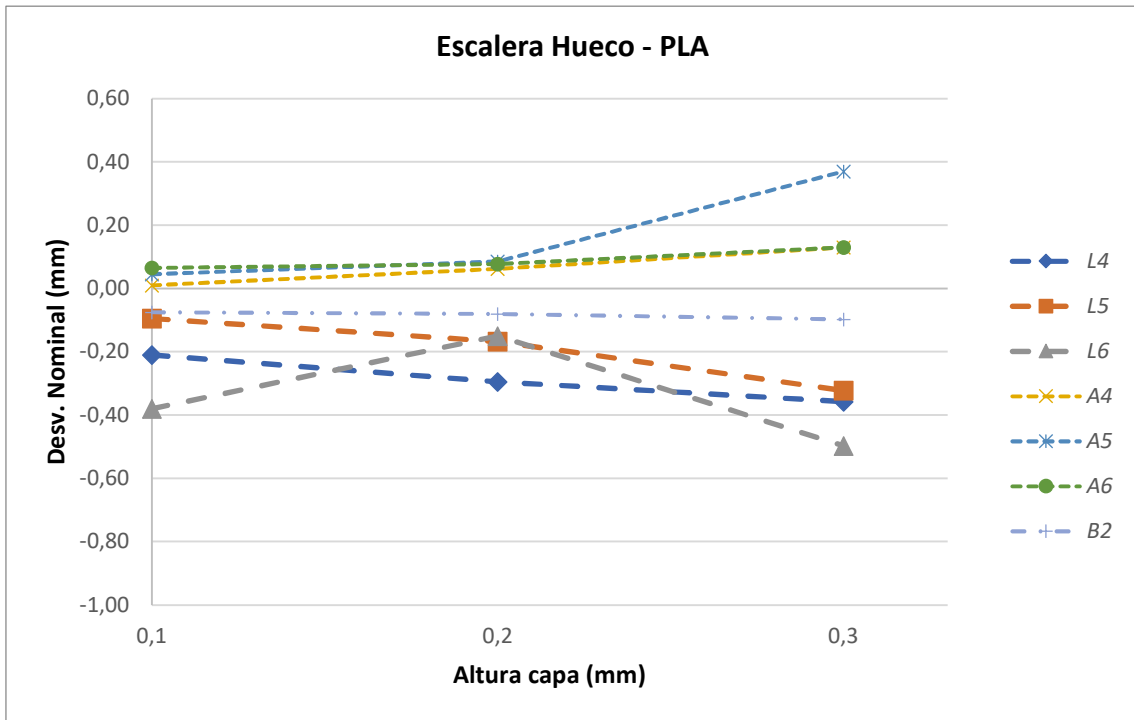


Figura 48. Variación geométrica de la Escalera Hueco del PLA.

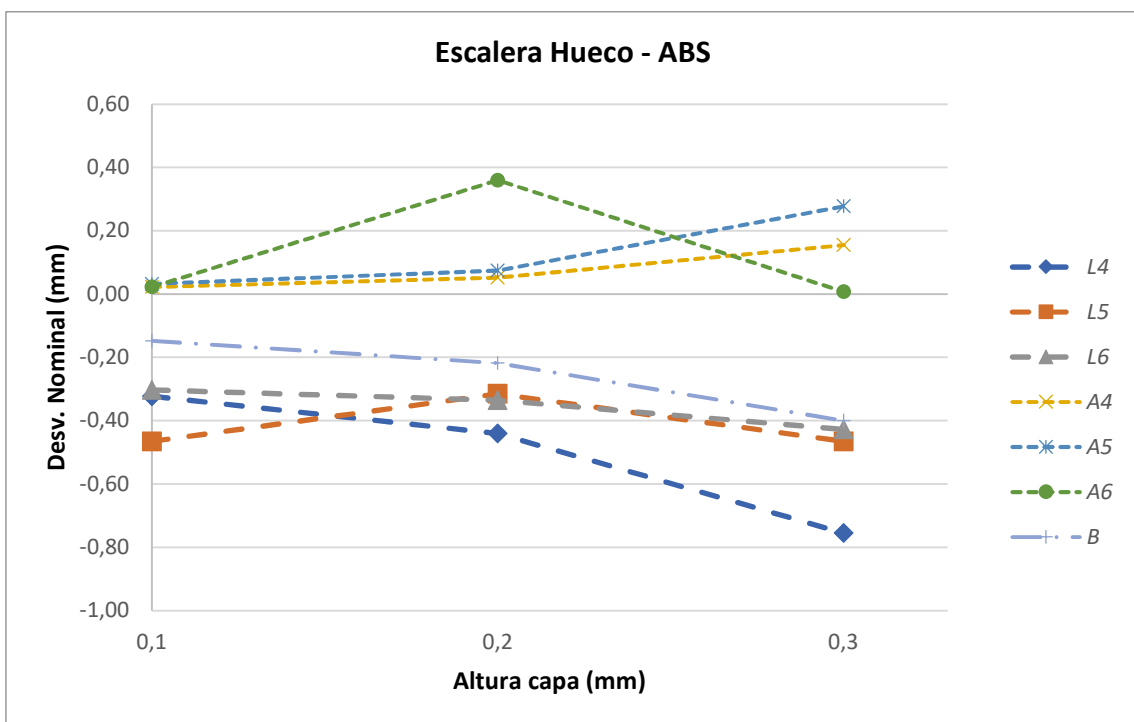


Figura 49. Variación geométrica de la Escalera Hueco del ABS.

A partir de estos resultados y gráficos obtenidos se puede apreciar un mejor comportamiento de la geométrica de la pieza con respecto al valor nominal, en función de la altura de capa, especialmente en “Escaleras extrusión”.

En este caso, se observa que las tablas presentan tendencias similares en los resultados en ambos materiales, pero se refleja que los valores de desviación geométrica en la extrusión son menores en el ABS, mientras que en el hueco es el PLA. Esto puede atribuirse a que el ABS exhibe una mayor dilatación térmica en comparación con el PLA.

También se observa como la desviación máxima nominal en ningún caso supera los 0,8 mm y la mayoría son menores de 0,3 mm. Siendo el rango de impresión de los artefactos de 0,1-0,3 mm de altura de capa y 0,4 mm de anchura del extrusor esta dimensión nominal está muy cerca de los parámetros de impresión principales.

Finalmente se puede apreciar la diferencia principal en la escalera extrusión y escalera hueco, dónde las desviaciones nominales del elemento de extrusión de longitud y anchura son positivas mientras que de altura son negativas, y viceversa en el elemento hueco. Esto es debido al comportamiento del material el cual tiende a expandirse en ambos elementos.

A partir de las desviaciones geométricas medidas en este elemento se puede establecer una tolerancia que se podrá usar para futuros diseños de piezas de machos y hembras.

- Pendientes

La leyenda utilizada de las siguientes tablas y figuras va concorde con las siguientes variables mostradas en la Figura 50:

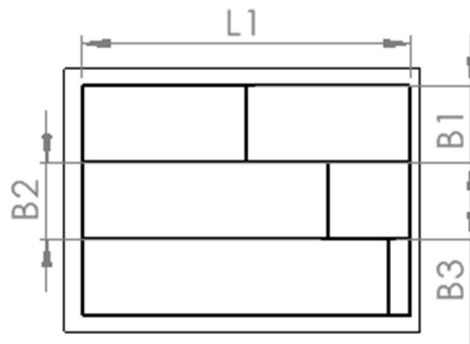


Figura 50. Representación de la leyenda para el elemento Pendientes.

En la tabla 7 se muestran los valores medios obtenidos de las medidas realizadas sobre el artefacto. Los resultados expuestos en las tablas han sido representados en las figuras 51 y 52 con el fin de evaluar las desviaciones geométricas.

Tabla 7. Medias geométricas de Pendientes.

Material	Altura de capa (mm)	Medias geométricas (mm)			
		Longitud	Ancho		
		L1	B1	B2	B3
PLA	0,1	59,78	14,14	14,17	14,16
	0,2	59,65	14,20	14,23	14,26
	0,3	59,36	14,54	14,49	14,43
ABS	0,1	60,00	14,04	14,02	14,01
	0,2	59,64	14,26	14,32	14,13
	0,3	59,95	14,40	14,41	14,33

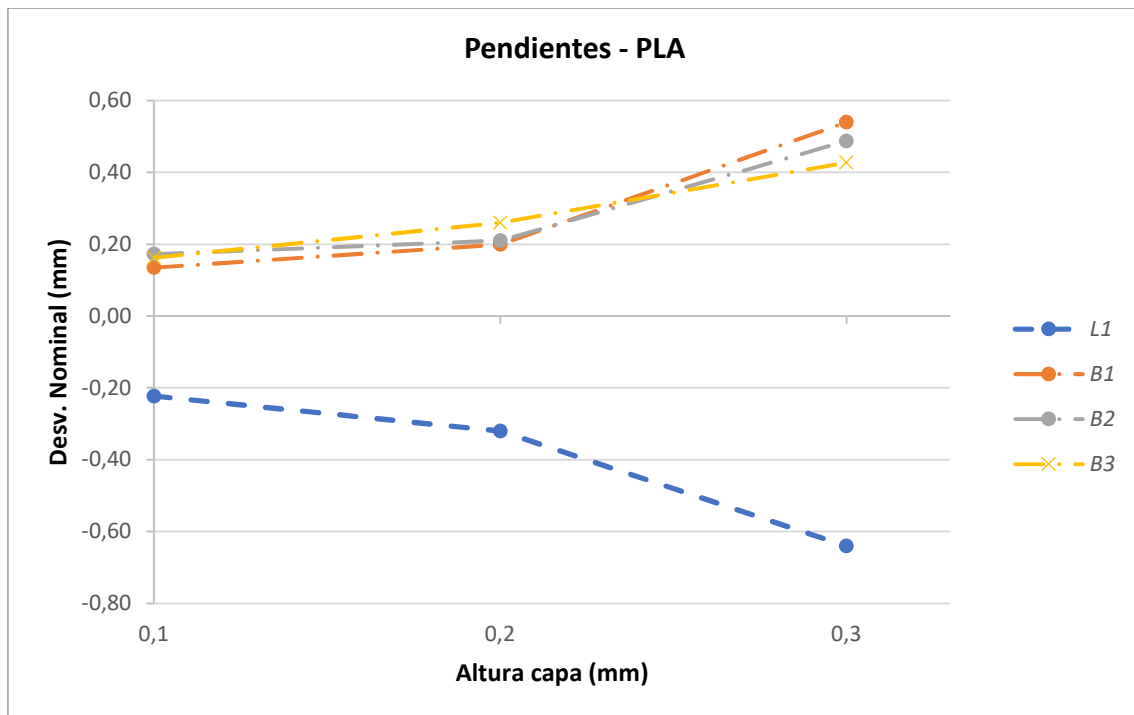


Figura 51. Variación geométrica de las Pendientes del PLA.

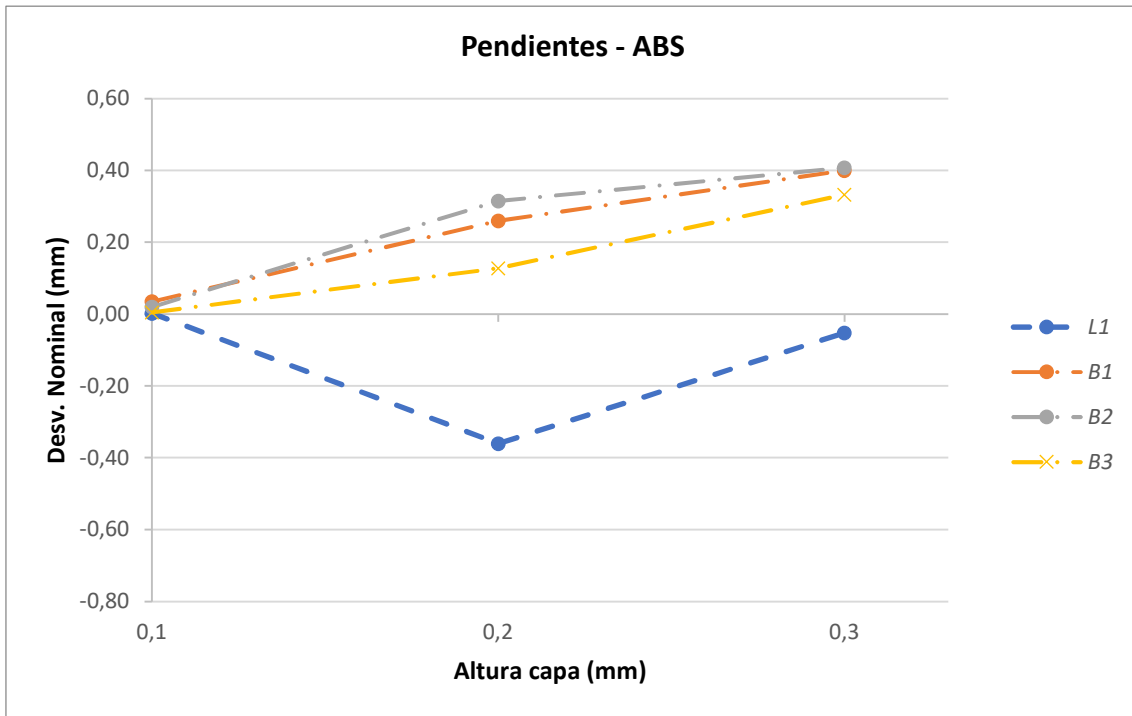


Figura 52. Variación geométrica de las Pendientes de ABS.

En este elemento también se puede apreciar como la desviación al nominal se mantiene en el mismo orden de magnitud que la altura de capa y el ancho de la boquilla extrusora. También muestra una leve mejoría en los artefactos producidos por ABS.

En contraste con las desviaciones observadas en la extrusión en forma de escaleras, no todas las desviaciones son positivas. Se puede observar cómo en el caso de *L1*, hay una desviación negativa. Esto se debe a que la dirección de deposición del material es perpendicular entre la longitud y el ancho, y en este caso, la deposición es paralela al ancho del elemento. Dependiendo de la orientación de las capas, el material puede experimentar una mayor contracción o expansión en áreas específicas, lo que puede generar desviaciones dimensionales en el objeto impreso.

- Agujeros

La leyenda utilizada de las siguientes tablas y figuras va concorde con las siguientes variables mostradas en la Figura 53.

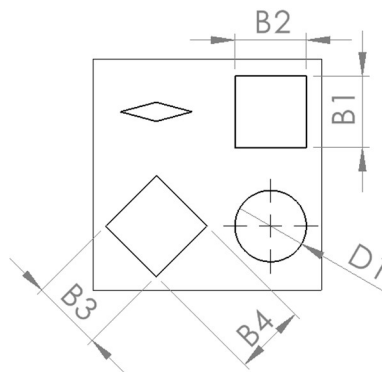


Figura 53. Representación de la leyenda para el elemento Agujeros.

En la tabla 8 se muestran los valores medios obtenidos de las medidas realizadas sobre el artefacto. Los resultados expuestos en las tablas han sido representados en las figuras 54 y 55 con el fin de evaluar las desviaciones geométricas.

Tabla 8. Medias geométricas de Agujeros.

Material	Altura de capa (mm)	Medias geométricas (mm)				
		Ancho				Diametro
		B1	B2	B3	B4	D1
PLA	0,1	14,848	14,750	14,845	14,88	14,69
	0,2	14,810	14,640	14,820	14,86	14,66
	0,3	14,813	14,565	14,708	14,86	14,47
ABS	0,1	14,875	14,798	14,890	14,94	14,69
	0,2	14,875	14,645	14,843	14,86	14,68
	0,3	14,650	14,463	14,684	14,80	14,40

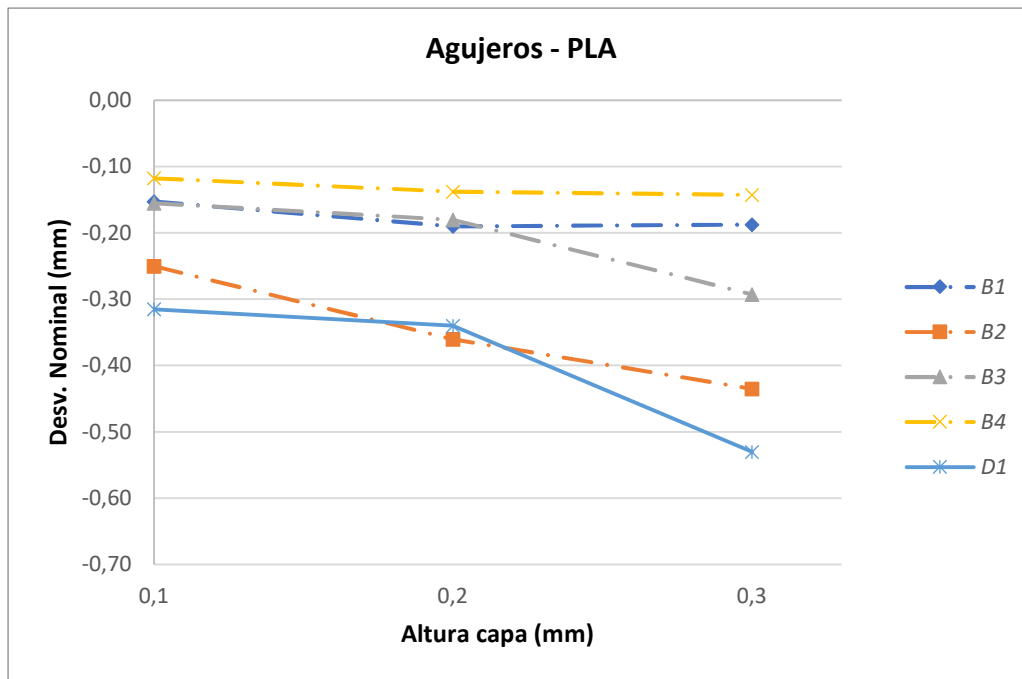


Figura 54. Variación geométrica de los Agujeros de PLA.

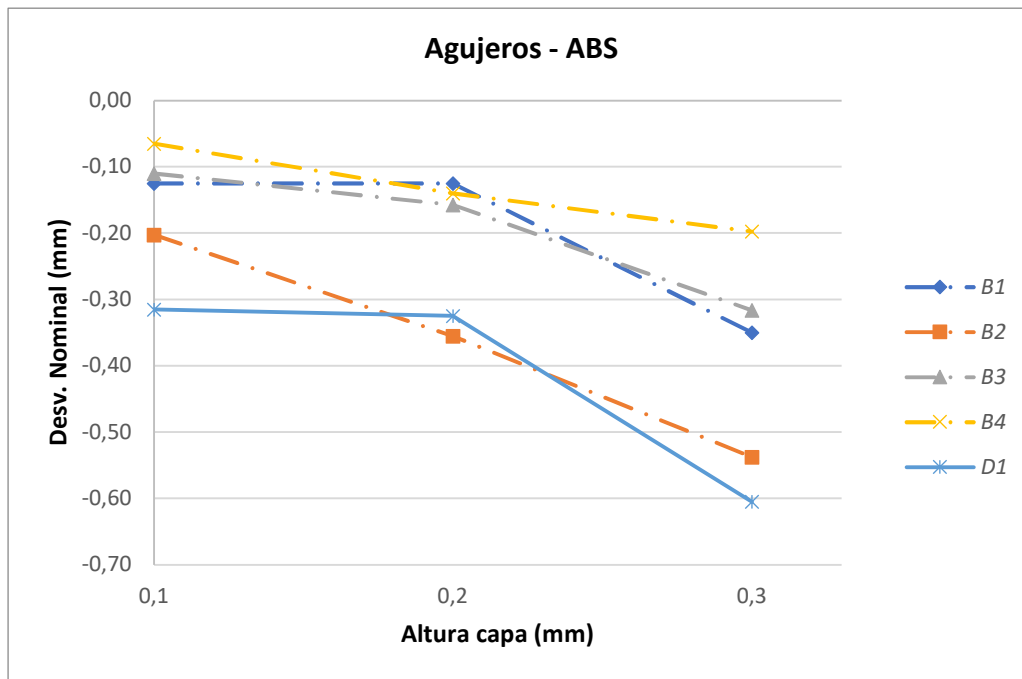


Figura 55. Variación geométrica de los Agujeros de ABS.

Los agujeros es otro de los elementos en el que se aprecia una leve mejoría la desviación nominal de todos los elementos, pero en este caso ese salto de 0,2 a 0,3 milímetros de espesor de capa.

Este elemento también se puede observar la misma tendencia que aparece en escaleras hueco, en donde todas las dimensiones de longitud tienen desviaciones nominales negativas. En este elemento el aumento de desviación es más significativo de 0,3 mm a 0,2 mm de altura de capa que de 0,2 mm a 0,1 mm.

Al comparar las desviaciones geométricas entre los materiales se observa que el ABS tiene un mejor comportamiento en 0,1 mm de altura de capa, un comportamiento similar en 0,2 mm y uno peor en 0,3 mm que el PLA.

Por otro lado, destacan las medidas de *B2* y *D1*, la cual tienen una desviación nominal diferente al resto, Por una parte, *D1* tiene una mayor desviación al resto al ser geometría diferente. Pero *B2* puede tener una mayor desviación por su proximidad al borde de la pieza.

- Torre

La leyenda utilizada de las siguientes tablas y figuras va concorde con las siguientes variables mostradas en la Figura 56.

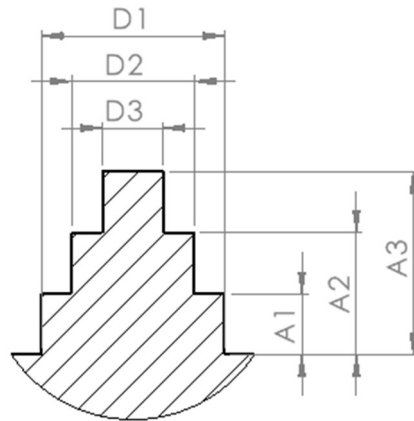


Figura 56. Representación de la leyenda para el elemento Torre.

En la tabla 9 se muestran los valores medios obtenidos de las medidas realizadas sobre el artefacto. Los resultados expuestos en las tablas han sido representados en las figuras 57 y 58 con el fin de evaluar las desviaciones geométricas.

Tabla 9. Medias geométricas de la Torre.

Material	Altura de capa	Medias geométricas (mm)					
		D1	D2	D3	A1	A2	A3
PLA	0,1 (mm)	41,973	27,985	13,998	14,01	28,00	41,95
	0,2 (mm)	41,945	27,968	14,013	14,07	27,87	41,87
	0,3 (mm)	42,253	27,953	14,008	13,75	27,74	41,78
ABS	0,1 (mm)	41,791	27,822	13,898	14,08	28,00	41,99
	0,2 (mm)	41,800	27,849	13,912	13,99	27,93	41,86
	0,3 (mm)	41,782	27,839	13,965	13,79	27,80	42,03

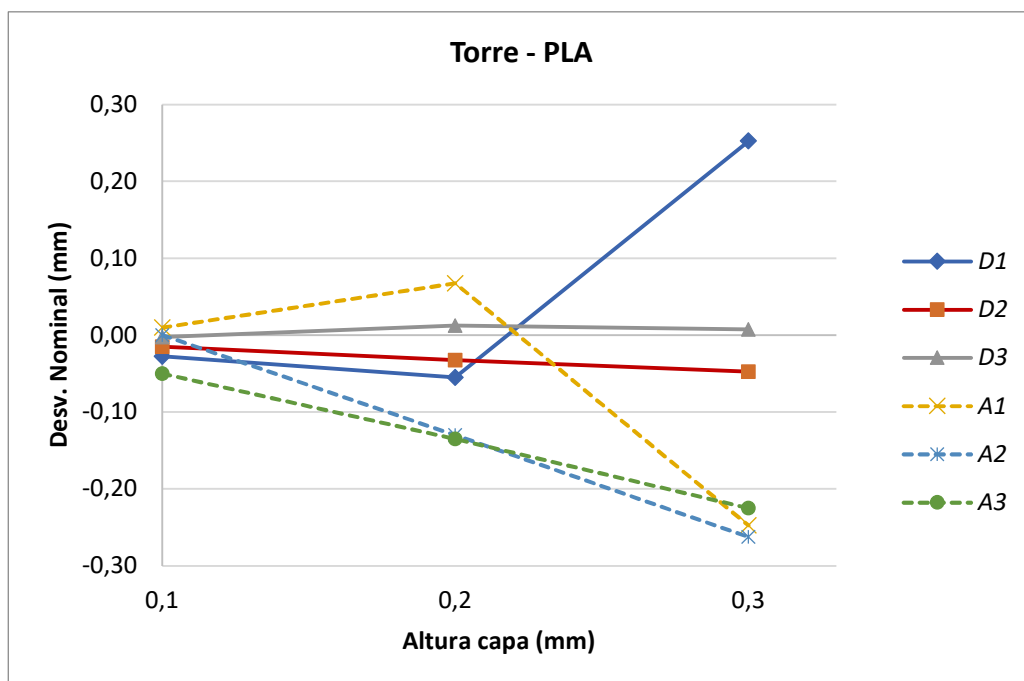


Figura 57. Variación geométrica de la Torre de PLA.

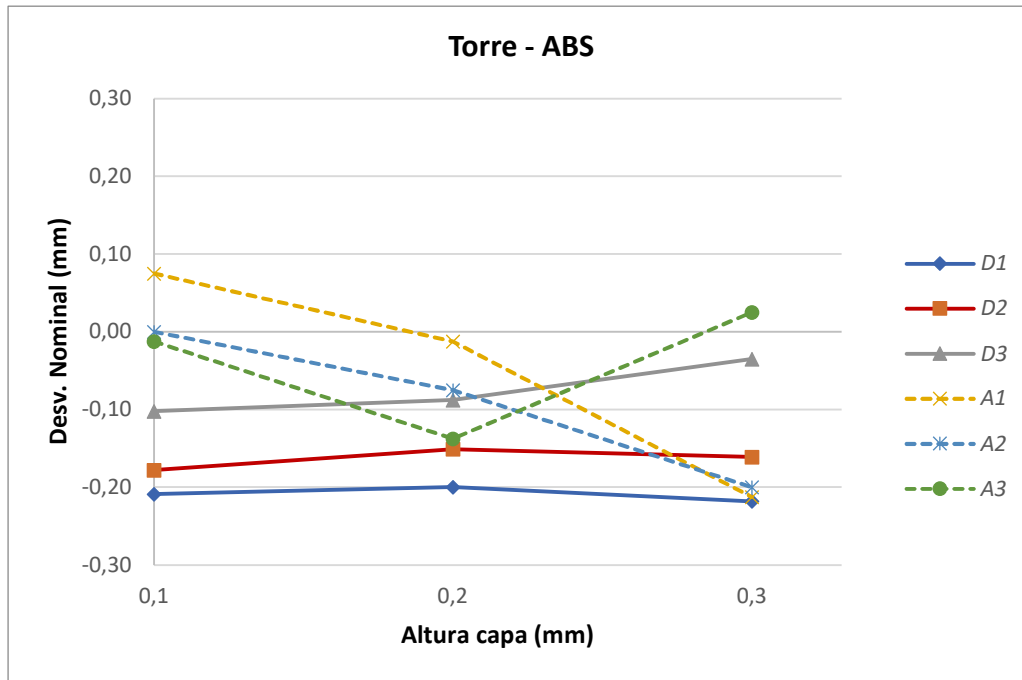


Figura 58. Variación geométrica de la Torre de ABS.

En primer lugar, podemos discutir los diámetros y su relación con la altura de capa. Se observa que la altura de capa tiene una leve influencia en las desviaciones. Sin embargo, a medida que aumenta el diámetro, también aumenta la desviación. Es importante destacar que la desviación tiende a ser negativa a diferencia de los elementos anteriormente analizados, este comportamiento puede ser diferente al estar midiendo un elemento de forma radial.

Por otra parte, al analizar la relación entre las alturas y las desviaciones, se observa que a medida que aumenta la altura de capa, también aumenta la desviación. Esto es lógico debido a que, al realizar las mediciones, se van acumulando desviaciones de geometría.

- Elementos finos

La leyenda utilizada de las siguientes tablas y figuras va concordar con las siguientes variables mostradas en la Figura 59.

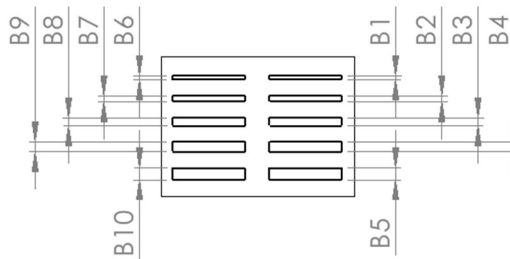


Figura 59. Representación de la leyenda para Elementos finos.

En la tabla 10 y 11 se muestran los valores medios obtenidos de las medidas realizadas sobre el artefacto. Los resultados expuestos en las tablas han sido representados en las figuras 60, 61, 62 y 63 con el fin de evaluar las desviaciones geométricas.

Tabla 10. Medias geométricas de Elementos finos Extrusión.

Material	Altura de capa (mm)	Medias geométricas (mm)				
		Extrusión				
		B1	B2	B3	B4	B5
PLA	0,1	1,08	1,59	2,12	2,62	3,08
	0,2	1,33	1,72	2,19	2,68	3,12
	0,3	1,30	1,81	2,21	2,80	3,26
ABS	0,1	1,04	1,55	2,07	2,56	3,06
	0,2	1,22	1,71	2,21	2,66	3,17
	0,3	1,24	1,78	2,26	2,82	3,31

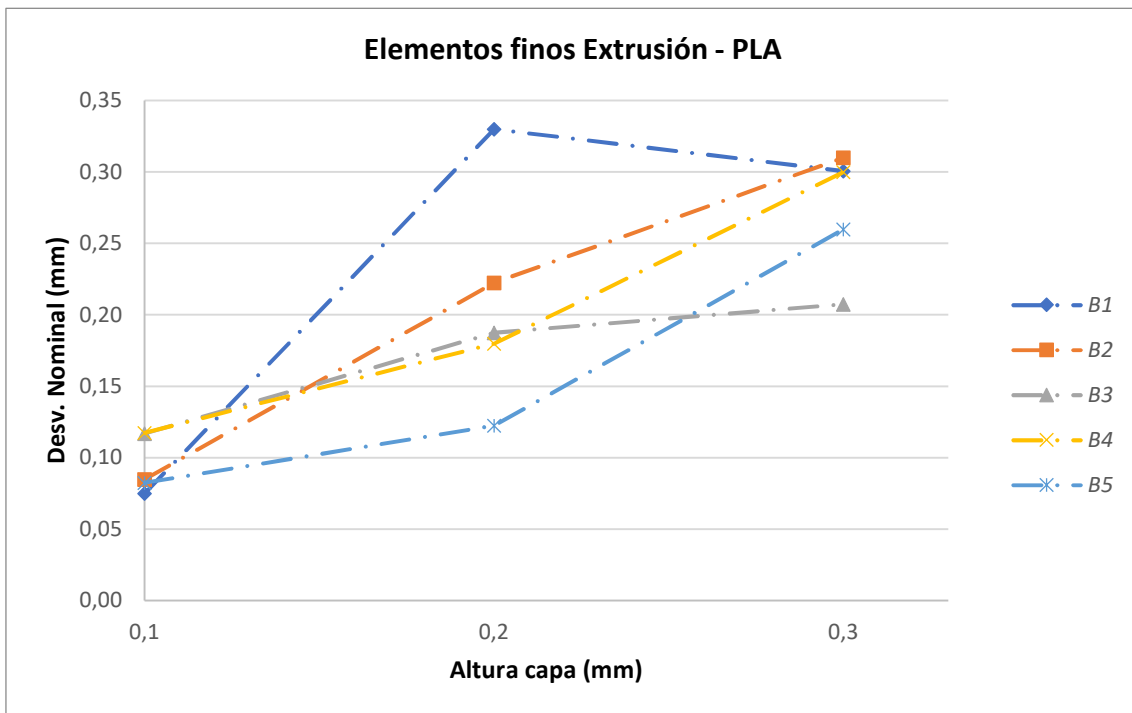


Figura 60. Variación geométrica de Elementos finos Extrusión de PLA.

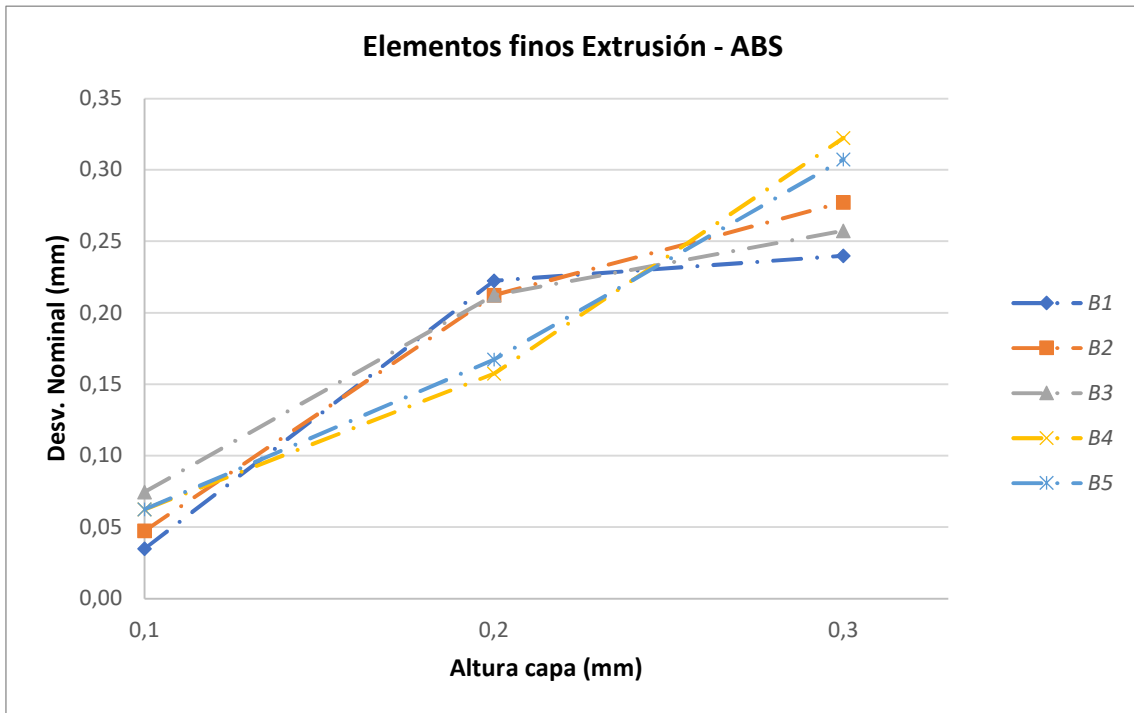


Figura 61. Variación geométrica de Elementos finos Extrusión de ABS.

Tabla 11. Medias geométricas de Elementos finos Hueco.

		Medias geométricas (mm)				
		Hueco				
Material	Altura de capa (mm)	B6	B7	B8	B9	B10
PLA	0,1	0,85	1,45	1,95	2,40	2,95
	0,2	0,85	1,40	1,95	2,45	2,95
	0,3	0,85	1,35	1,85	2,45	2,95
ABS	0,1	0,65	1,30	1,80	2,40	2,90
	0,2	0,60	1,35	1,80	2,40	2,90
	0,3	0,45	1,15	1,60	2,20	2,70

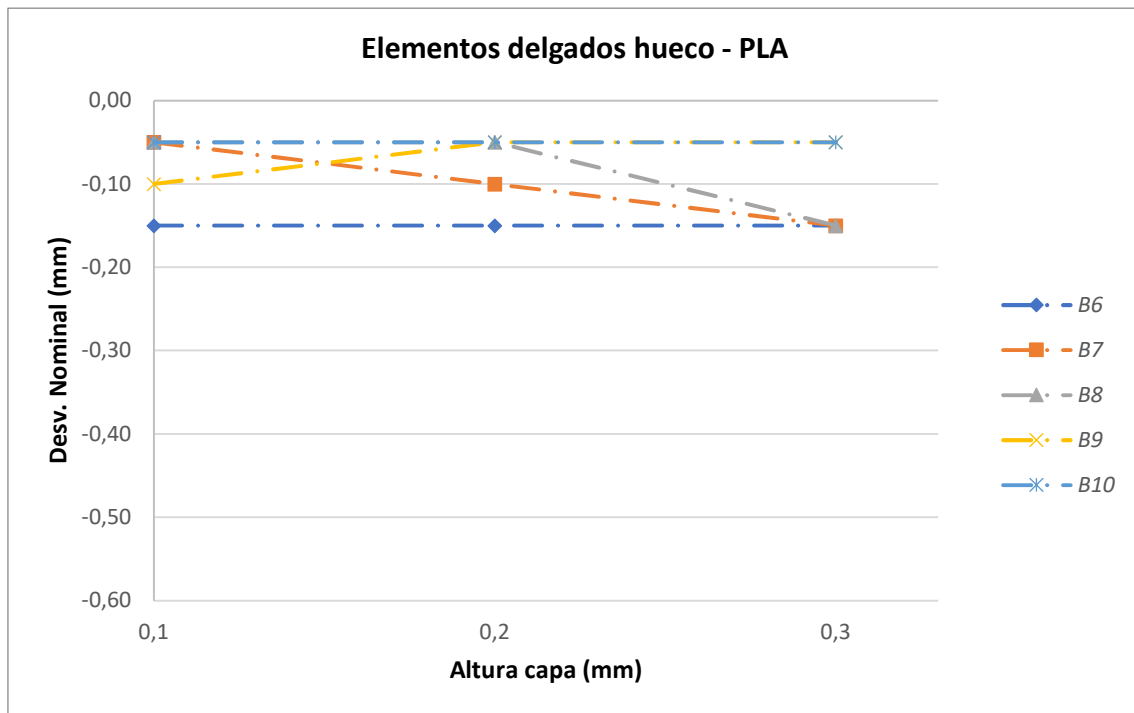


Figura 62. Variación geométrica de Elementos finos Hueco de PLA.

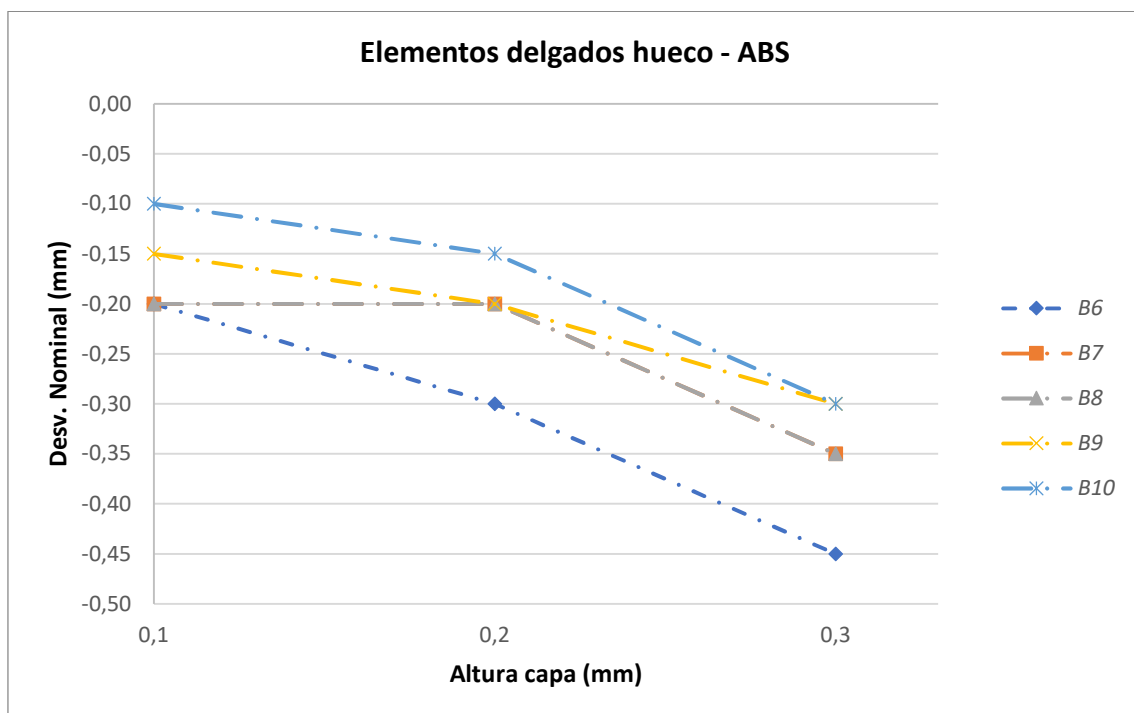


Figura 63. Variación geométrica de Elementos finos Hueco de ABS.

En el caso de los elementos finos de extrusión en ambos materiales, se puede observar que a medida que aumenta la altura de capa, también aumenta la magnitud de las desviaciones geométricas. Esta desviación nominal coincide con las dimensiones de la altura de capa.

En la desviación media de elementos finos hueco es más difícil apreciar la relación con la altura de capa. Esto en parte puede que haya sido producido porque es el único

elemento de nuestro artefacto que ha sido medido con un juego de galgas de espesores siendo este el instrumento de medida con menor resolución.

Finalmente, este elemento mantiene un patrón similar a las Escaleras, manteniendo desviaciones positivas en la extrusión y negativos en el hueco. Con una aproximación mayor al valor nominal con los artefactos de ABS para la extrusión, pero menor para el hueco en comparación con el PLA.

- Pirámides

La leyenda utilizada de las siguientes tablas y figuras va concorde con las siguientes variables mostradas en la Figura 63.

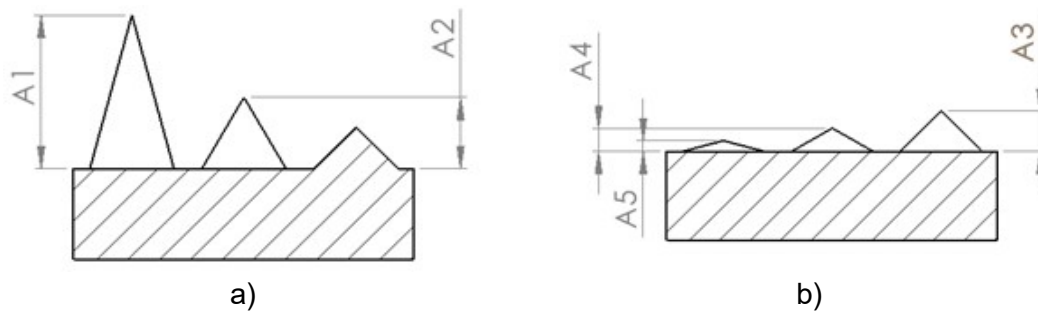


Figura 64. Representación de la leyenda para el elemento Pirámides (a) Perfil frontal (b) Perfil posterior.

En la tabla 12 se muestran los valores medios obtenidos de las medidas realizadas sobre el artefacto. Los resultados expuestos en las tablas han sido representados en las figuras 65 y 66 con el fin de evaluar las desviaciones geométricas.

Tabla 12. Medias geométricas de Pirámides.

		Medias geométricas (mm)				
		Altura				
Material	Altura de capa (mm)	A1	A2	A3	A4	A5
PLA	0,1	32,35	15,14	10,35	5,90	1,60
	0,2	32,35	14,95	9,00	5,30	2,05
	0,3	31,90	14,92	8,45	4,65	2,45
ABS	0,1	31,95	14,74	8,56	5,05	2,35
	0,2	31,71	14,66	8,58	4,91	2,26
	0,3	31,92	14,56	8,46	4,88	2,21

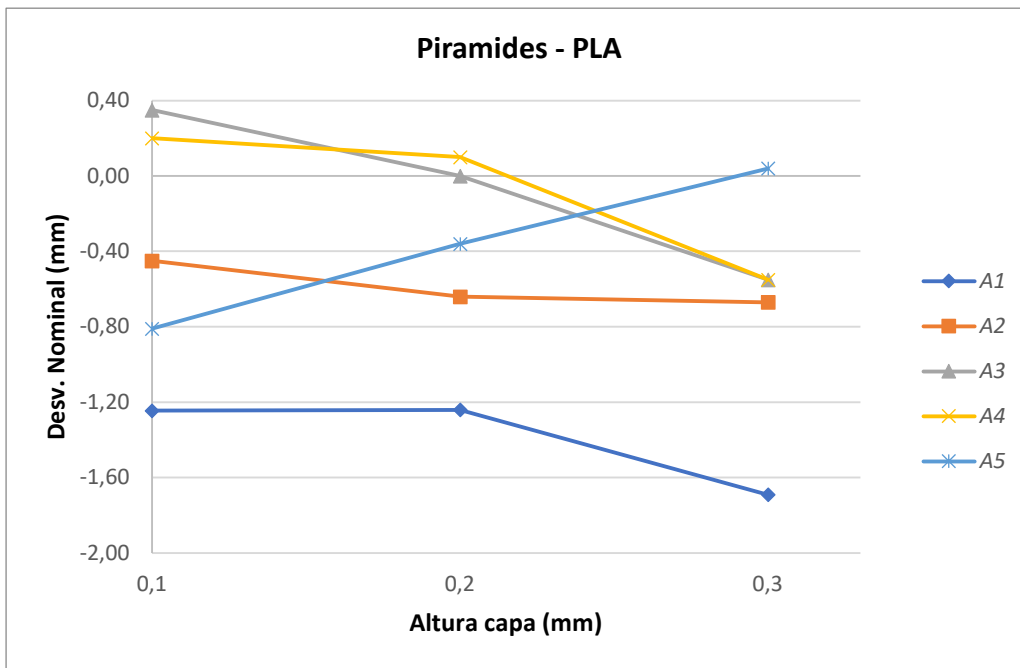


Figura 65. Variación geométrica de la Pirámides de PLA.

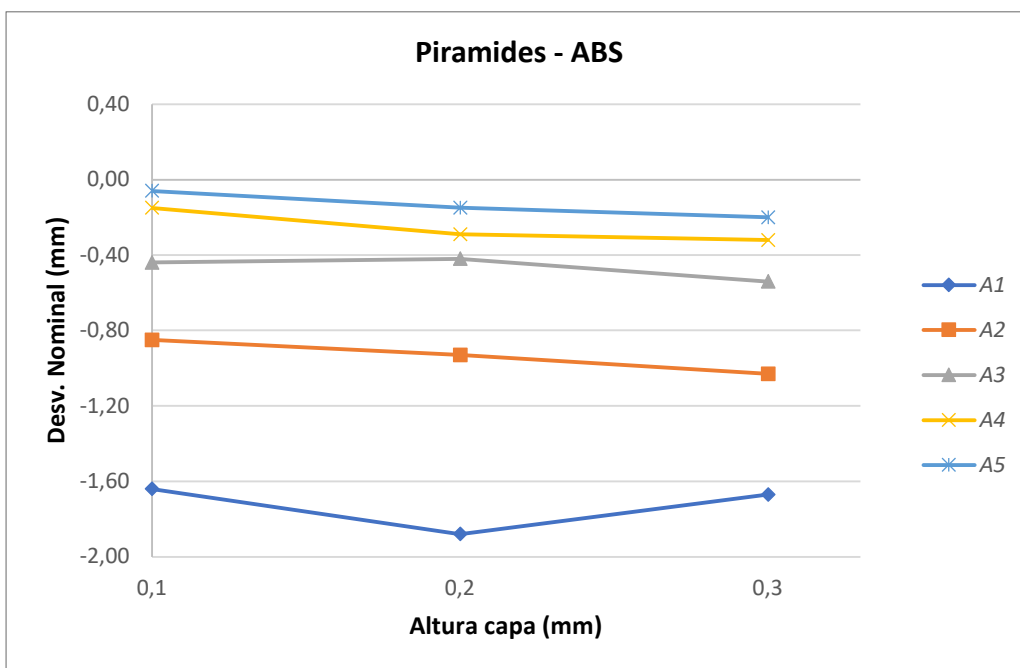


Figura 66. Variación geométrica de la Pirámides de ABS.

Las pirámides muestran una leve relación con la altura de capa, donde sí se puede apreciar una relación es entre la altura de la pirámide y la desviación nominal, por lo que podemos deducir que cuanto más alta sea la pirámide mayor será su desviación.

Este es el único elemento donde las desviaciones nominales superan considerablemente la altura de capa utilizada en la impresión. Esto se puede deber a la forma específica que tiene el elemento.

4.3. Evaluación de desviaciones micro geométricas

En este apartado se va a realizar un análisis de la medida de rugosidad superficial realizado sobre los tres elementos mencionados en la metodología experimental: la torre, las escaleras extrusión y pendientes. Estos resultados se exponen en las siguientes tablas, diferenciando entre la rugosidad media aritmética (Ra) y la máxima altura del perfil (Rz) y volviéndola a comparar con la altura de capa.

- Torre

La leyenda utilizada de las siguientes tablas y figuras va a concordar con las siguientes variables mostradas en la Figura 67.

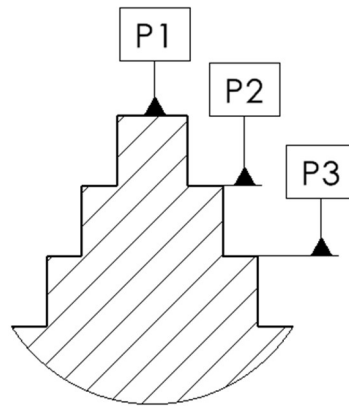


Figura 67. Representación de planos de rugosidad analizados para el elemento "Torre".

En la tabla 13 se muestran los valores obtenidos de rugosidad. Los resultados expuestos en las tablas han sido representados en las figuras 68 y 69 con el fin de evaluar las desviaciones micro geométricas.

Tabla 13. Valores obtenidos de Ra y Rz para la Torre.

Material	Altura de capa (mm)	Rugosidad (μm)					
		P1		P2		P3	
		Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
PLA	0,1	5,179	29,862	5,414	28,414	4,941	25,054
	0,2	11,973	84,613	4,256	33,769	4,148	21,723
	0,3	13,739	65,018	8,330	50,017	13,488	65,659
ABS	0,1	4,458	33,083	6,114	40,074	13,624	68,927
	0,2	7,208	51,389	5,722	40,805	6,882	61,700
	0,3	14,998	87,439	17,124	99,250	28,515	166,840

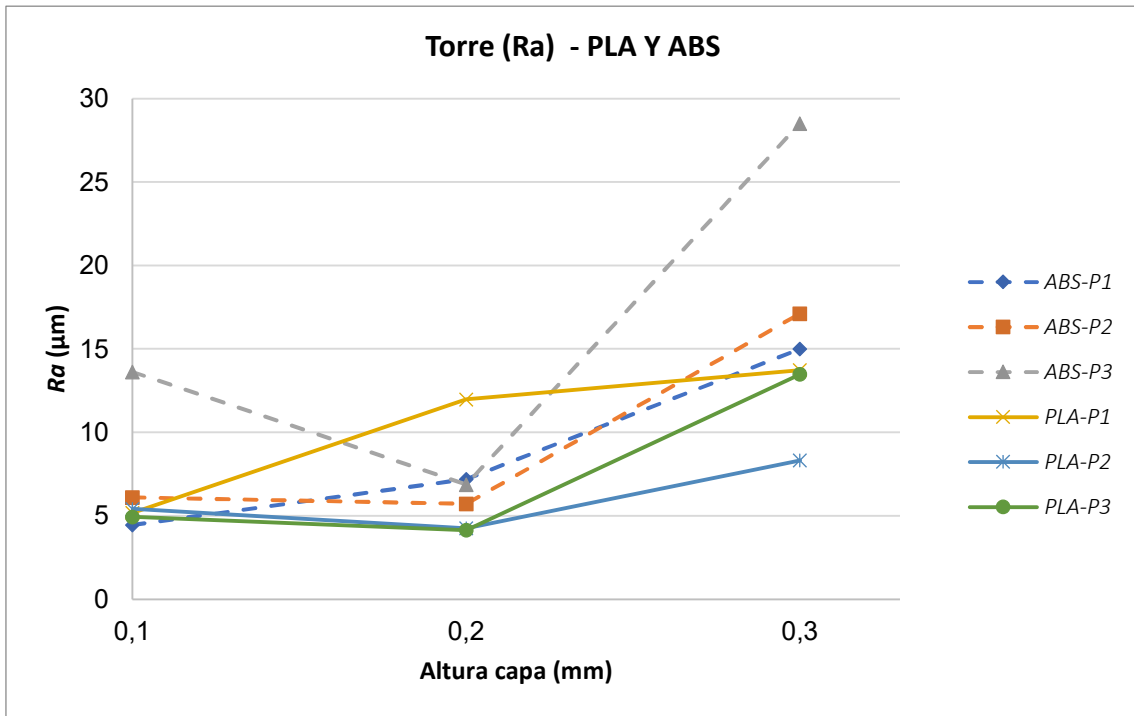


Figura 68. Rugosidad media aritmética de la Torre en PLA y ABS.

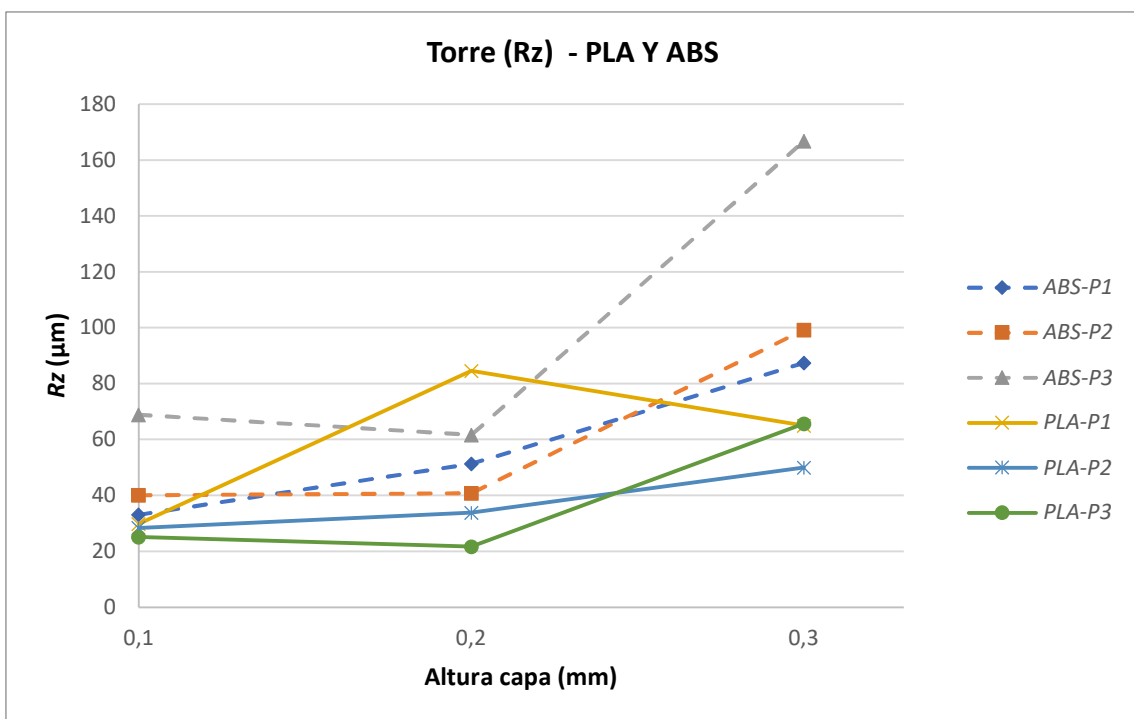


Figura 69. Máxima altura de perfil de la Torre en PLA y ABS.

En este elemento se observa un aumento de la rugosidad con el aumento de la altura de capa, especialmente en el salto de 0,2 mm a 0,3 mm.

Por otro lado, el ABS presenta una rugosidad ligeramente mayor que el PLA, esta diferencia se puede producir ya que el ABS tiene una expansión térmica mayor que el PLA.

- Escaleras

La leyenda utilizada de las siguientes tablas y figuras va acorde con las siguientes variables mostradas en la Figura 70:

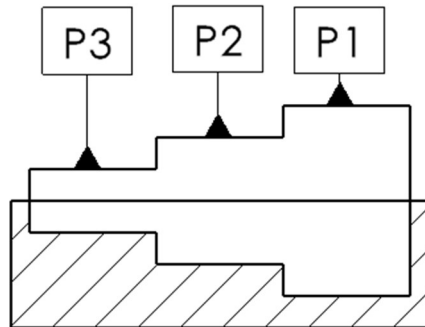


Figura 70. Representación de planos de rugosidad analizados del elemento “Escaleras”.

En la tabla 14 se muestran los valores obtenidos de rugosidad. Los resultados expuestos en las tablas han sido representados en las figuras 71 y 72 con el fin de evaluar las desviaciones micro geométricas.

Tabla 14. Valores obtenidos de R_a y R_z para las Escaleras.

Material	Altura de capa (mm)	Rugosidad (μm)					
		P1		P2		P3	
		R_a	R_z	R_a	R_z	R_a	R_z
PLA	0,1	3,789	19,933	4,860	22,112	3,059	14,053
	0,2	18,884	111,010	5,327	41,880	7,294	48,492
	0,3	14,056	70,537	7,995	46,440	17,799	91,685
ABS	0,1	12,597	84,431	5,133	43,954	14,233	91,077
	0,2	16,540	112,900	5,350	46,980	14,066	83,092
	0,3	27,790	158,790	15,765	93,291	29,384	176,270

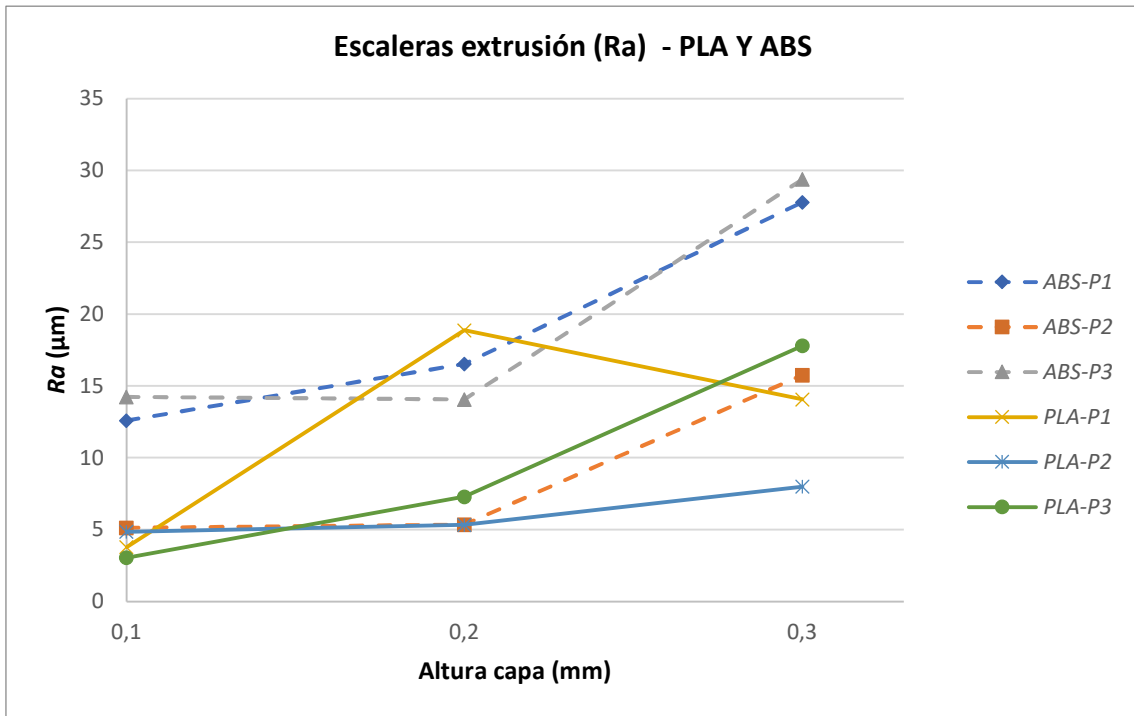


Figura 71. Rugosidad media aritmética de las Escaleras en PLA y ABS.

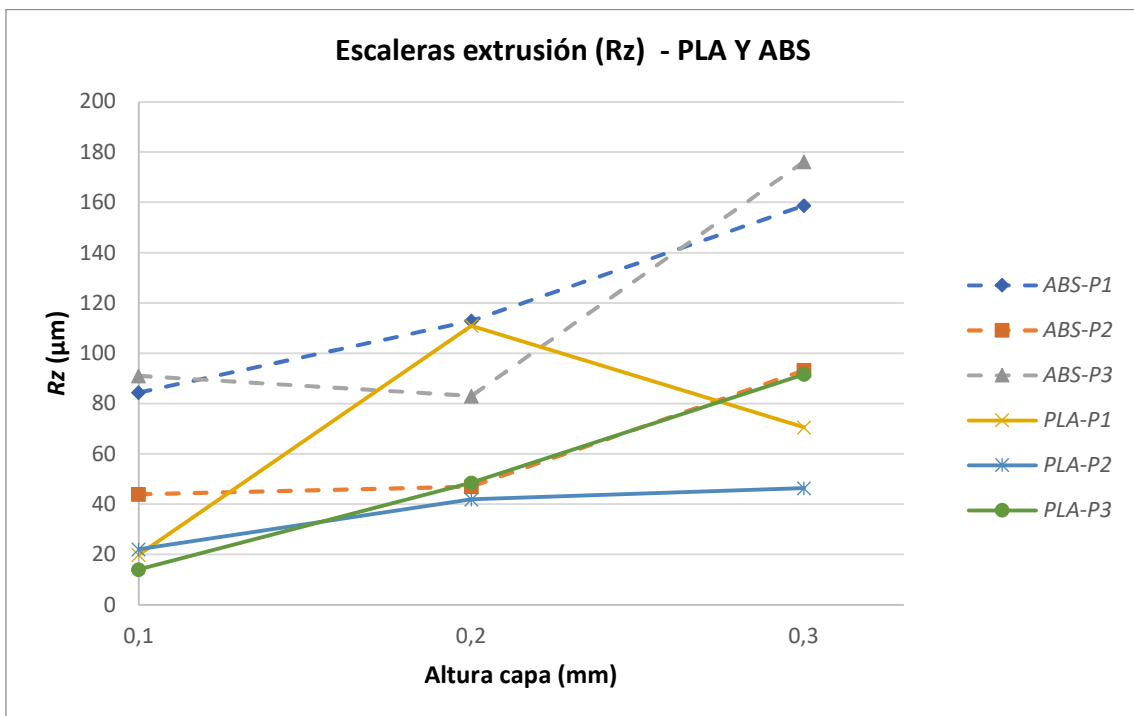


Figura 72. Máxima altura de perfil de las Escaleras en PLA y ABS.

Este elemento presenta similitudes con la Torre, ya que las caras analizadas también son paralelas entre sí y no presentan ninguna inclinación. También presentando el incremento de rugosidad según la altura de capa y como el PLA generalmente presenta una menor rugosidad que el ABS.

- Pendientes

La leyenda utilizada de las siguientes tablas y figuras va acorde con las siguientes variables mostradas en la Figura 73:

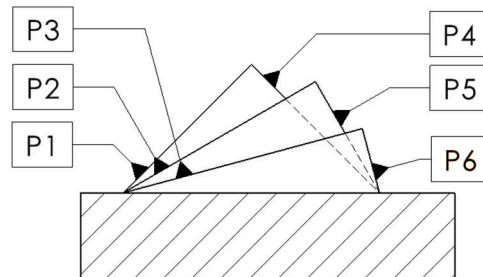


Figura 73. Representación de planos de rugosidad analizados del elemento “Pendientes”.

En la tabla 15 y 16 se muestran los valores obtenidos de rugosidad. Los resultados expuestos en las tablas han sido representados en las figuras 74, 75, 76 y 77 con el fin de evaluar las desviaciones micro geométricas.

Tabla 15. Valores obtenidos de Ra y Rz para las pendientes 15-45°.

		Pendientes					
		P1(45°)		P2(30°)		P3(15°)	
Material	Altura de capa (mm)	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
PLA	0,1	12,729	66,390	19,032	72,920	22,784	86,231
	0,2	26,521	110,910	36,294	134,940	21,706	116,360
	0,3	38,390	149,180	39,033	157,920	19,521	97,587
ABS	0,1	14,802	77,700	19,910	89,160	23,310	95,450
	0,2	28,565	125,710	39,220	153,870	38,340	170,520
	0,3	46,234	213,930	67,280	294,900	44,990	198,010

Tabla 16. Valores obtenidos de Ra y Rz para las pendientes 45-75°.

		Pendientes					
		P4(45°)		P5(60°)		P6(75°)	
Material	Altura de capa (mm)	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
PLA	0,1	13,544	67,975	10,570	57,666	15,431	76,670
	0,2	27,524	110,610	18,180	82,480	22,216	104,720
	0,3	38,409	146,270	28,456	126,330	25,555	104,180
ABS	0,1	15,648	80,839	11,908	70,581	9,484	56,224
	0,2	29,679	136,270	20,296	99,332	16,170	82,673
	0,3	44,897	200,220	34,111	180,760	25,786	133,090

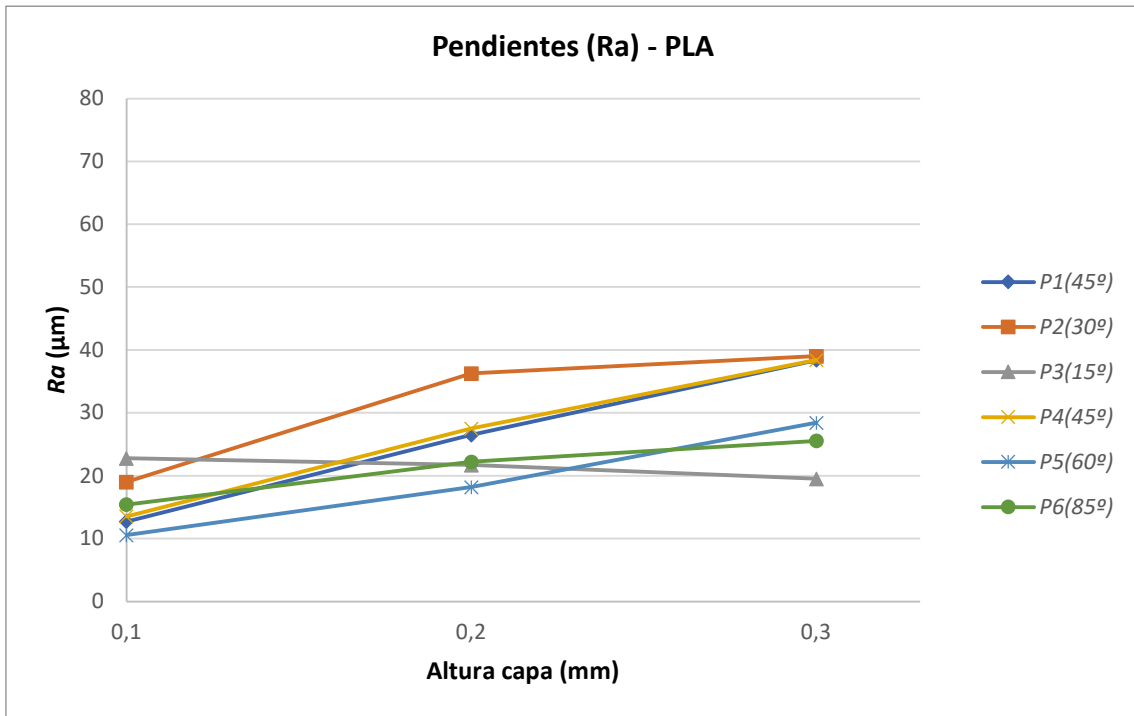


Figura 74. Rugosidad media aritmética de las Pendientes en PLA.

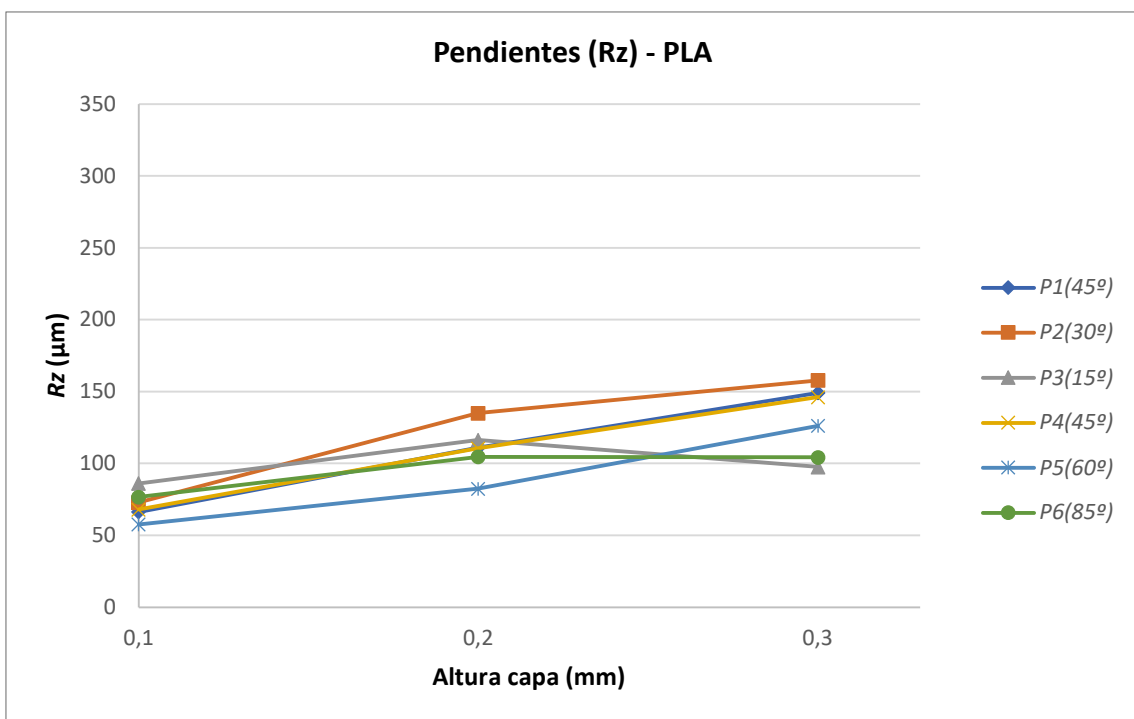


Figura 75. Máxima altura de perfil de las Pendientes en PLA.

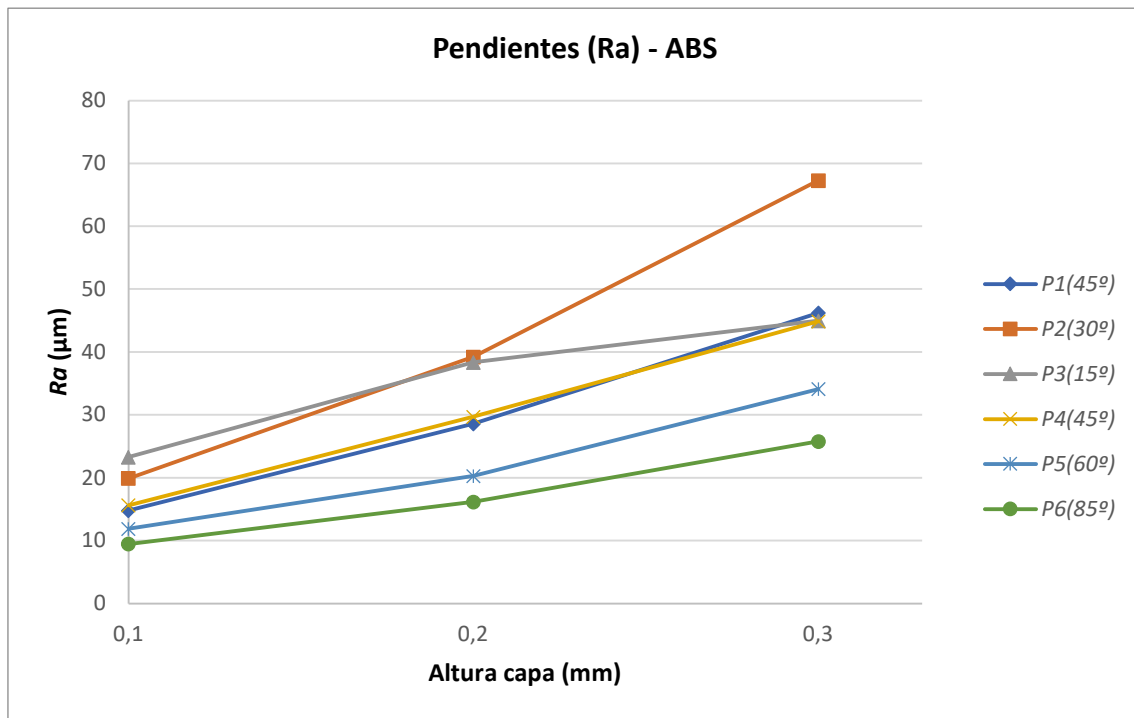


Figura 76. Rugosidad media aritmética de las Pendientes en ABS.

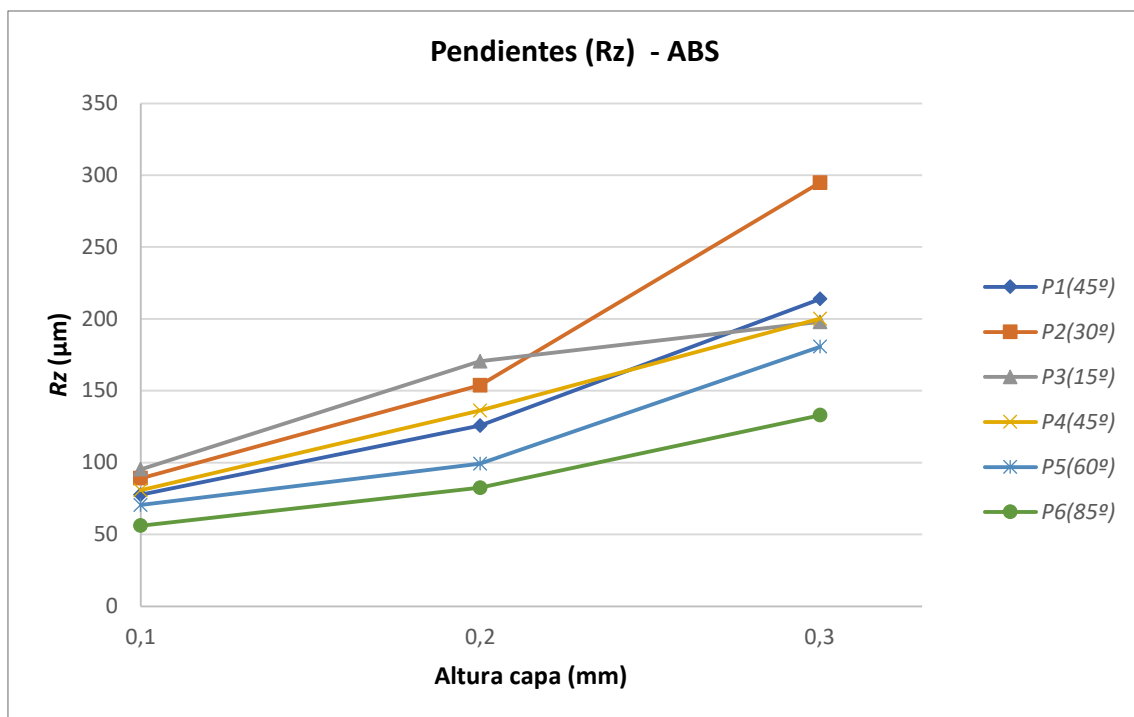


Figura 77. Máxima altura de perfil de las Pendientes en ABS.

Los datos recopilados muestran una relación entre la rugosidad en las pendientes y la altura de capa en este estudio. Los resultados obtenidos han demostrado de manera concluyente que a medida que aumenta la inclinación de las superficies, la rugosidad disminuye. Esto se produce por la forma en la que las capas se superponen para formar la inclinación de la superficie.

Este hallazgo es de gran importancia, ya que proporciona una comprensión más profunda de cómo la altura de capa utilizada en la impresión 3D puede afectar la calidad y la suavidad de las superficies inclinadas.

Además, se puede apreciar que los artefactos impresos en PLA presentan una menor rugosidad, lo cual se atribuye a la menor dilatación térmica del material en comparación con el ABS.

4.4. Evaluación de desviaciones macro geométricas

En este apartado se va a realizar un análisis de todos los resultados obtenidos de la medidora de forma, en el ensayo de desviaciones macro geométricas.

- Redondez

En la tabla 17 se muestran los valores medios de redondez obtenidos. Los resultados expuestos en las tablas han sido representados en la figura 78 con el fin de evaluar las desviaciones macro geométricas.

Tabla 17. Redondez media obtenida de la medidora de forma.

Altura de capa	Redondez Media (μm)					
	PLA			ABS		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3
0,1 (mm)	301,70	264,22	66,75	276,63	216,24	102,55
0,2 (mm)	293,84	301,65	133,35	341,74	576,21	145,37
0,3 (mm)	300,14	411,17	175,47	346,96	533,99	189,75

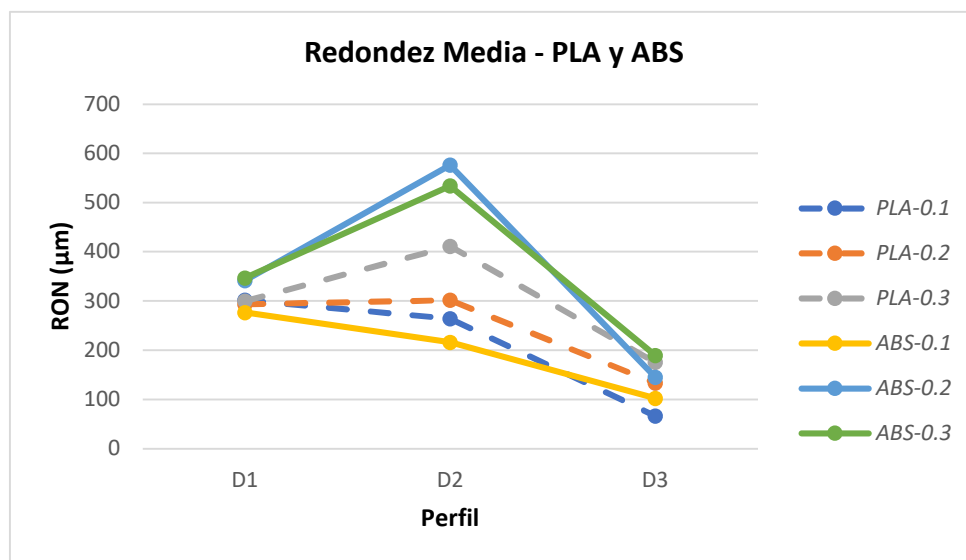


Figura 78. Redondez media de los diferentes diámetros de la torre en PLA y ABS.

Por otra parte, se aprecia como la disminución de la altura de capa disminuye la redondez media del artefacto. Y como el PLA y ABS se comporta de forma similar en el artefacto de 0,1 mm de altura de capa, pero el PLA tiene una menor redondez media en los demás casos.

Pero principalmente se observa que la redondez media de los elementos tiene una tendencia a disminuir conforme disminuye el diámetro del elemento estudiado. Esto se puede deber a la resolución de la impresora para imprimir elementos radiales. De forma que a medida que el diámetro se reduce, la precisión para representar una forma redondeada también disminuye.

- Cilindricidad

En la tabla 18 se muestran los valores medios de redondez obtenidos. Los resultados expuestos en las tablas han sido representados en la figura 79 con el fin de evaluar las desviaciones macro geométricas.

Tabla 18. Cilindricidad media obtenida de la medidora de forma.

Altura de capa	Cilindricidad Media (μm)					
	PLA			ABS		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3
0,1 (mm)	351,31	296,90	71,52	325,75	245,69	109,94
0,2 (mm)	324,28	326,84	138,62	403,55	611,71	152,06
0,3 (mm)	421,48	436,06	180,26	381,01	574,82	195,43

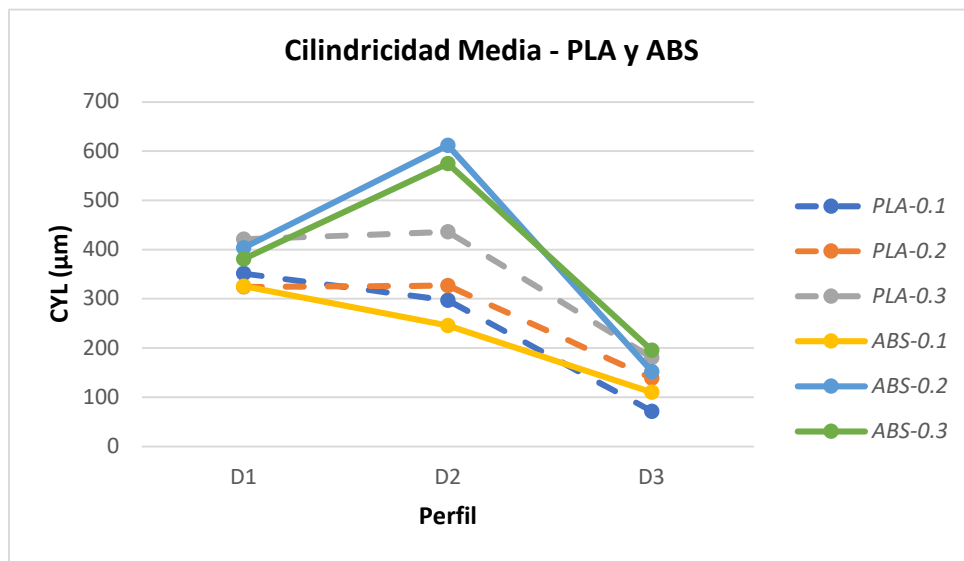


Figura 79. Cilindricidad media de los diferentes diámetros de la torre en PLA y ABS.

Al analizar los datos, se pueden observar las mismas tendencias en las desviaciones de redondez, donde el piso con menor diámetro también presenta una menor cilindruidad.

- Rectitud

En la tabla 19 se muestran los valores medios de redondez obtenidos. Los resultados expuestos en las tablas han sido representados en la figura 80 con el fin de evaluar las desviaciones macro geométricas.

Tabla 19. Rectitud media obtenida de la medidora de forma.

Altura de capa	Rectitud Media (μm)					
	PLA			ABS		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3
0,1 (mm)	35,22	34,40	21,01	31,86	45,26	38,02
0,2 (mm)	48,91	43,89	35,29	45,47	45,47	35,72
0,3 (mm)	55,29	66,04	36,89	67,69	63,95	46,10

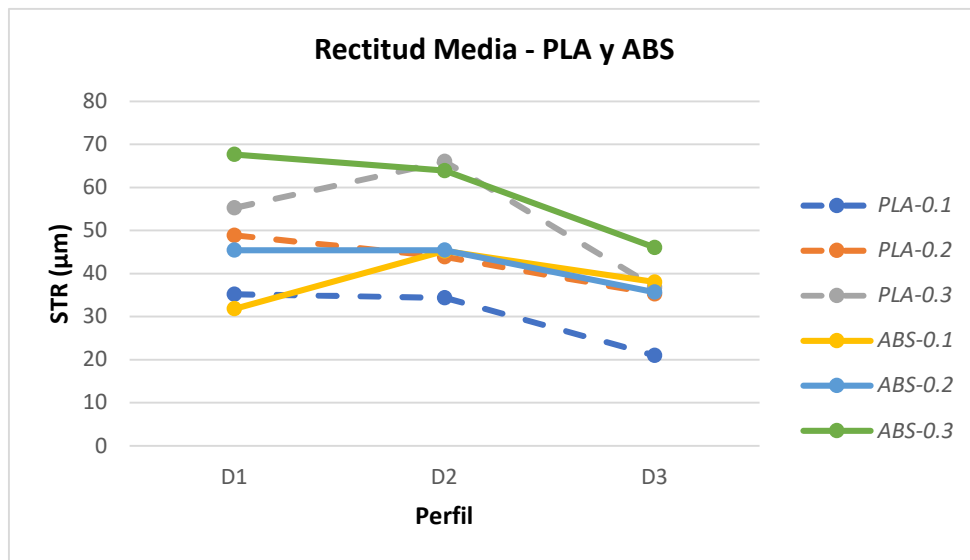


Figura 80. Rectitud media de los diferentes diámetros de la torre en PLA y ABS.

En la figura 80 se puede apreciar en diferencia al análisis de cilíndricidad y de redondez, que el diámetro de la torre no afecta a la rectitud de la cara. En este caso sí se puede apreciar como al disminuir la altura de capa mejora la rectitud del elemento de forma leve y como los artefactos de PLA y ABS se comporta de manera similar.

Capítulo 5: Conclusiones

5. Conclusiones

En este apartado se van a exponer todas las conclusiones que se han reunido al realizar el análisis de los resultados obtenidos.

Tras realizar el control dimensional de todos los artefactos, se puede observar que existe una correlación entre la altura de capa y la desviación nominal en la mayoría de los elementos. En particular, a menor altura de capa, menor es la desviación nominal en la mayoría de los elementos evaluados.

Por una parte, las medidas realizadas a los elementos de extrusión en general han sido desviaciones nominales positivas y los huecos negativos. Esto se produce porque el artefacto tiende a expandirse.

Por otra parte, al comparar materiales en el análisis de desviaciones geométricas, de forma general el PLA ha tenido una desviación nominal menor en los elementos en comparación con el ABS. Esto principalmente se ha producido por el diferente coeficiente de expansión térmica que tienen ambos materiales, siendo el ABS el material con una mayor expansión térmica.

En el análisis de desviaciones microgeométricas, también se observa una leve mejora en todos los aspectos al disminuir la altura de capa, aunque destaca una mayor influencia de la altura de capa en las paredes inclinadas. Igual que en las desviaciones geométricas los artefactos de PLA tienen una menor rugosidad media aritmética.

El análisis de desviaciones macrogeométricas se observa como el parámetro principal en el análisis de redondez y cilíndricidad es el diámetro del elemento analizado, y posteriormente la altura, donde a menores diámetros se observa un mayor valor de desviación debido a una menor resolución del equipo de fabricación aditiva.

Respecto al material en las desviaciones macrogeométricas, el PLA tiene una menor desviación, especialmente en los elementos de 0,2 mm y 0,3 mm de altura de capa. En relación con los artefactos con una altura de capa de 0,1 mm, tanto el ABS como el PLA han mostrado una desviación similar.

Basándonos en todas las mediciones realizadas, se puede considerar que el diseño del artefacto ha sido exitoso, permitiendo analizar el efecto de cómo se ha llevado a cabo la deposición del material en las desviaciones dimensionales y geométricas, tanto a nivel macro como a nivel microgeométrico.

5.1. Líneas futuras de investigación

Finalmente, tras el análisis de resultados y la exposición de conclusiones, proponemos diferentes líneas futuras de investigación las cuales podrán desarrollar en profundidad y ampliar el conocimiento de este campo.

- Aumentar el rango de alturas de capa, aumentando el número artefactos ensayados a diferentes alturas.
- Estudiar y analizar con los mismos parámetros otro material.
- Estudiar la influencia de otros parámetros de impresión diferentes como: velocidades de impresión, temperaturas de impresión, tipo y porcentaje de relleno, entre otros.
- Estudiar y analizar ensayos de repetibilidad imprimiendo el mismo artefacto con los mismos parámetros, haciendo una comparativa entre ellos.

Capítulo 6: Bibliografía

6. Bibliografía

- [1] Standard, A.S.T.M., 2012. Standard terminology for additive manufacturing technologies. *ASTM International F2792-12a*.
- [2] Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B. and Khorasani, M., 2021. *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17). Cham, Switzerland: Springer.
- [3] Shahrubudin, N., Lee, T.C. and Ramlan, R., 2019. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, 35, pp.1286-1296.
- [4] Tofail, S.A., Koumoulos, E.P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L. and Charitidis, C., 2018. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*, 21(1), pp.22-37.
- [5] Yap, Y.L., Tan, Y.S.E., Tan, H.K.J., Peh, Z.K., Low, X.Y., Yeong, W.Y., Tan, C.S.H. and Laude, A., 2017. 3D printed bio-models for medical applications. *Rapid prototyping journal*.
- [6] Mendricky, R.A.D.O.M.I.R., 2016. Accuracy analysis of additive technique for parts manufacturing. *MM Science Journal*, 2016(5), pp.1502-1508.
- [7] Low, Z.X., Chua, Y.T., Ray, B.M., Mattia, D., Metcalfe, I.S. and Patterson, D.A., 2017. Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques. *Journal of membrane science*, 523, pp.596-613.
- [8] Mounde, A. (2019). 'Adaption of 3D Printing for Manufacturing in Kenya', *Innovation Research Symposium*. University of Nairobi, Nairobi, 8 March.
- [9] Ventola, C.L., 2014. Medical applications for 3D printing: current and projected uses. *Pharmacy and Therapeutics*, 39(10), p.704.
- [10] Song, J.L., Li, Y.T., Deng, Q.L. and Hu, D.J., 2007. Rapid prototyping manufacturing of silica sand patterns based on selective laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology*, 187, pp.614-618.
- [11] Silbernagel, C., 2018. Additive Manufacturing 101-4: What is material jetting?. *Canada Makers*.
- [12] *3D Printing – Additive* (2018) *3DEXPERIENCE platform*. Available at: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/3D-printing> (Ultima visita: November 7, 2022).
- [13] *Binder jetting. Additive Manufacturing Research Group*. Available at: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/> (Ultima visita: November 7, 2022).
- [14] Vijayavenkataraman, S., Fuh, J.Y. and Lu, W.F., 2017. 3D printing and 3D bioprinting in pediatrics. *Bioengineering*, 4(3), p.63.

- [15] *Sheet lamination. Additive Manufacturing Research Group*. Available at: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sh eetlamination/> (Ultima visita: November 7, 2022).
- [16] Horst, D.J., Duvoisin, C.A. and de Almeida Vieira, R., 2018. Additive manufacturing at Industry 4.0: a review. *International journal of engineering and technical research*, 8(8), p.264786.
- [17] Trevisan, F., Calignano, F., Aversa, A., Marchese, G., Lombardi, M., Biamino, S., Ugues, D. and Manfredi, D., 2018. Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications. *Journal of applied biomaterials & functional materials*, 16(2), pp.57-67.
- [18] Anusci, V. (2015) *World first: Cancer patient receives 3D printed sternum, All3DP*. Available at: <https://all3dp.com/world-first-cancer-patient-receives-3d-printed-sternum/> (Accessed: January 7, 2023).
- [19] Caminero, M.A., Chacón, J.M., García-Moreno, I. and Rodríguez, G.P., 2018. Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*, 148, pp.93-103.
- [20] Dizon, J.R.C., Espera Jr, A.H., Chen, Q. and Advincula, R.C., 2018. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive manufacturing*, 20, pp.44-67.
- [21] Baldassarre, F. and Ricciardi, F., 2017. The additive manufacturing in the Industry 4.0 Era: the case of an Italian FabLab. *Journal of Emerging Trends in Marketing and Management*, 1(1), pp.105-115.
- [22] Marphil and Déborah (2019) *Cómo utilizar una impresora 3D para cerámica, Marphil Tienda Cerámica*. Available at: <https://www.marphil.com/como-utilizar-una-impresora-3d-para-ceramica/> (Ultima visita: January 7, 2023).
- [23] Lee, J.Y., An, J. and Chua, C.K., 2017. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Applied materials today*, 7, pp.120-133.
- [24] Yang, Y., Chen, Y., Wei, Y. and Li, Y., 2016. 3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(9), pp.2079-2095.
- [25] Edgar, M. (2021) *IMPRESIÓN 3D DE TITANIO: MÉTODOS, IMPRESORAS Y APLICACIONES*. Available at: <https://idea161.org/2021/04/21/impresion-3d-de-titanio-metodos-impresoras-y-aplicaciones/> (Ultima visita: January 7, 2023).
- [26] Singh, P. and Raghav, A., 2018. 3D food printing: a revolution in food technology. *Acta Scientific Nutritional Health*, 2(2), pp.11-12.
- [27] *ChefJet™ de 3D systems: La impresora que hace pasteles de Azúcar* (2014) *Experimenta*. Available at: <https://www.experimenta.es/noticias/industrial/chef-jet-4181/> (Ultima visita: January 7, 2023).
- [28] Goulas, A. and Friel, R.J., 2016. 3D printing with moondust. *Rapid Prototyping Journal*.

- [29] Joshi, S.C. and Sheikh, A.A., 2015. 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(4), pp.175-185.
- [30] Wang, Y.C., Chen, T. and Yeh, Y.L., 2019. Advanced 3D printing technologies for the aircraft industry: a fuzzy systematic approach for assessing the critical factors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(10), pp.4059-4069.
- [31] Sreehitha, V., 2017. Impact of 3D printing in automotive industry. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 5(2), pp.91-94.
- [32] Krassenstein, B. (2016) *Local Motors to 3D print cars in 12 hours, Recycle Old Cars, & Research Printing with Graphene & Metals, 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing*. Available at: <https://3dprint.com/51866/local-motors-plans-3d-print/> (Ultima visita: January 7, 2023).
- [33] Dankar, I., Pujolà, M., El Omar, F., Sepulcre, F. and Haddarah, A., 2018. Impact of mechanical and microstructural properties of potato puree-food additive complexes on extrusion-based 3D printing. *Food and Bioprocess Technology*, 11(11), pp.2021-2031.
- [34] Mélanie, W. (2022) *Mycusini, la primera impresora 3D para chocolate*. Available at: <https://www.3dnatives.com/chocolat-imprime-en-3d-paques-13042017/#!> (Ultima visita: January 7, 2023).
- [35] Yan, Q., Dong, H., Su, J., Han, J., Song, B., Wei, Q. and Shi, Y., 2018. A review of 3D printing technology for medical applications. *Engineering*, 4(5), pp.729-742.
- [36] Bogue, R., 2013. 3D printing: the dawn of a new era in manufacturing?. *Assembly Automation*.
- [37] Liu, Y., Hamid, Q., Snyder, J., Wang, C. and Sun, W., 2016. Evaluating fabrication feasibility and biomedical application potential of in situ 3D printing technology. *Rapid Prototyping Journal*, 22(6), pp.947-955.
- [38] Knowlton, S., Onal, S., Yu, C.H., Zhao, J.J. and Tasoglu, S., 2015. Bioprinting for cancer research. *Trends in biotechnology*, 33(9), pp.504-513.
- [39] Sakin, M. and Kiroglu, Y.C., 2017. 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. *Energy Procedia*, 134, pp.702-711.
- [40] Raúl, I. (2021) *La primera casa impresa en 3D de modo íntegro*. Available at: https://as.com/diarioas/2021/05/05/actualidad/1620189312_042836.html (Ultima visita: January 7, 2023).
- [41] Lee, J., Kim, H.C., Choi, J.W. and Lee, I.H., 2017. A review on 3D printed smart devices for 4D printing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4(3), pp.373-383.
- [42] Saengchairat, N., Tran, T. and Chua, C.K., 2017. A review: Additive manufacturing for active electronic components. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(1), pp.31-46.
- [43] Moylan, S., Slotwinski, J., Cooke, A., Jurrens, K. and Donmez, M.A., 2012, August. Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes. In 2012 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin.

- [44] Liu, S., et al. "Surface quality of fused deposition modeling parts: A review of current research and future prospects." *Rapid Prototyping Journal* 23.2 (2017): 390-404.
- [45] Kitsakis, Konstantinos & Kechagias, John & Vaxevanidis, Nikolaos & Giagopoulos, Dimitrios. (2016). Tolerance Analysis of 3d-MJM parts according to IT grade. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 161. 012024. 10.1088/1757-899X/161/1/012024.
- [46] ISO ISO 1143:2010. *Metallic Materials—Rotating bar Bending Fatigue Testing*; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2010.
- [47] Jahangiri, M., Tadayon, M. and Seifi, M., 2019. A review of additive manufacturing: materials, methods, applications and challenges. *Journal of Applied Research and Technology*, 17(6), pp.638-647.]
- [48] Norma ISO 1302:2010. (2010). *Geometrical Product Specifications (GPS) - Indication of Surface Texture in Technical Product Documentation*. International Organization for Standardization.
- [49] Norma ISO 25178:2016. (2016). *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface Texture: Areal*. International Organization for Standardization.
- [50] Chiu JM, Lee WC, Lin CH, Wu CY, Hung KC. Calibration and optimization of 3D printing processes. *Materials Today Communications*. 2019;21:100631.
- [51] Jacobs, P.F., 1992. *Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers.
- [52] NIST. (2015). NISTIR 7858: Specification for defining the file format for 3D printing. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7858>
- [53] Moylan, S. (2018). A Review of Test Artifacts for Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 140(5), 050801. <https://doi.org/10.1115/1.4040162>
- [54] NIST. (2015). NISTIR 7858: Specification for defining the file format for 3D printing. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7858>
- [55] ISO 10791-7:2013. ISO. Recuperado el 8 de mayo de 2023, de <https://www.iso.org/standard/73814.html>
- [56] H.-S. Byun and K. Lee. (2015). Design of a New Test Part for Benchmarking the Accuracy and Surface Finish of Rapid Prototyping Processes
- [57] E. P. Gargiulo. (1992). Stereolithography process accuracy: user experience, *Proceedings of the 1st European Conference on Rapid Prototyping*, University of Nottingham.
- [58] M. Geiger, A. Coremans, N. Neubauer and F. Niebling. (1996). Advanced rapid prototyping by laser beam sintering of metal prototypes: design and development of an optimized laser beam delivery system *Proc.*
- [59] J. Delgado, J. Ciurana, C. Reguant and B. Cavallini. (2010) Studying the repeatability in DMLS technology using a complete geometry test part.

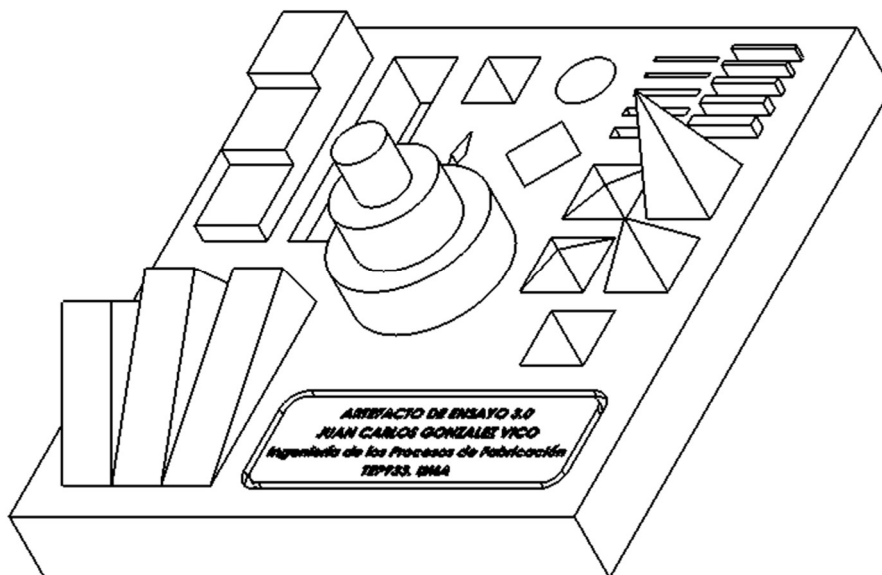
- [60] Tobias Hullette, Jackson O'Connell, Guilherme Schendel. (2023) *The Top 15 Free 3D Printer Test Print Models*. Recuperado el 8 de mayo de 2023, de: https://as.com/diarioas/2021/05/05/actualidad/1620189312_042836.html (Última visita: January 7, 2023).
- [61] J. Richter and P. Jacobs. (1992). Accuracy, in: *Rapid Prototyping & Manufacturing*, P. Jacobs, Society of Manufacturing Engineers.
- [62] Instrumentación y Metrología. MITUTOYO. Recuperado el 8 de mayo de 2023, de: https://www.instrumentacion-metrologia.es/epages/instrumentacion-metrologia.sf/es_ES/?ObjectPath=/Shops/dcl/Categories/NUESTRAS_MARCAS/MITUTOYO
- [63] International Standardizing Organization. ISO 1302:2002. Geometrical Product Specifications (GPS)—Indication of Surface Texture in Technical Product Documentation; International Standardizing Organization: Geneva, Switzerland, 2002
- [64] MITUTOYO. Guía Rápida para Instrumentos de Medición de Exactitud. 1998.
- [65] Norma UNE-EN ISO 12181-1:2012. Especificación geométrica de productos (GPS). Redondez. Parte 1: Vocabulario y parámetros de redondez. Asociación Española de Normalización, 2012.
- [66] Norma UNE-EN ISO 12180-1:2012. Especificación geométrica de productos (GPS). Cilindricidad. Parte 1: Vocabulario y parámetros para la forma de cilindricidad. Asociación Española de Normalización, 2012.
- [67] Norma UNE-EN ISO 12780-1:2012. Especificación geométrica de productos (GPS). Rectitud. Parte 1: Vocabulario y parámetros para la rectitud. Asociación Española de Normalización, 2012

Anexos

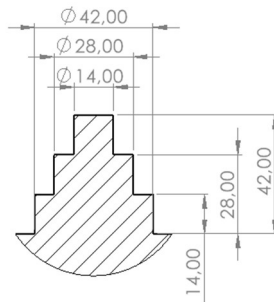
HOJA DE DATOS

ID. ENSAYO	Artefacto-PLA-01. mm		
-------------------	-----------------------------	--	--

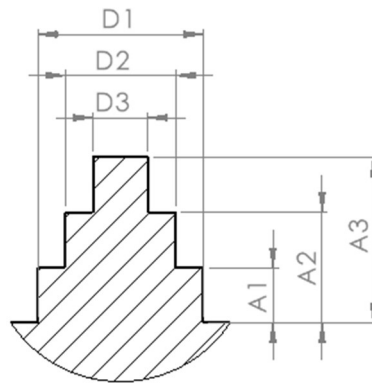
Material	PLA	Espesor de capa (mm)	0.1
Bobina	2	Velocidad de deposición (mm/s)	60
T^a de extrusión (°C)	225	Tiempo de impresión	27 h. y 24 min.
T^a de la cama (°C)	60	Repetición (n°)	1



TORRE ESCALONADA

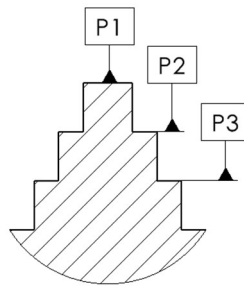


CONTROL DIMENSIONAL



MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)						
	Diámetro			Altura		
	D1	D2	D3	A1	A2	A3
M1	41,91	28,00	13,96	14,03	27,95	41,85
M2	41,98	28,01	14,01	14,02	28,05	41,95
M3	41,94	27,98	14,00	14,00	28,00	42,00
M4	42,06	27,95	14,02	13,99	28,00	42,00
MEDIA	41,97	27,99	14,00	14,01	28,00	41,95

CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS

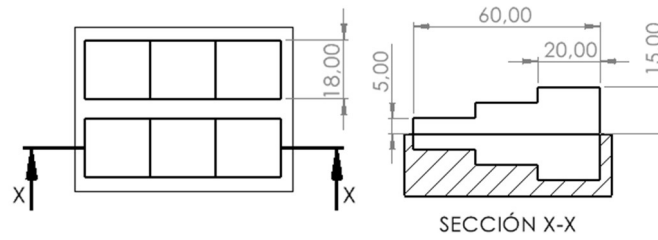


Rugosidad (μm)					
P1		P2		P3	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
5,179	29,862	5,414	28,414	4,941	25,054

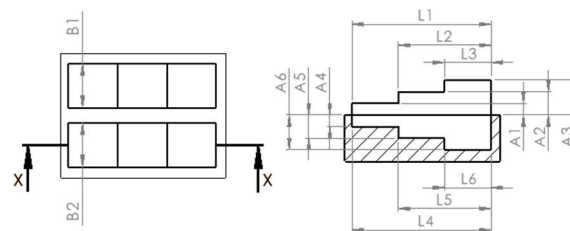
CONTROL DE DESVIACIONES MACROGEOMÉTRICAS

	Redondez (μm)			Rectitud (μm)			Cilindricidad (μm)		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3
M1	297,45	161,42	77,44	23,38	32,53	21,07	188,65	409,17	67,46
M2	479,75	163,18	70,25	38,43	36,26	20,94	359,45	439,42	63,58
M3	305,94	393,55	57,99	35,03	39,71	25,26	525,62	184,62	75,58
M4	173,41	365,26	63,25	35,40	26,71	18,74	343,16	175,06	82,53
MEDIA	301,70	264,22	66,75	35,22	34,40	21,01	351,31	296,90	71,52

ESCALERAS



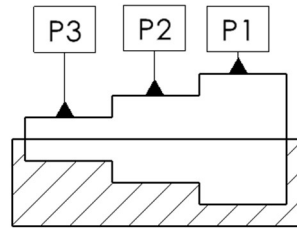
CONTROL DIMENSIONAL



MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)							
EXTRUSION							
	LONGITUD			ALTURA			ANCHURA
	L1	L2	L3	A1	A2	A3	B1
M1	60,10	40,10	20,10	5,10	10,01	15,05	18,12
M2	60,12	40,09	20,04	5,01	10,07	15,01	18,05
M3	60,05	40,10	20,03	5,06	10,07	14,98	18,02
M4	60,11	40,11	20,09	5,03	10,08	14,96	18,13
MEDIA	60,10	40,10	20,07	5,05	10,06	15,00	18,08

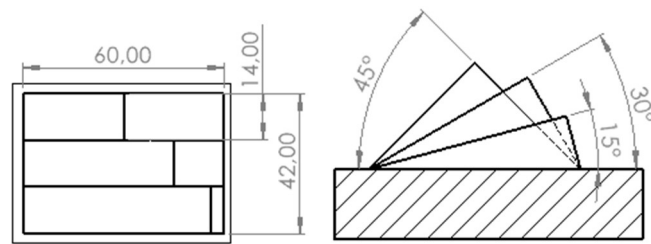
MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)							
HUECO							
	LONGITUD			ALTURA			ANCHURA
	L4	L5	L6	A4	A5	A6	B2
M1	59,82	39,90	18,86	5,01	10,16	15,19	17,99
M2	59,88	39,91	19,89	5,04	10,00	15,02	17,99
M3	59,79	39,85	19,88	5,03	9,97	14,98	17,88
M4	59,67	39,96	19,85	4,96	10,05	15,07	17,84
MEDIA	59,79	39,91	19,62	5,01	10,05	15,07	17,93

CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS

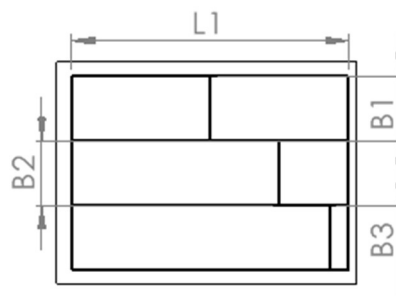


Rugosidad (μm)					
P1		P2		P3	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
3,789	19,933	4,860	22,112	3,059	14,053

PENDIENTES

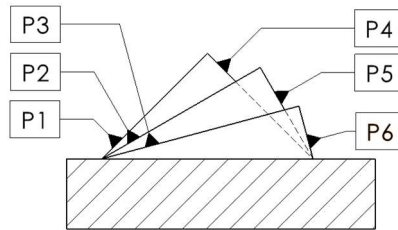


CONTROL DIMENSIONAL



	MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)			
	LONGITUD	ANCHURA		
	L1	A1	A2	A3
M1	59,65	14,13	14,18	14,16
M2	59,88	14,13	14,17	14,14
M3	60,00	14,14	14,18	14,17
M4	59,58	14,14	14,16	14,18
MEDIA	59,78	14,14	14,17	14,16

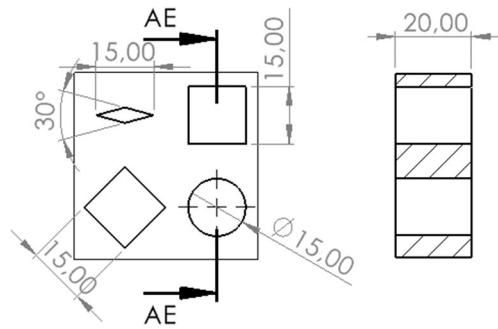
CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS



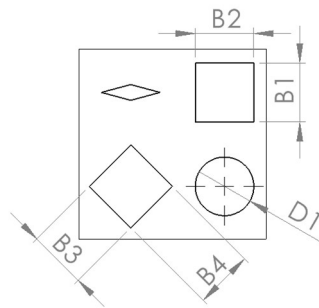
Rugosidad (μm)					
P1 (45°)		P2 (30°)		P3 (15°)	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
12,729	66,390	19,032	72,920	22,784	86,231

Rugosidad (μm)					
P4 (45°)		P5 (60°)		P6 (85°)	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
13,544	67,975	10,570	57,666	15,431	76,670

AGUJEROS

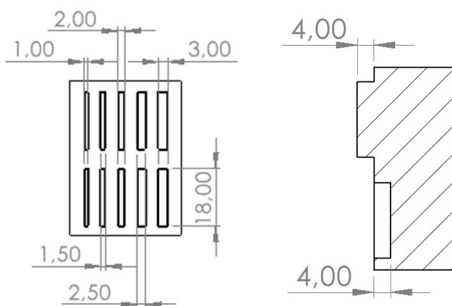


CONTROL DIMENSIONAL

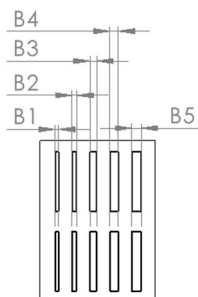


MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)					
	ANCHURA				Diámetro
	B1	B2	B3	B4	D1
M1	14,88	14,79	14,82	14,92	14,72
M2	14,82	14,72	14,81	14,86	14,66
M3	14,82	14,73	14,86	14,82	14,69
M4	14,87	14,76	14,89	14,93	14,67
MEDIA	14,85	14,75	14,85	14,88	14,69

ELEMENTOS DELGADOS



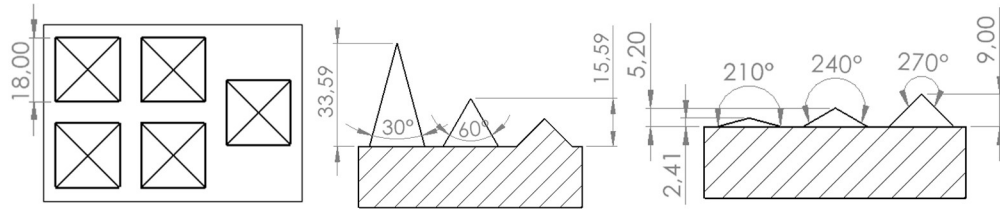
CONTROL DIMENSIONAL



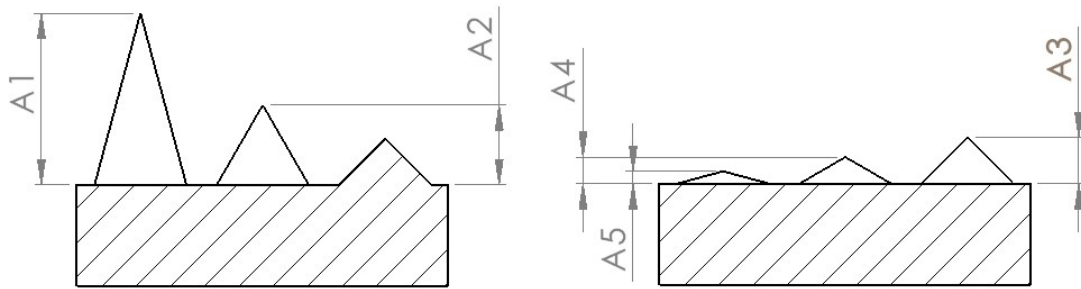
MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)					
EXTRUSION					
	B1	B2	B3	B4	B5
M1	1,18	1,60	2,21	2,68	3,16
M2	1,02	1,54	2,18	2,56	3,02
M3	1,00	1,58	2,06	2,58	3,06
M4	1,10	1,62	2,02	2,65	3,09
MEDIA	1,08	1,59	2,12	2,62	3,08

MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)					
HUECO					
	B6	B7	B8	B9	B10
M1	0,85	1,45	1,95	2,4	2,95
M2	-	-	-	-	-
M3	-	-	-	-	-
M4	-	-	-	-	-
MEDIA	0,85	1,45	1,95	2,40	2,95

PIRAMIDES



CONTROL DIMENSIONAL

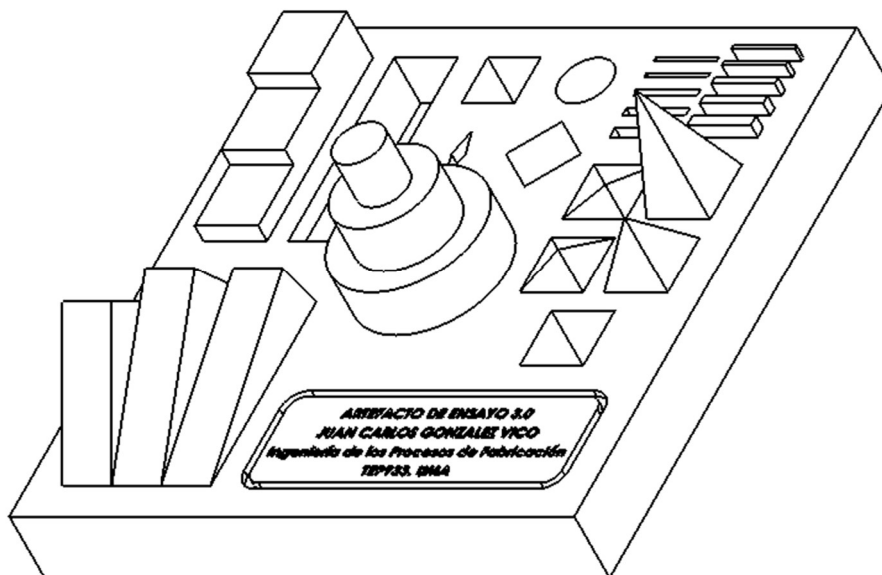


	ALTURA				
	A1	A2	A3	A4	A5
M1	32,35	15,14	10,35	5,90	1,60
M2	-	-	-	-	-
M3	-	-	-	-	-
M4	-	-	-	-	-
MEDIA	32,35	15,14	10,35	5,90	1,60

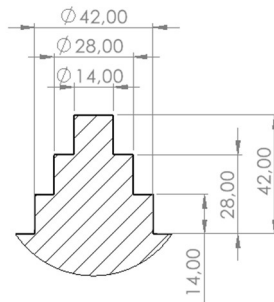
HOJA DE DATOS

ID. ENSAYO	Artefacto-PLA-0.2 mm		
-------------------	-----------------------------	--	--

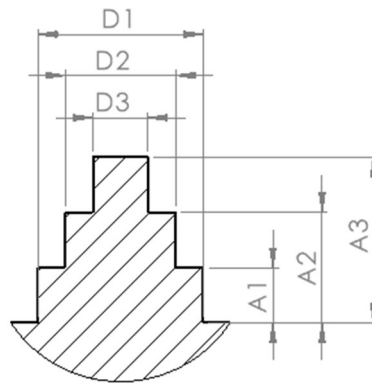
Material	PLA	Espesor de capa (mm)	0.2
Bobina	2	Velocidad de deposición (mm/s)	60
T^a de extrusión (°C)	225	Tiempo de impresión	17 h. y 41 min.
T^a de la cama (°C)	60	Repetición (n°)	1



TORRE ESCALONADA

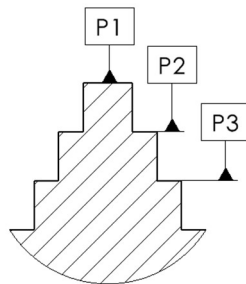


CONTROL DIMENSIONAL



MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)						
	Diámetro			Altura		
	D1	D2	D3	A1	A2	A3
M1	41,91	27,92	14,04	14,03	27,95	41,8
M2	41,85	27,85	13,93	14,11	27,82	41,92
M3	41,98	28,02	13,98	14,15	27,78	41,96
M4	42,04	28,08	14,1	13,98	27,93	41,78
MEDIA	41,95	27,97	14,01	14,07	27,87	41,87

CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS

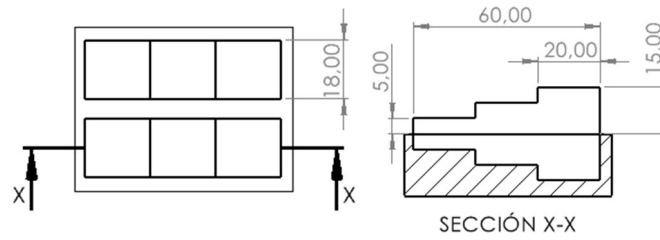


Rugosidad (μm)					
P1		P2		P3	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
11,973	84,613	4,256	33,769	4,148	21,723

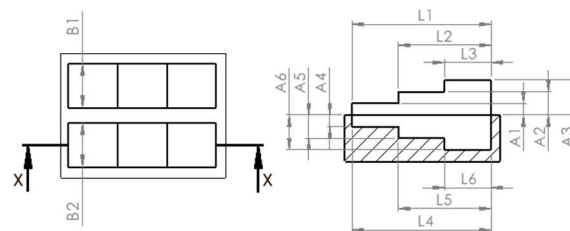
CONTROL DE DESVIACIONES MACROGEOMÉTRICAS

	Redondez (μm)			Rectitud (μm)			Cilindricidad (μm)		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3
M1	311,32	294,17	137,52	47,19	36,07	34,06	354,55	541,92	133,92
M2	210,67	260,47	139,14	53,38	47,63	27,54	304,91	332,29	123,97
M3	278,56	309,13	119,52	46,43	45,07	36,51	300,86	279,70	143,97
M4	309,11	511,55	129,18	50,63	42,71	44,54	343,65	321,39	143,31
MEDIA	293,84	301,65	133,35	48,91	43,89	35,29	324,28	326,84	138,62

ESCALERAS



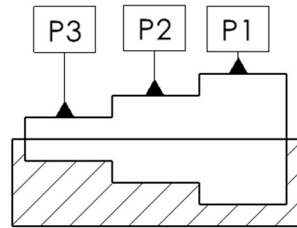
CONTROL DIMENSIONAL



MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)							
EXTRUSION							
	LONGITUD			ALTURA			ANCHURA
	L1	L2	L3	A1	A2	A3	B1
M1	60,07	40,15	20,07	5,08	9,95	14,86	18,08
M2	60,27	40,09	20,22	5,01	10,02	14,72	18,20
M3	60,11	40,07	20,16	5,05	9,95	14,86	18,14
M4	60,08	40,20	20,08	5,09	9,99	14,77	18,19
MEDIA	60,13	40,13	20,13	5,06	9,98	14,80	18,15

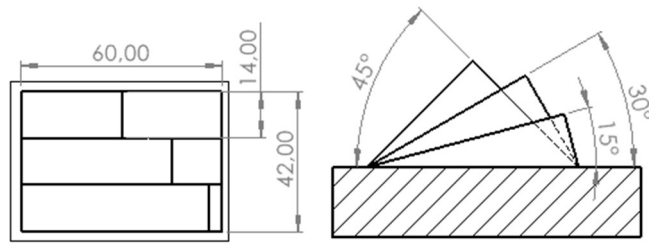
MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)							
HUECO							
	LONGITUD			ALTURA			ANCHURA
	L4	L5	L6	A4	A5	A6	B2
M1	59,69	39,79	19,9	5,11	10,1	15,04	17,96
M2	59,68	39,82	19,8	5,01	10,12	15,1	17,88
M3	59,74	39,89	19,88	5,07	10,07	15,05	17,89
M4	59,71	39,83	19,82	5,06	10,05	15,12	17,95
MEDIA	59,71	39,83	19,85	5,06	10,09	15,08	17,92

CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS

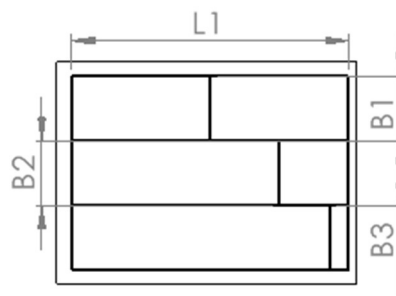


Rugosidad (μm)					
P1		P2		P3	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
18,884	111,010	5,327	41,880	7,294	48,492

PENDIENTES

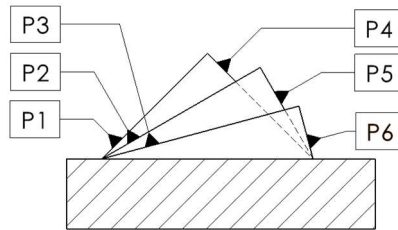


CONTROL DIMENSIONAL



	MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)			
	LONGITUD	ANCHURA		
	L1	A1	A2	A3
M1	59,64	14,25	14,17	14,21
M2	59,59	14,13	14,29	14,21
M3	59,71	14,17	14,25	14,33
M4	59,67	14,23	14,19	14,27
MEDIA	59,65	14,20	14,23	14,26

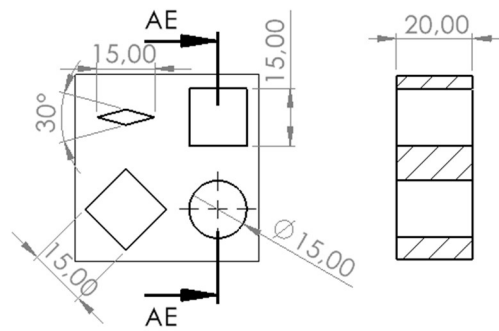
CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS



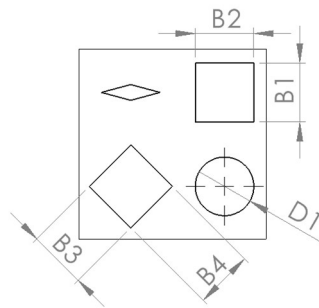
Rugosidad (μm)					
P1 (45°)		P2 (30°)		P3 (15°)	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
26,521	110,910	36,294	134,940	21,706	116,360

Rugosidad (μm)					
P4 (45°)		P5 (60°)		P6 (85°)	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
27,524	110,610	18,180	82,480	22,216	104,720

AGUJEROS

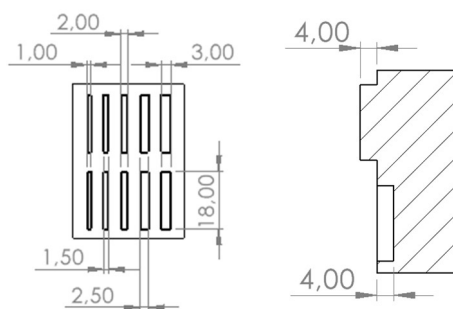


CONTROL DIMENSIONAL

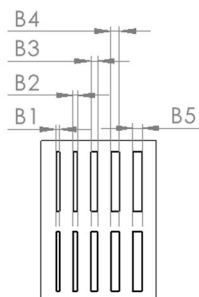


	MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)				
	ANCHURA				Diámetro
	B1	B2	B3	B4	D1
M1	14,86	14,52	14,88	14,86	14,65
M2	14,76	14,82	14,84	14,88	14,72
M3	14,75	14,77	14,76	14,88	14,65
M4	14,87	14,45	14,8	14,83	14,62
MEDIA	14,81	14,64	14,82	14,86	14,66

ELEMENTOS DELGADOS



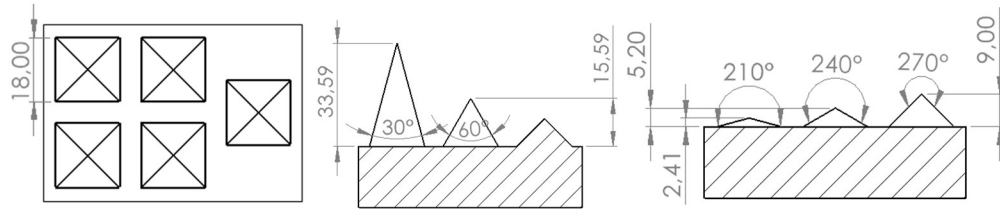
CONTROL DIMENSIONAL



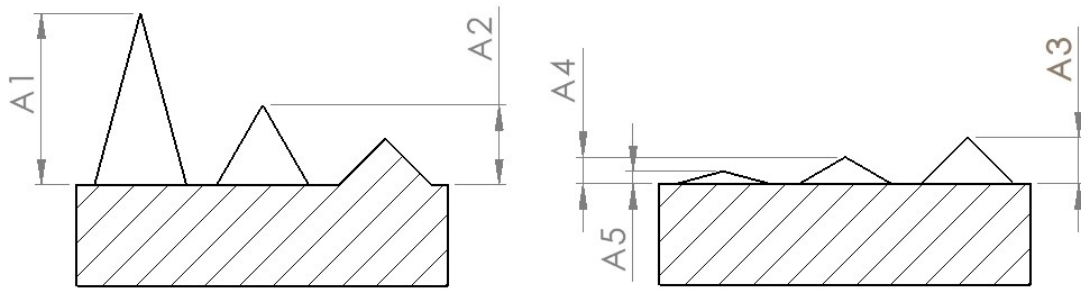
MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)					
EXTRUSION					
	B1	B2	B3	B4	B5
M1	1,65	1,88	2,3	2,81	3,2
M2	1,1	1,59	2,04	2,56	3,06
M3	1,12	1,58	2,05	2,6	3,05
M4	1,45	1,84	2,36	2,75	3,18
MEDIA	1,33	1,72	2,19	2,68	3,12

MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)					
HUECO					
	B6	B7	B8	B9	B10
M1	0,85	1,4	1,95	2,45	2,95
M2	-	-	-	-	-
M3	-	-	-	-	-
M4	-	-	-	-	-
MEDIA	0,85	1,40	1,95	2,45	2,95

PIRAMIDES



CONTROL DIMENSIONAL

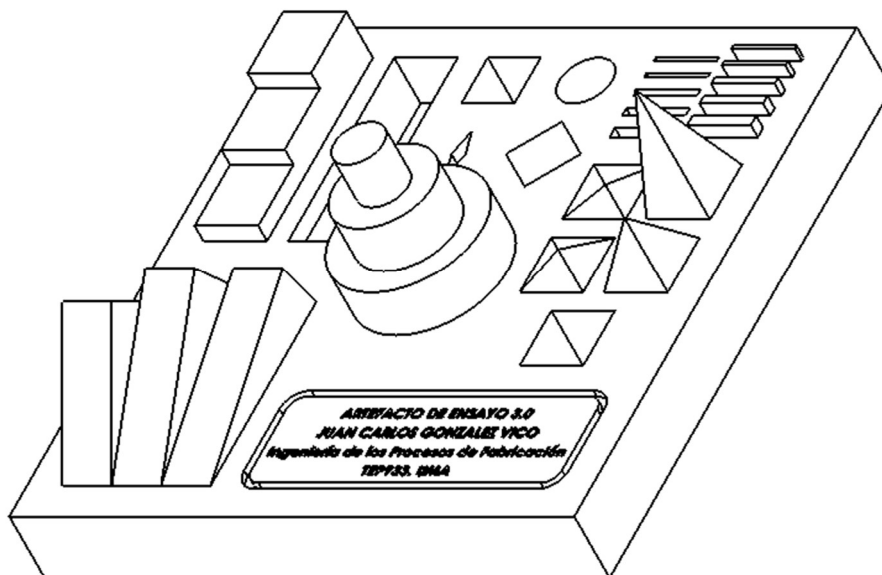


	ALTURA				
	A1	A2	A3	A4	A5
M1	32,35	14,95	9,00	5,30	2,05
M2	-	-	-	-	-
M3	-	-	-	-	-
M4	-	-	-	-	-
MEDIA	32,35	14,95	9,00	5,30	2,05

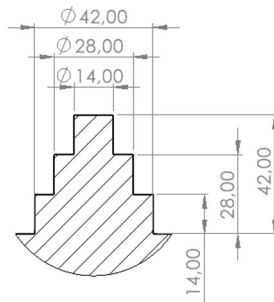
HOJA DE DATOS

ID. ENSAYO	Artefacto-PLA-0.3 mm		
-------------------	-----------------------------	--	--

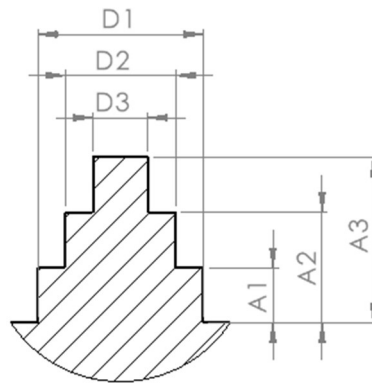
Material	PLA	Espesor de capa (mm)	0.3
Bobina	2	Velocidad de deposición (mm/s)	60
T^a de extrusión (°C)	225	Tiempo de impresión	14 h. y 21min.
T^a de la cama (°C)	60	Repetición (n°)	1



TORRE ESCALONADA

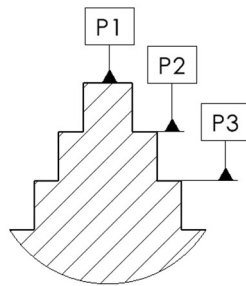


CONTROL DIMENSIONAL



	MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)					
	Diámetro			Altura		
	D1	D2	D3	A1	A2	A3
M1	42,01	27,94	14,01	13,02	27,8	41,6
M2	42,01	27,94	14,02	14,05	27,45	42,25
M3	42,97	27,97	14,01	13,92	27,95	41,4
M4	42,02	27,96	13,99	14,02	27,75	41,85
MEDIA	42,25	27,95	14,01	13,75	27,74	41,78

CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS

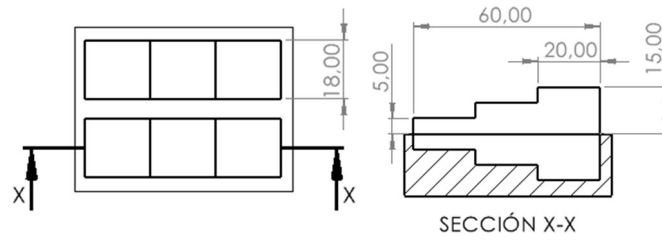


Rugosidad (μm)					
P1		P2		P3	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
13,739	65,018	8,330	50,017	13,488	65,659

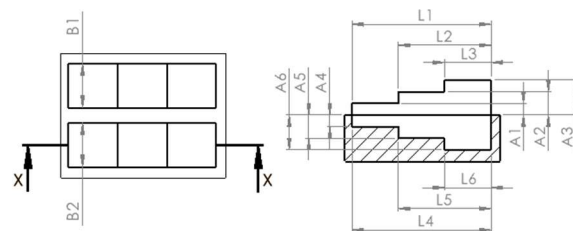
CONTROL DE DESVIACIONES MACROGEOMÉTRICAS

	Redondez (μm)			Rectitud (μm)			Cilindricidad (μm)		
	D1	D1	D3	D2	D3	D2	D3	D2	D3
M1	385,88	393,31	196,88	99,52	69,11	67,93	423,48	538,67	191,63
M2	299,54	405,99	165,04	50,95	62,96	30,87	419,48	441,42	158,33
M3	300,73	416,34	153,64	59,62	80,28	31,65	412,24	430,69	168,88
M4	295,73	508,20	185,89	41,03	59,13	42,12	427,74	410,69	202,38
MEDIA	300,14	411,17	175,47	55,29	66,04	36,89	421,48	436,06	180,26

ESCALERAS



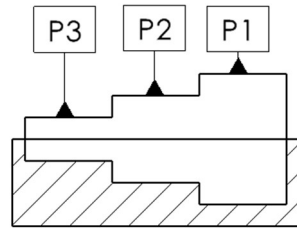
CONTROL DIMENSIONAL



MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)							
EXTRUSION							
	LONGITUD			ALTURA			ANCHURA
	L1	L2	L3	A1	A2	A3	B1
M1	60,65	40,43	20,43	4,71	9,85	15,06	18,42
M2	60,25	40,10	20,12	4,81	9,94	15,12	18,31
M3	60,09	40,12	20,12	4,99	10,01	15,08	18,15
M4	60,78	40,44	20,39	5,03	10,00	15,02	18,46
MEDIA	60,44	40,27	20,27	4,89	9,95	15,07	18,34

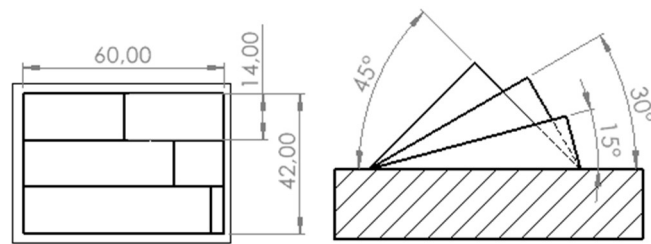
MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)							
HUECO							
	LONGITUD			ALTURA			ANCHURA
	L4	L5	L6	A4	A5	A6	B2
M1	59,69	39,55	19,66	5,15	10,37	15,08	17,93
M2	59,63	39,8	18,91	5,06	10,35	15,1	17,86
M3	59,71	39,65	19,82	5,45	10,38	15,17	17,92
M4	59,54	39,71	19,62	5,45	10,38	15,17	17,9
MEDIA	59,64	39,68	19,50	5,13	10,37	15,13	17,90

CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS

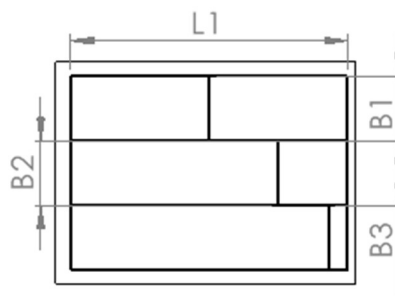


Rugosidad (μm)					
P1		P2		P3	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
14,056	70,537	7,995	46,440	17,799	91,685

PENDIENTES

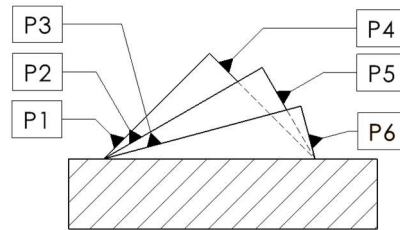


CONTROL DIMENSIONAL



	MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)			
	LONGITUD	ANCHURA		
	L1	A1	A2	A3
M1	59,59	14,55	14,52	14,53
M2	59,22	14,58	14,41	14,36
M3	59,04	14,56	14,51	14,43
M4	59,59	14,47	14,51	14,39
MEDIA	59,36	14,54	14,49	14,43

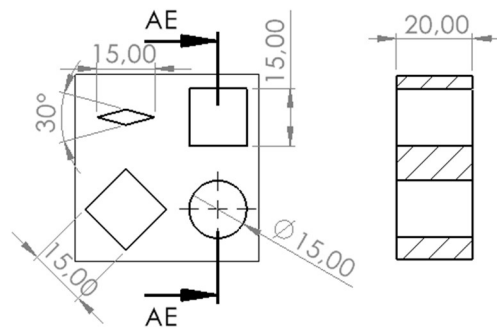
CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS



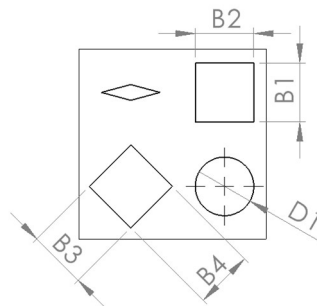
Rugosidad (μm)					
P1 (45°)		P2 (30°)		P3 (15°)	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
38,390	149,180	39,033	157,920	19,521	97,587

Rugosidad (μm)					
P4 (45°)		P5 (60°)		P6 (85°)	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
38,409	146,270	28,456	126,330	25,555	104,180

AGUJEROS

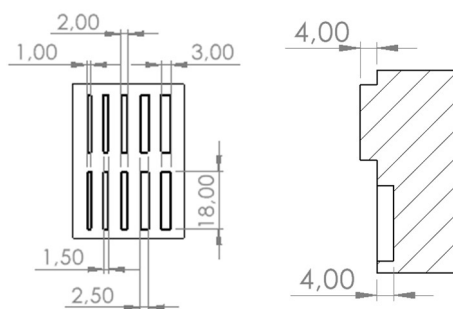


CONTROL DIMENSIONAL

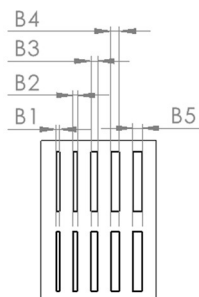


	MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)				
	ANCHURA				Diámetro
	B1	B2	B3	B4	D1
M1	14,85	14,41	14,88	14,88	14,71
M2	14,87	14,74	14,84	14,84	14,26
M3	14,79	14,76	14,76	14,88	14,56
M4	14,74	14,35	14,35	14,83	14,35
MEDIA	14,81	14,57	14,71	14,86	14,47

ELEMENTOS DELGADOS



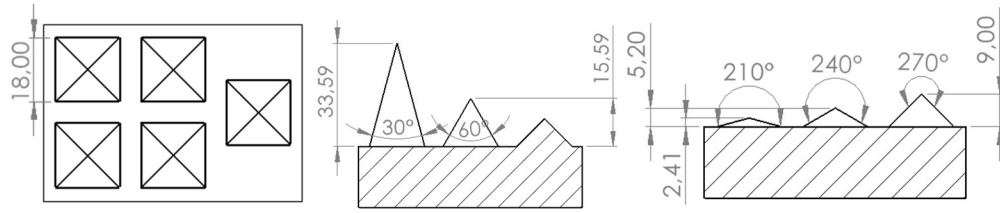
CONTROL DIMENSIONAL



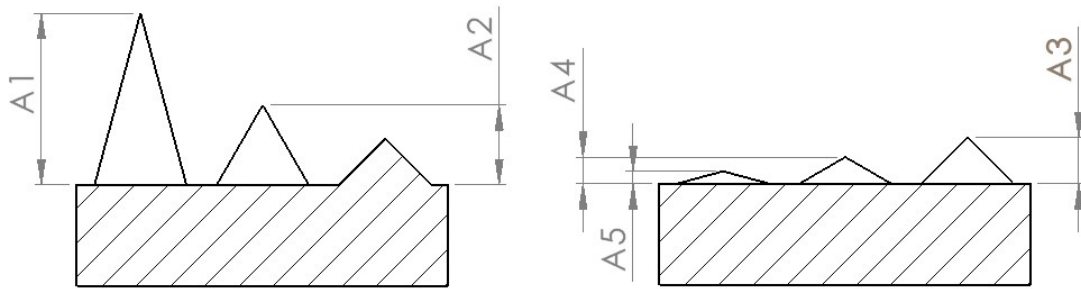
MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)					
EXTRUSION					
	B1	B2	B3	B4	B5
M1	1,33	2,03	2,34	3,01	3,41
M2	1,023	1,59	2,39	2,66	3,06
M3	1,14	1,63	2,04	2,63	3,15
M4	1,71	1,99	2,06	2,9	3,42
MEDIA	1,30	1,81	2,21	2,80	3,26

MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)					
HUECO					
	B6	B7	B8	B9	B10
M1	0,85	1,35	1,85	1,45	1,95
M2	-	-	-	-	-
M3	-	-	-	-	-
M4	-	-	-	-	-
MEDIA	0,85	1,35	1,85	2,45	2,95

PIRAMIDES



CONTROL DIMENSIONAL

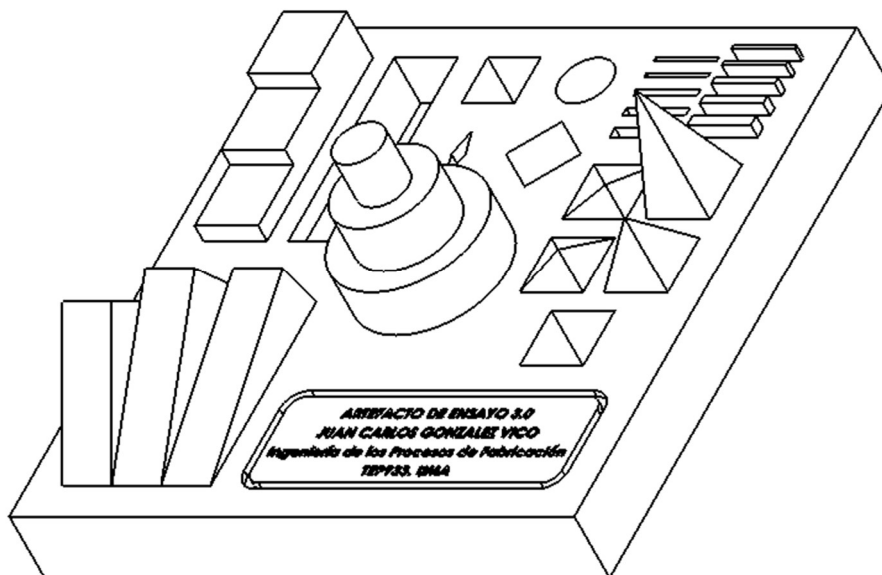


	ALTURA				
	A1	A2	A3	A4	A5
M1	31,90	14,92	8,45	4,65	2,45
M2	-	-	-	-	-
M3	-	-	-	-	-
M4	-	-	-	-	-
MEDIA	31,90	14,92	8,45	4,65	2,45

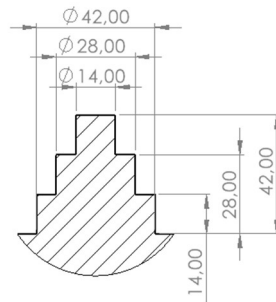
HOJA DE DATOS

ID. ENSAYO	Artefacto-ABS-0.1 mm		
-------------------	-----------------------------	--	--

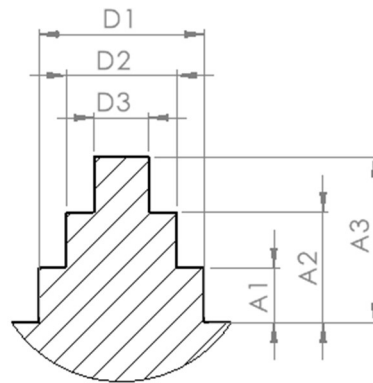
Material	ABS	Espesor de capa (mm)	0.1
Bobina	2	Velocidad de deposición (mm/s)	60
T^a de extrusión (°C)	240	Tiempo de impresión	27 h. y 23 min.
T^a de la cama (°C)	106	Repetición (n°)	1



TORRE ESCALONADA

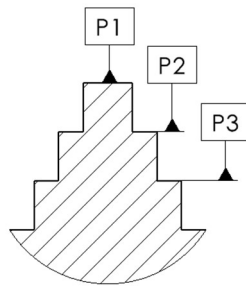


CONTROL DIMENSIONAL



MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)						
	Diámetro			Altura		
	D1	D2	D3	A1	A2	A3
M1	41,79	27,82	13,90	14,05	27,90	41,85
M2	41,77	27,86	13,88	14,05	28,00	41,95
M3	41,83	27,79	13,88	14,10	28,05	42,05
M4	41,77	27,82	13,93	14,10	28,05	42,10
MEDIA	41,79	27,82	13,90	14,08	28,00	41,99

CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS

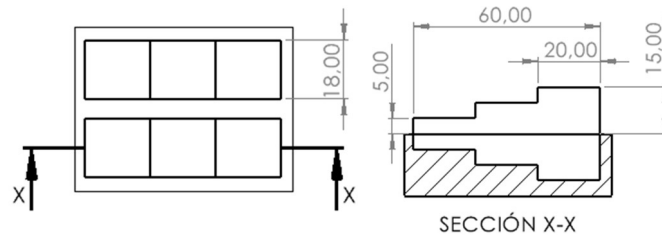


Rugosidad (μm)					
P1		P2		P3	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
4,458	33,083	6,114	40,074	13,624	68,927

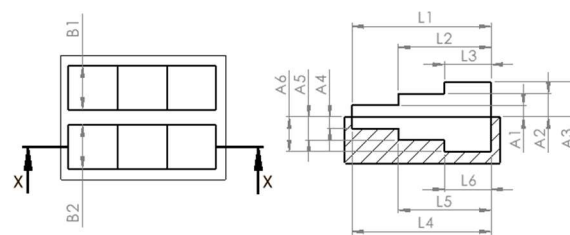
CONTROL DE DESVIACIONES MACROGEOMÉTRICAS

	Redondez (μm)			Rectitud (μm)			Cilindricidad (μm)		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3
M1	282,94	513,26	377,75	29,07	41,72	41,23	234,08	202,62	104,71
M2	308,85	186,94	107,29	32,57	58,93	34,28	323,43	281,37	103,79
M3	270,31	245,53	96,74	31,15	42,48	34,80	354,48	210,00	115,16
M4	206,02	186,91	97,80	49,80	48,04	47,43	328,06	553,22	392,13
MEDIA	276,63	216,24	102,55	31,86	45,26	38,02	325,75	245,69	109,94

ESCALERAS



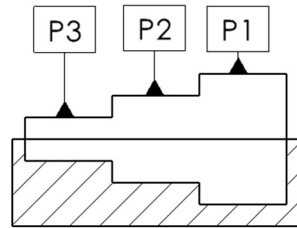
CONTROL DIMENSIONAL



MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)							
EXTRUSION							
	LONGITUD			ALTURA			ANCHURA
	L1	L2	L3	A1	A2	A3	B1
M1	60,01	40,00	19,98	5,35	9,85	14,89	18,02
M2	59,99	40,01	19,99	5,25	9,84	14,90	18,03
M3	59,96	39,99	19,96	4,82	10,21	15,13	18,00
M4	59,97	39,98	20,06	4,82	10,28	15,13	18,00
MEDIA	59,98	40,00	20,00	5,06	10,05	15,01	18,01

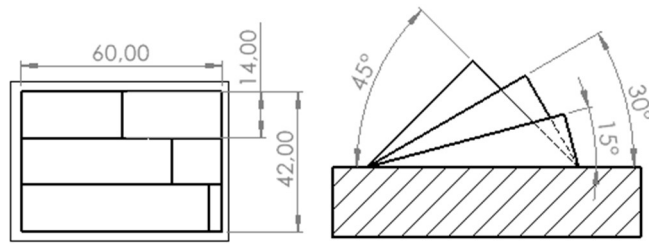
MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)							
HUECO							
	LONGITUD			ALTURA			ANCHURA
	L4	L5	L6	A4	A5	A6	B2
M1	59,70	39,72	19,71	4,99	10,01	15,01	17,87
M2	59,69	39,74	19,74	5,07	10,00	15,00	17,84
M3	59,67	39,68	19,75	5,03	10,10	15,05	17,80
M4	59,65	39,00	19,59	5,00	10,02	15,03	17,90
MEDIA	59,68	39,54	19,70	5,02	10,03	15,02	17,85

CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS

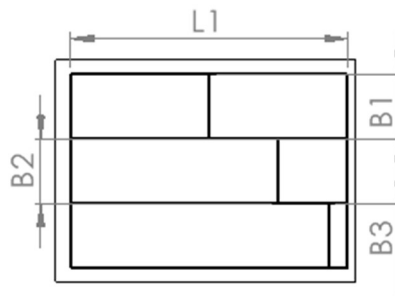


Rugosidad (μm)					
P1		P2		P3	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
12,597	84,431	5,133	43,954	14,233	91,077

PENDIENTES

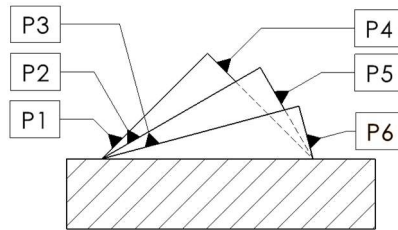


CONTROL DIMENSIONAL



MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)				
	LONGITUD	ANCHURA		
	L1	A1	A2	A3
M1	59,94	14,05	14,12	14,10
M2	60,06	13,99	14,06	13,97
M3	60,01	14,06	13,89	13,93
M4	60,00	14,04	14,01	14,02
MEDIA	60,00	14,04	14,02	14,01

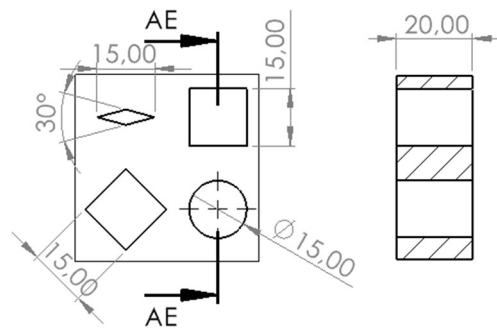
CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS



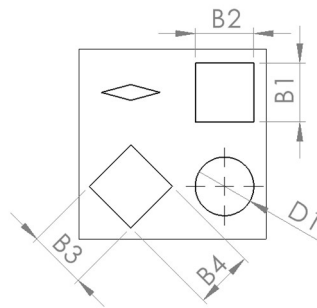
Rugosidad (μm)					
P1 (45°)		P2 (30°)		P3 (15°)	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
14,802	7,700	19,910	89,160	23,310	95,450

Rugosidad (μm)					
P4 (45°)		P5 (60°)		P6 (85°)	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
15,648	80,839	11,908	70,581	9,484	56,224

AGUJEROS

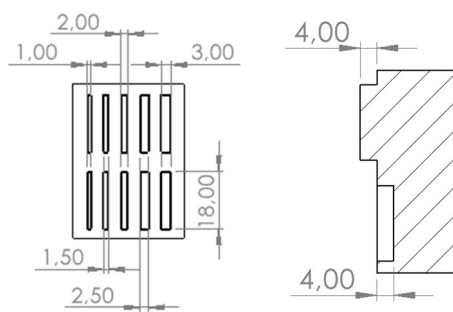


CONTROL DIMENSIONAL

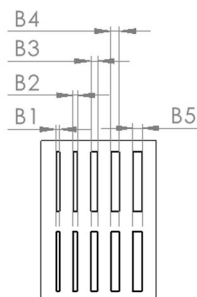


	MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)				
	ANCHURA				Diámetro
	B1	B2	B3	B4	D1
M1	14,89	14,82	14,91	14,90	14,72
M2	14,86	14,72	14,83	14,95	14,66
M3	14,88	14,83	14,92	14,95	14,69
M4	14,87	14,82	14,90	14,94	14,67
MEDIA	14,88	14,80	14,89	14,94	14,69

ELEMENTOS DELGADOS



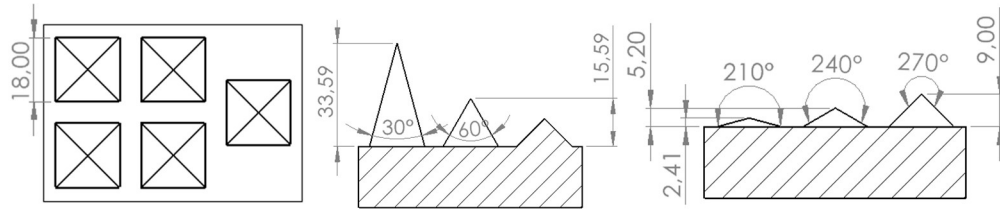
CONTROL DIMENSIONAL



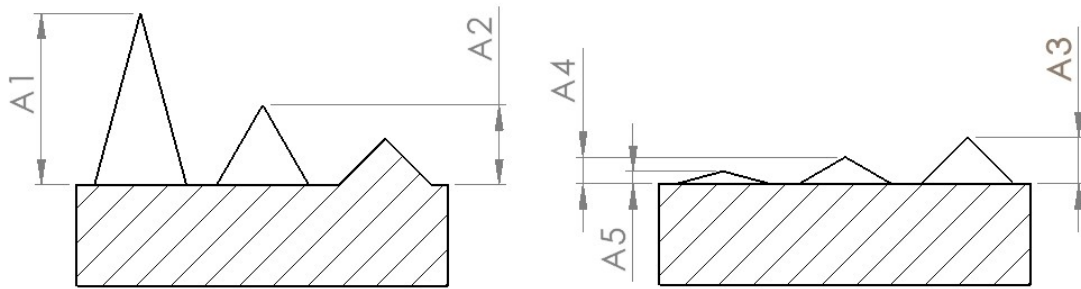
MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)					
EXTRUSION					
	B1	B2	B3	B4	B5
M1	1,07	1,57	2,19	2,60	3,06
M2	1,01	1,54	2,03	2,54	3,03
M3	1,01	1,54	2,05	2,53	3,04
M4	1,05	1,54	2,03	2,58	3,12
MEDIA	1,04	1,55	2,07	2,56	3,06

MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)					
HUECO					
	B6	B7	B8	B9	B10
M1	0,65	1,30	1,80	2,40	2,90
M2	-	-	-	-	-
M3	-	-	-	-	-
M4	-	-	-	-	-
MEDIA	0,65	1,30	1,80	2,40	2,90

PIRAMIDES



CONTROL DIMENSIONAL

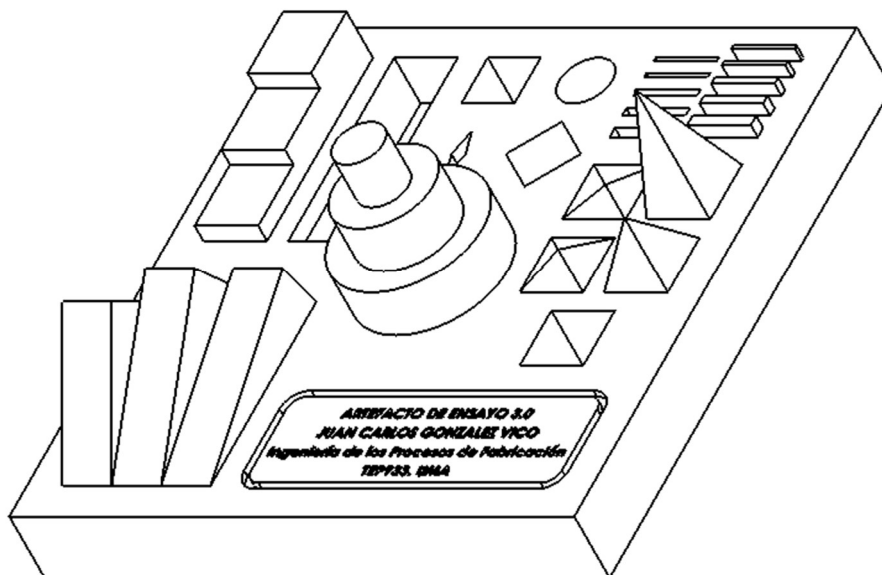


	ALTURA				
	A1	A2	A3	A4	A5
M1	31,95	14,74	8,56	5,05	2,35
M2	-	-	-	-	-
M3	-	-	-	-	-
M4	-	-	-	-	-
MEDIA	31,95	14,74	8,56	5,05	2,35

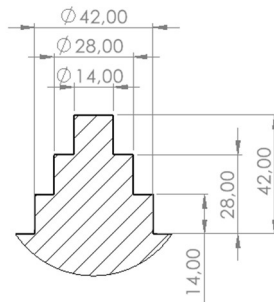
HOJA DE DATOS

ID. ENSAYO	Artefacto-AMS-0.2 mm		
-------------------	-----------------------------	--	--

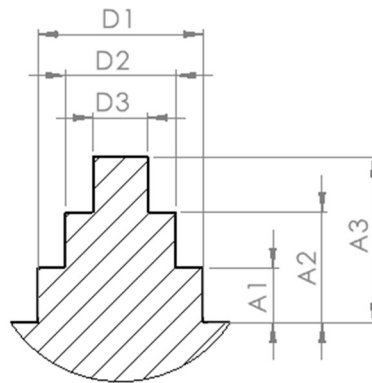
Material	ABS	Espesor de capa (mm)	0.2
Bobina	2	Velocidad de deposición (mm/s)	60
T^a de extrusión (°C)	240	Tiempo de impresión	17 h. y 40 min
T^a de la cama (°C)	105	Repetición (nº)	1



TORRE ESCALONADA

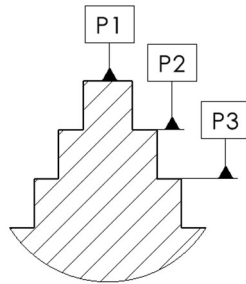


CONTROL DIMENSIONAL



MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)						
	Diámetro			Altura		
	D1	D2	D3	A1	A2	A3
M1	41,79	27,81	13,89	14,00	27,90	41,75
M2	41,86	27,85	13,92	13,95	27,95	41,95
M3	41,77	27,89	13,94	14,00	27,90	41,90
M4	41,78	27,85	13,90	14,00	27,95	41,85
MEDIA	41,80	27,85	13,91	13,99	27,93	41,86

CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS

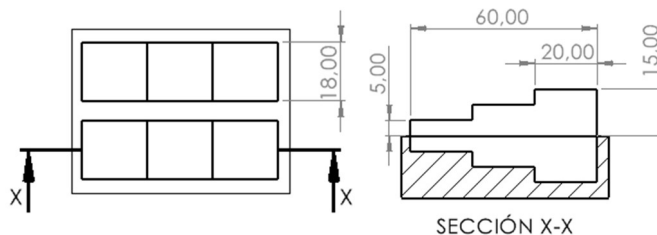


Rugosidad (μm)					
P1		P2		P3	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
7,208	51,389	5,722	40,805	6,882	61,700

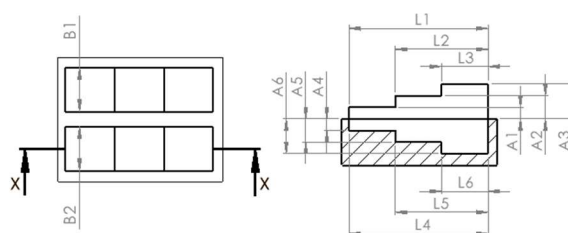
CONTROL DE DESVIACIONES MACROGEOMÉTRICAS

	Redondez (μm)			Rectitud (μm)			Cilindricidad (μm)		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3
M1	337,23	578,15	155,42	44,65	44,65	32,96	396,46	606,38	144,25
M2	500,10	620,88	152,57	45,08	45,08	31,74	314,67	442,49	144,35
M3	289,53	402,06	137,37	45,86	45,86	46,07	532,03	665,49	159,77
M4	346,24	574,26	138,17	61,69	61,69	38,47	410,64	617,04	162,08
MEDIA	341,74	576,21	145,37	45,47	45,47	35,72	403,55	611,71	152,06

ESCALERAS



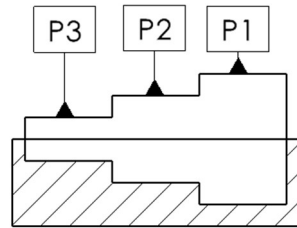
CONTROL DIMENSIONAL



MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)							
EXTRUSION							
	LONGITUD			ALTURA			ANCHURA
	L1	L2	L3	A1	A2	A3	B1
M1	60,02	40,16	20,14	5,11	10,06	15,00	18,26
M2	60,00	40,15	19,99	5,12	10,03	14,86	18,01
M3	60,02	40,01	20,02	4,94	10,02	14,95	18,13
M4	60,04	40,14	20,18	4,91	10,03	15,03	17,98
MEDIA	60,02	40,12	20,08	5,02	10,04	14,96	18,10

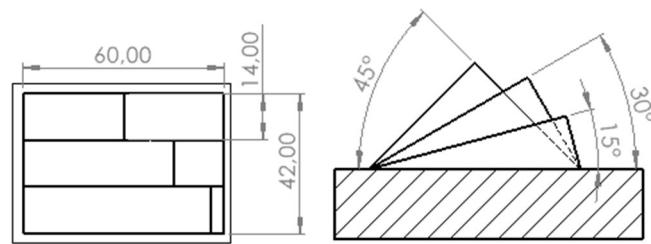
MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)							
HUECO							
	LONGITUD			ALTURA			ANCHURA
	L4	L5	L6	A4	A5	A6	B2
M1	59,57	39,70	19,60	5,04	10,09	15,94	17,64
M2	59,55	39,69	19,58	5,03	10,07	15,38	17,87
M3	59,57	39,67	19,75	5,08	10,08	15,12	17,86
M4	59,55	39,68	19,73	5,06	10,06	15,00	17,76
MEDIA	59,56	39,69	19,67	5,05	10,08	15,36	17,78

CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS

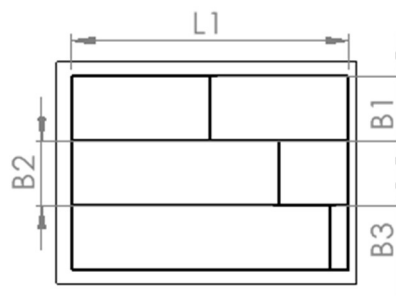


Rugosidad (μm)					
P1		P2		P3	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
16,540	112,900	5,350	46,980	14,066	83,092

PENDIENTES

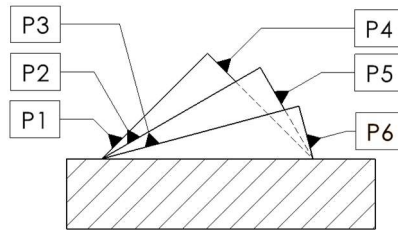


CONTROL DIMENSIONAL



	MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)			
	LONGITUD	ANCHURA		
	L1	A1	A2	A3
M1	59,77	14,25	14,30	14,33
M2	59,86	14,26	14,31	14,23
M3	59,63	14,25	14,33	13,95
M4	59,30	14,28	14,32	14,00
MEDIA	59,64	14,26	14,32	14,13

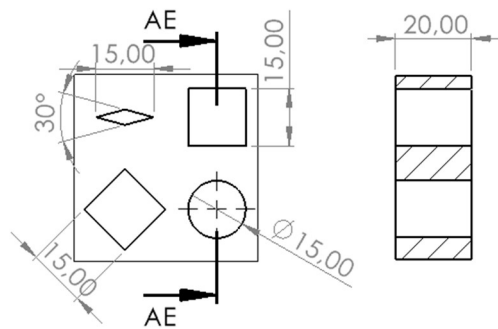
CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS



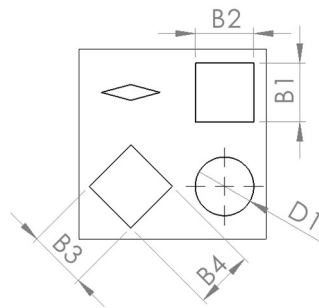
Rugosidad (μm)					
P1 (45°)		P2 (30°)		P3 (15°)	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
28,565	125,710	39,220	153,870	38,340	170,520

Rugosidad (μm)					
P4 (45°)		P5 (60°)		P6 (85°)	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
29,679	136,270	20,296	99,332	16,170	82,673

AGUJEROS

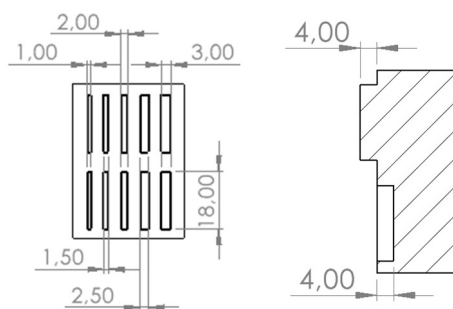


CONTROL DIMENSIONAL

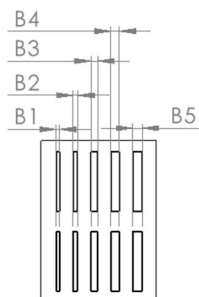


	MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)				
	ANCHURA				Diámetro
	B1	B2	B3	B4	D1
M1	14,87	14,66	14,92	14,84	14,63
M2	14,90	14,76	14,81	14,89	14,78
M3	14,89	14,56	14,80	14,92	14,61
M4	14,84	14,60	14,84	14,79	14,68
MEDIA	14,88	14,65	14,84	14,86	14,68

ELEMENTOS DELGADOS



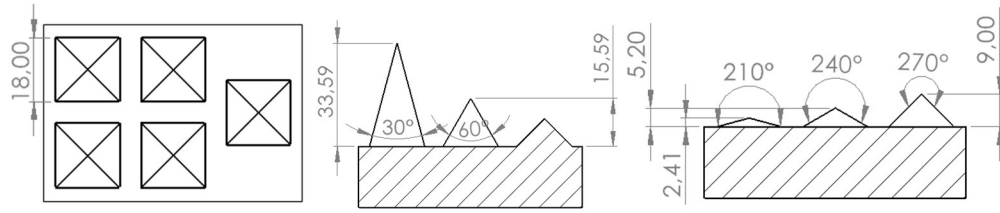
CONTROL DIMENSIONAL



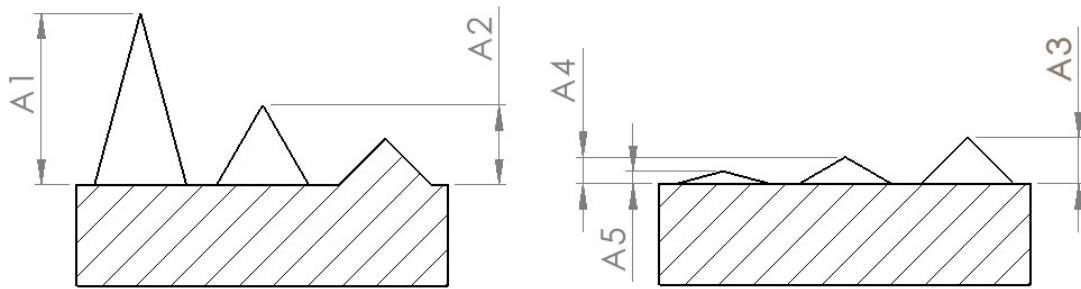
	MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)				
	EXTRUSION				
	B1	B2	B3	B4	B5
M1	1,63	1,82	2,50	2,78	3,40
M2	1,00	1,56	2,03	2,55	3,01
M3	1,02	1,54	2,04	2,52	2,99
M4	1,24	1,93	2,28	2,78	3,27
MEDIA	1,22	1,71	2,21	2,66	3,17

	MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)				
	HUECO				
	B6	B7	B8	B9	B10
M1	0,60	1,35	1,80	2,40	2,90
M2	-	-	-	-	-
M3	-	-	-	-	-
M4	-	-	-	-	-
MEDIA	0,60	1,35	1,80	2,40	2,90

PIRAMIDES



CONTROL DIMENSIONAL

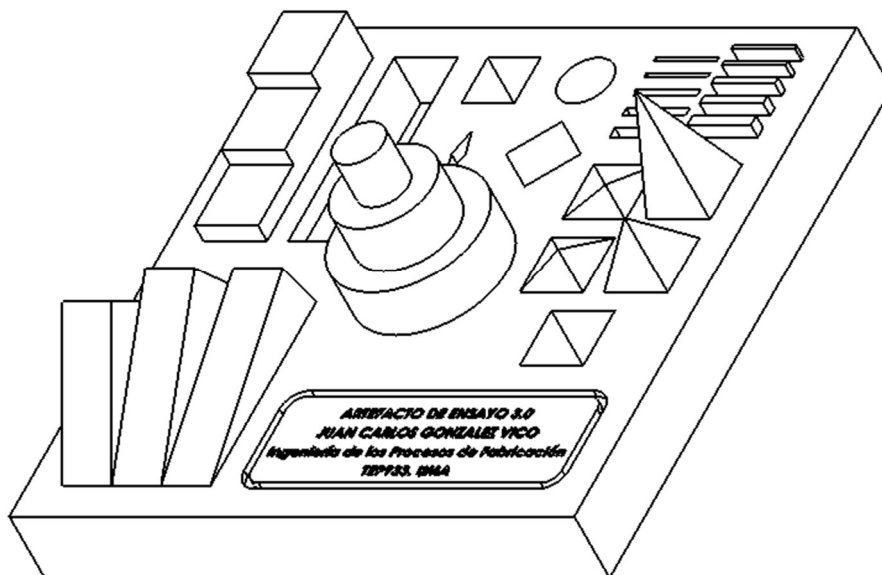


	ALTURA				
	A1	A2	A3	A4	A5
M1	31,71	14,66	8,58	4,91	2,26
M2	-	-	-	-	-
M3	-	-	-	-	-
M4	-	-	-	-	-
MEDIA	31,71	14,66	8,58	4,91	2,26

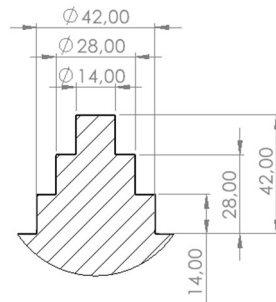
HOJA DE DATOS

ID. ENSAYO	Artefacto-ABS-0.3 mm		
-------------------	-----------------------------	--	--

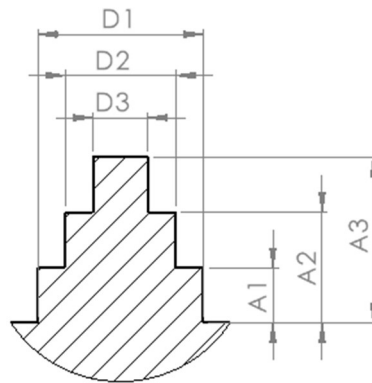
Material	ABS	Espesor de capa (mm)	0.3
Bobina	2	Velocidad de deposición (mm/s)	60
T^a de extrusión (°C)	240	Tiempo de impresión	14 h. y 20 min.
T^a de la cama (°C)	105	Repetición (n°)	1



TORRE ESCALONADA

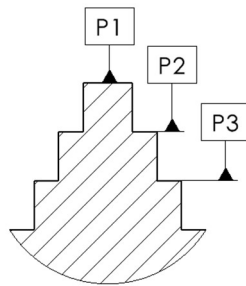


CONTROL DIMENSIONAL



	MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)					
	Diámetro			Altura		
	D1	D2	D3	A1	A2	A3
M1	41,82	27,84	13,93	13,80	27,80	42,10
M2	41,73	27,84	13,96	13,65	27,55	41,85
M3	41,79	27,86	14,00	13,85	27,95	41,90
M4	41,79	27,82	13,98	13,85	27,90	42,25
MEDIA	41,78	27,84	13,97	13,79	27,80	42,03

CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS

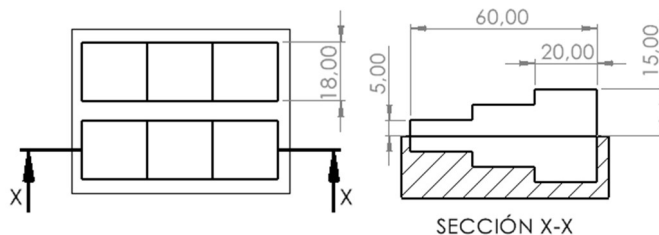


Rugosidad (μm)					
P1		P2		P3	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
14,998	87,439	17,124	99,250	28,515	166,840

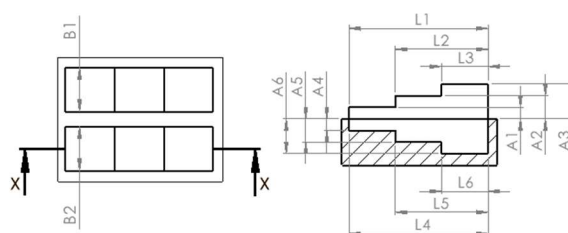
CONTROL DE DESVIACIONES MACROGEOMÉTRICAS

	Redondez (μm)			Rectitud (μm)			Cilindricidad (μm)		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3
M1	352,52	630,67	567,67	172,64	253,13	68,05	379,07	326,20	161,29
M2	593,08	643,83	189,57	59,41	47,64	41,77	349,51	461,62	195,29
M3	320,66	437,31	189,92	49,16	78,57	50,43	680,59	688,01	195,57
M4	341,40	310,66	156,84	75,96	49,33	35,81	382,94	688,98	584,75
MEDIA	346,96	533,99	189,75	67,69	63,95	46,10	381,01	574,82	195,43

ESCALERAS



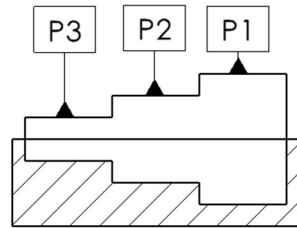
CONTROL DIMENSIONAL



MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)							
EXTRUSION							
	LONGITUD			ALTURA			ANCHURA
	L1	L2	L3	A1	A2	A3	B1
M1	60,25	40,33	20,33	4,96	10,12	14,99	18,49
M2	60,04	40,20	20,04	5,10	10,15	14,79	18,47
M3	60,10	40,16	20,05	4,77	9,87	15,10	18,11
M4	60,22	40,29	20,37	4,72	9,80	15,04	18,09
MEDIA	60,15	40,25	20,20	4,89	9,99	14,98	18,29

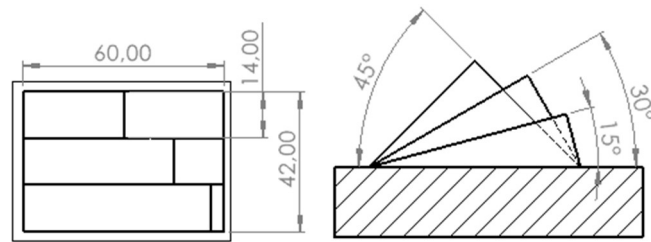
MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)							
HUECO							
	LONGITUD			ALTURA			ANCHURA
	L4	L5	L6	A4	A5	A6	B2
M1	59,21	39,57	19,49	5,15	10,20	14,90	17,54
M2	59,28	39,54	19,56	5,17	10,23	15,00	17,70
M3	59,30	39,51	19,60	5,09	10,31	15,07	17,67
M4	59,19	39,52	19,64	5,21	10,37	15,06	17,49
MEDIA	59,25	39,54	19,57	5,16	10,28	15,01	17,60

CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS

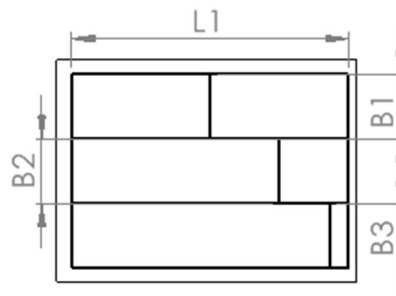


Rugosidad (μm)					
P1		P2		P3	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
27,790	158,790	15,765	93,291	29,384	176,270

PENDIENTES

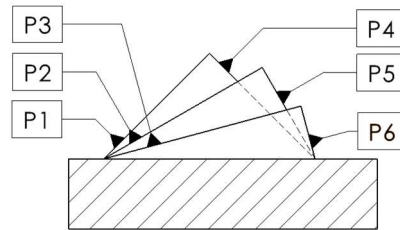


CONTROL DIMENSIONAL



	MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)			
	LONGITUD	ANCHURA		
	L1	A1	A2	A3
M1	59,96	14,44	14,34	14,21
M2	60,09	14,37	14,44	14,31
M3	60,34	14,42	14,40	14,45
M4	59,40	14,37	14,45	14,36
MEDIA	59,95	14,40	14,41	14,33

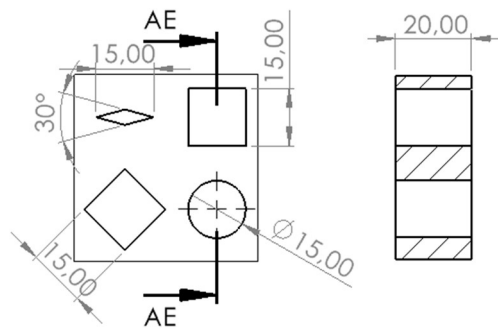
CONTROL DE DESVIACIONES MICROGEOMÉTRICAS



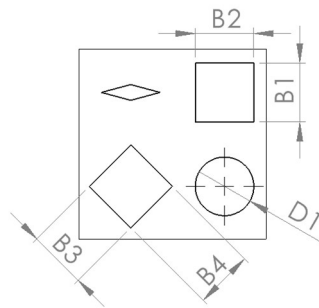
Rugosidad (μm)					
P1 (45°)		P2 (30°)		P3 (15°)	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
46,234	213,930	67,280	294,900	44,990	198,010

Rugosidad (μm)					
P4 (45°)		P5 (60°)		P6 (85°)	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
44,897	200,220	34,111	180,760	25,786	133,090

AGUJEROS

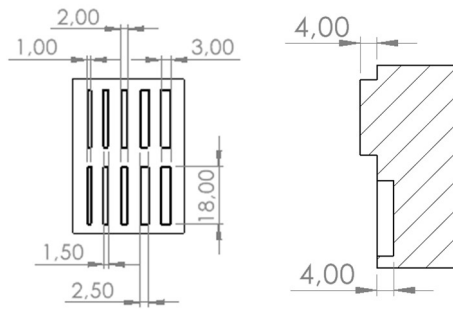


CONTROL DIMENSIONAL

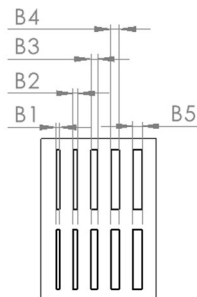


	MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)				
	ANCHURA				Diámetro
	B1	B2	B3	B4	D1
M1	14,65	14,51	14,66	14,76	14,30
M2	14,67	14,44	14,70	14,79	14,20
M3	14,66	14,39	14,67	14,84	14,59
M4	14,62	14,51	14,71	14,82	14,49
MEDIA	14,65	14,46	14,68	14,80	14,40

ELEMENTOS DELGADOS



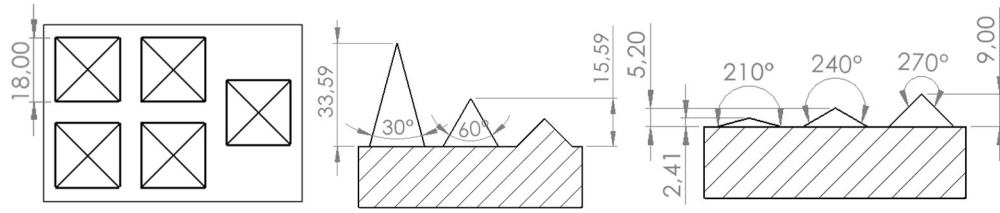
CONTROL DIMENSIONAL



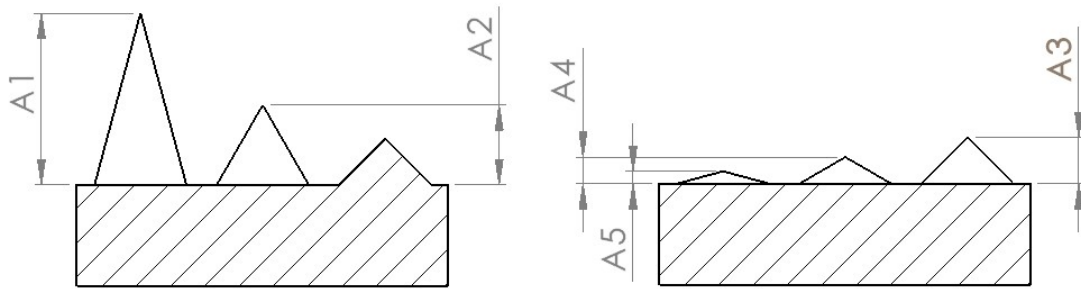
MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)					
EXTRUSION					
	B1	B2	B3	B4	B5
M1	1,57	1,96	2,50	2,94	3,54
M2	1,00	1,53	2,10	2,72	3,12
M3	1,01	1,59	2,00	2,61	3,15
M4	1,38	2,03	2,43	3,02	3,42
MEDIA	1,24	1,78	2,26	2,82	3,31

MEDIDAS LONGITUDINALES (mm)					
HUECO					
	B6	B7	B8	B9	B10
M1	0,45	1,15	1,60	2,20	2,70
M2	-	-	-	-	-
M3	-	-	-	-	-
M4	-	-	-	-	-
MEDIA	0,45	1,15	1,60	2,20	2,70

PIRAMIDES



CONTROL DIMENSIONAL



	ALTURA				
	A1	A2	A3	A4	A5
M1	31,92	14,56	8,46	4,88	2,21
M2	-	-	-	-	-
M3	-	-	-	-	-
M4	-	-	-	-	-
MEDIA	31,92	14,56	8,46	4,88	2,21