



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

**Área de Conocimiento de Ingeniería de los Procesos de
Fabricación**

TRABAJO FIN DE GRADO

**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA
DEL NÚMERO DE CARCASAS Y SU ESPESOR EN EL
COMPORTAMIENTO A FATIGA DE PROBETAS DE PLA
IMPRESAS MEDIANTE FDM**

Grado en

INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: NEREA RAMOS LÓPEZ

Tutor: ERNESTO MARTÍN FERNÁNDEZ

Cotutor: CAROLINA BERMUDO GAMBOA

MÁLAGA, septiembre de 2.023



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA





Resumen

En un mundo cada vez más impulsado por la innovación tecnológica, la fabricación aditiva ha emergido como una auténtica revolución en el ámbito de la producción industrial. Por ello, en el presente trabajo se ha adoptado este método con el propósito de imprimir especímenes cilíndricos de PLA y analizar su respuesta frente a la fatiga inducida por flexión rotativa. Durante las distintas impresiones, se variará el número de carcasas y su espesor, obteniendo así la influencia de los parámetros en el ensayo.

Para llevar a cabo el estudio, se han realizado mediciones dimensionales y macrogeométricas de la probeta además del propio ensayo a fatiga.

Una vez obtenidos los resultados, se evalúan, comparan y analizan mediante métodos estadísticos para obtener unas mejores nociones de la configuración óptima para soportar los esfuerzos ensayados.

Palabras clave

Fabricación aditiva, extrusión de material, PLA, análisis dimensional, desviaciones macrogeométricas, ensayo a fatiga, flexión rotativa, análisis estadístico.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA
DEL NÚMERO DE CARCASAS Y SU ESPESOR EN EL
COMPORTAMIENTO A FATIGA DE PROBETAS DE PLA
IMPRESAS MEDIANTE FDM





Abstract

In an increasingly innovation-driven world, additive manufacturing has emerged as a true revolution in the field of industrial production. Therefore, this study has adopted this method with the purpose of printing cylindrical specimens of PLA and analyzing their response to fatigue induced by rotary bending. During the different printing processes, the number of shells and their thickness will be varied, thus obtaining the influence of these parameters on the test.

To carry out the study, dimensional and macrogeometric measurements of the test specimen have been conducted in addition to the fatigue test itself.

Once the results are obtained, they are evaluated, compared and analyzed using statistical methods to gain a better understanding of the optimal configuration to withstand the tested stresses.

Keywords

Additive manufacturing, material extrusion, PLA, dimensional analysis, macrogeometric deviation, fatigue behavior, rotating bending, statistical analysis.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA
DEL NÚMERO DE CARCASAS Y SU ESPESOR EN EL
COMPORTAMIENTO A FATIGA DE PROBETAS DE PLA
IMPRESAS MEDIANTE FDM





Índice de contenido

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introducción | 7 |
| 2. | Objetivos | 9 |
| 3. | Marco teórico | 10 |
| 3.1. | Procesos de fabricación..... | 10 |
| 3.2. | Fabricación aditiva..... | 11 |
| 3.2.1. | Categorías de procesos en la fabricación aditiva | 12 |
| 3.2.2. | Ventajas de la fabricación aditiva | 16 |
| 3.2.3. | Desventajas de la fabricación aditiva | 18 |
| 3.2.4. | Aplicaciones de la fabricación aditiva..... | 19 |
| 3.3. | Modelado por deposición fundida | 21 |
| 3.3.1. | Proceso de fabricación por filamento fundido | 22 |
| 3.3.2. | Equipo..... | 24 |
| 3.3.3. | Materiales..... | 26 |
| 3.3.4. | Parámetros de impresión | 27 |
| 3.4. | Metrología dimensional | 29 |
| 3.4.1. | Macrogeometría..... | 30 |
| 3.4.2. | Microgeometría..... | 33 |
| 3.5. | Ensayo de fatiga..... | 35 |
| 3.5.1. | Geometría para un ensayo a fatiga rotativa | 36 |
| 3.5.2. | Análisis de resultados para un ensayo a fatiga rotativa | 36 |
| 4. | Estado del arte..... | 37 |
| 5. | Metodología de trabajo..... | 39 |
| 5.1. | Selección de parámetros de impresión y material..... | 39 |
| 5.1.1. | Elección de material | 39 |
| 5.1.2. | Elección de parámetros de impresión..... | 40 |
| 5.1.3. | Denominación de probetas | 40 |
| 5.2. | Diseño de probetas | 42 |
| 5.2.1. | Modelado de probetas en SolidWorks | 42 |
| 5.2.2. | Laminado de probetas en IdeaMaker | 43 |
| 5.3. | Impresión de probetas | 45 |
| 5.3.1. | Impresora Raise3D Pro2 | 45 |
| 5.3.2. | Proceso de impresión de las probetas | 46 |
| 5.4. | Control macrogeométrico | 48 |



| | |
|--|----|
| 5.5. Ensayo de fatiga a flexión rotativa..... | 49 |
| 6. Análisis y síntesis de resultados | 56 |
| 6.1. Análisis de desviaciones macrogeométricas | 56 |
| 6.2. Análisis de los resultados del ensayo de fatiga | 60 |
| 6.2.1. Fractografías | 65 |
| 7. Conclusiones..... | 72 |
| 8. Líneas futuras de investigación | 74 |
| 9. Bibliografía..... | 75 |
| ANEXO I: | 79 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Procesos de fabricación aditiva. [1]..... | 7 |
| Figura 2: Comparativa entre fabricación sustractiva y aditiva. [2] | 8 |
| Figura 3: Proceso de embutido. [4] | 10 |
| Figura 4: Proceso de torneado. [5]..... | 11 |
| Figura 5: Proceso de fabricación aditiva. [6] | 11 |
| Figura 6: Diagrama esquemático de dos principios alternativos para la fotopolimerización. [7]..... | 12 |
| Figura 7: Diagrama esquemático de proyección de material. [7] | 13 |
| Figura 8: Diagrama esquemático de proyección de aglutinante. [7]..... | 13 |
| Figura 9: Diagrama esquemático de dos tipos de fusión de lecho de polvo. [7]..... | 14 |
| Figura 10: Diagrama esquemático de la extrusión de material. [7] | 15 |
| Figura 11: Diagrama esquemático de la deposición de energía focalizada. [7] | 15 |
| Figura 12: Diagrama esquemático del laminado de hojas. [7] | 16 |
| Figura 13: Ahorro en costes y velocidad en la producción por FA: hechos y previsiones. [8]..... | 18 |
| Figura 14: Prótesis fabricada mediante FA. [9]..... | 19 |
| Figura 15: Turbina fabricada mediante FA. [10] | 20 |
| Figura 16: Detalle personalizado fabricado por la empresa Mini mediante FA. [11] | 20 |
| Figura 17: Moda textil fabricada mediante FA. [12] | 20 |
| Figura 18: Detalle de chocolate creado con la impresora Mycusini mediante FA. [13] | 21 |
| Figura 19: Estructura fabricada mediante FA. [14]..... | 21 |
| Figura 20: Modelado 3D de producto mediante Solidworks..... | 22 |
| Figura 21: Interfaz del Slicer3D IdeaMaker. [15] | 23 |
| Figura 22: Impresión 3D de una pieza. [16]..... | 23 |
| Figura 23: Eliminación manual de soportes de impresión. [17]..... | 23 |
| Figura 24: Impresora 3D de Voxelab. [18] | 24 |
| Figura 25: Impresora 3D modelo 2156 de Imprimere. [19] | 24 |
| Figura 26: Partes de una impresora 3D. [20]..... | 26 |
| Figura 27: Boquilla de diámetro 0.4 mm. [22] | 28 |
| Figura 28: Densidad de relleno del 12%, 30% y 50%. [23] | 28 |
| Figura 29: Patrones de relleno. [24] | 29 |
| Figura 30: Partes de un pie de rey. [25]..... | 30 |
| Figura 31: Medida con un pie de rey: de interiores (a) y de profundidad (b). [25]..... | 30 |
| Figura 32: Partes de un micrómetro de dos contactos. [25] | 31 |
| Figura 33: Medida de rectitud. [25] | 31 |
| Figura 34: Medida de redondez. [25] | 32 |
| Figura 35: Medida de cilindridad. [25]..... | 32 |
| Figura 36: Medida de concentricidad. [25] | 32 |
| Figura 37: Medida de coaxialidad. [25] | 32 |
| Figura 38: Máquina medidora de forma. [26]..... | 33 |
| Figura 39: Perfil efectivo de una pieza. [25] | 33 |
| Figura 40: Representación del parámetro Ra. [25] | 34 |
| Figura 41: Representación del parámetro Rz. [25]..... | 34 |
| Figura 42: Rugosímetro de la marca Mitutoyo. [27] | 34 |
| Figura 43: Fases de la rotura por fatiga: estado inicial (a), creación de la grieta (b), propagación de la grieta (c), rotura (d). [29]..... | 35 |

| | |
|---|----|
| Figura 44: Geometría tipo. | 36 |
| Figura 45: Comparación gráfica de la resistencia a tracción máxima promedio en función del espesor de la capa para una tasa de alimentación fija (a) y para una orientación de construcción dada (b). [32]..... | 37 |
| Figura 46: Efectos principales en el número de ciclos hasta el fallo para la variable de respuesta. [33] | 38 |
| Figura 47: Plan de trabajo. | 39 |
| Figura 48: Bobina de PLA. [34] | 39 |
| Figura 49: Bolsa hermética con codificación de probetas..... | 41 |
| Figura 50: Probetas de una misma tanda numeradas del 1 al 5. | 41 |
| Figura 51: Dimensiones lineales de la probeta en milímetros. | 42 |
| Figura 52: Dimensiones radiales de la probeta en milímetros..... | 42 |
| Figura 53: Croquis para la operación de Revolución de saliente/base en SolidWorks..... | 42 |
| Figura 54: Operación de Revolución de saliente/base en SolidWorks. | 43 |
| Figura 55: Modelado 3D de la probeta en SolidWorks..... | 43 |
| Figura 56: Interfaz de IdeaMaker tras cargar las probetas..... | 44 |
| Figura 57: Plantilla de configuración de parámetros de IdeaMaker..... | 44 |
| Figura 58: Laminado de probetas en IdeaMaker..... | 45 |
| Figura 59: Impresora Raise3D Pro2. [35]..... | 46 |
| Figura 60: Interfaz de la pantalla táctil de la impresora Raise3d Pro2. [35]..... | 46 |
| Figura 61: Secado de bobina de PLA. | 47 |
| Figura 62: Proceso de impresión de probetas..... | 47 |
| Figura 63: Dificultades para imprimir a 0.3 mm de espesor y 2 y 3 carcacas..... | 48 |
| Figura 64: Micrómetro de exteriores Mitutoyo..... | 48 |
| Figura 65: Puntos de medición de las probetas con micrómetro..... | 49 |
| Figura 66: Soporte de probetas para la medición. | 49 |
| Figura 67: Imperfecciones de la probeta en la zona de contacto con el soporte..... | 49 |
| Figura 68: Máquina para ensayos de fatiga mediante flexión rotativa. | 50 |
| Figura 69: Caja de insonorización de la máquina de fatiga. | 50 |
| Figura 70: Masa aplicada para el ensayo de fatiga..... | 51 |
| Figura 71: Pesa de 5 N. | 51 |
| Figura 72: Velocidad fijada en 1800 rpm para el ensayo..... | 52 |
| Figura 73: Terraaja para roscado M10..... | 52 |
| Figura 74: Montaje final para el ensayo. | 53 |
| Figura 75: Contador de ciclos. | 53 |
| Figura 76: Sistema de parada automática de la máquina. | 53 |
| Figura 77: Rotura de probeta. | 54 |
| Figura 78: Fallo de rotura en B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_CO. | 54 |
| Figura 79: Esquema del ensayo de fatiga. | 54 |
| Figura 80: Pie de rey digital Mitutoyo. | 55 |
| Figura 81: Variación porcentual del diámetro respecto al nominal con 0.2 mm de espesor. | 56 |
| Figura 82: Variación porcentual del diámetro respecto al nominal con 0.3 mm de espesor. | 57 |
| Figura 83: Variación porcentual del diámetro respecto al nominal con 0 carcacas. | 59 |
| Figura 84: Variación porcentual del diámetro respecto al nominal con 1 carcaca..... | 59 |
| Figura 85: Variación porcentual del diámetro respecto al nominal con 2 carcacas. | 60 |
| Figura 86: Variación porcentual del diámetro respecto al nominal con 3 carcacas. | 60 |



| | |
|--|----|
| Figura 87: Número de ciclos medio en función del número de carcasa..... | 61 |
| Figura 88: Vida a fatiga para 0.2 mm de espesor y 0 carcasa. | 62 |
| Figura 89: Vida a fatiga para 0.2 mm de espesor y 1 carcasa..... | 62 |
| Figura 90: Vida a fatiga para 0.2 mm de espesor y 2 carcasa. | 63 |
| Figura 91: Vida a fatiga para 0.2 mm de espesor y 3 carcasa. | 63 |
| Figura 92: Vida a fatiga para 0.3 mm de espesor y 0 carcasa. | 63 |
| Figura 93: Vida a fatiga para 0.3 mm de espesor y 1 carcasa..... | 64 |
| Figura 94: Vida a fatiga para 0.3 mm de espesor y 2 carcasa. | 64 |
| Figura 95: Vida a fatiga para 0.3 mm de espesor y 3 carcasa. | 64 |
| Figura 96: Microscopio Zeiss. | 65 |
| Figura 97: Interfaz del programa ZEN core..... | 66 |
| Figura 98: Fractografía de la Probeta 2 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C1. | 66 |
| Figura 99: Fractografía de la Probeta 3 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C2. | 67 |
| Figura 100: Fractografía de la Probeta 4 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C3. | 67 |
| Figura 101: Fractografía de la Probeta 4 de la configuración B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C1. | 68 |
| Figura 102: Fractografía de la Probeta 3 de la configuración B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C2. | 68 |
| Figura 103: Fractografía de la Probeta 3 de la configuración B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C3. | 68 |
| Figura 104: Fractografía de la Probeta 2 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C0. | 69 |
| Figura 105: Fractografía de la Probeta 2 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C0. | 69 |
| Figura 106: Fractografía de perfil de la Probeta 1 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C1. | 70 |
| Figura 107: Fractografía de la Probeta 1 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C1. | 70 |
| Figura 108: Fractografía de la Probeta 4 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C0. | 70 |
| Figura 109: Fractografía del acabado superficial de una probeta sin carcasa..... | 71 |
| Figura 110: Fractografía del acabado superficial de una probeta con 2 carcasa..... | 71 |



Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Resumen de los materiales de impresión 3D más utilizados. [21] | 26 |
| Tabla 2: Clasificación de la metrología dimensional..... | 29 |
| Tabla 3: Datos del control dimensional para 0 carcasa y 0.2 mm de espesor..... | 56 |
| Tabla 4: Datos del control dimensional para 1 carcasa y 0.2 mm de espesor. | 56 |
| Tabla 5: Datos del control dimensional para 2 carcasa y 0.2 mm de espesor..... | 57 |
| Tabla 6: Datos del control dimensional para 3 carcasa y 0.2 mm de espesor..... | 57 |
| Tabla 7: Datos del control dimensional para 0 carcasa y 0.3 mm de espesor..... | 57 |
| Tabla 8: Datos del control dimensional para 1 carcasa y 0.3 mm de espesor. | 57 |
| Tabla 9: Datos del control dimensional para 2 carcasa y 0.3 mm de espesor..... | 58 |
| Tabla 10: Datos del control dimensional para 3 carcasa y 0.3 mm de espesor..... | 58 |
| Tabla 11: Valores medios del número de ciclos soportado por las probetas..... | 61 |
| Tabla 12: Valores medios de la longitud de rotura de las probetas. | 65 |

1. Introducción

En un contexto marcado por la creciente influencia de la innovación tecnológica, la fabricación aditiva ha surgido como una revolución en el ámbito de la producción. La creación de objetos complejos a partir de capas sucesivas de material está cambiando la forma en la que concebimos la fabricación tradicional.

La fabricación aditiva (FA), también conocida como impresión 3D, es un proceso de fabricación que construye objetos capa por capa a partir de un modelo digital. Utiliza materiales como plástico, metal o cerámica y permite la creación de formas complejas y personalizadas. Es ampliamente utilizada en diversas industrias como la automotriz, la aeroespacial y la médica.

Existen siete procesos que engloban la FA, los cuales se diferencian en el estado en el que se encuentra la materia prima, la generación de capas y la manera en la que el material se fusiona (Figura 1).

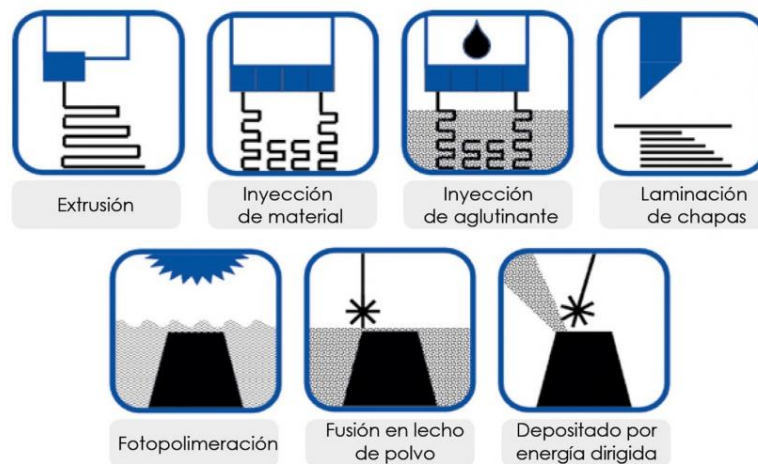


Figura 1: Procesos de fabricación aditiva. [1]

La FA también tiene un impacto positivo en el medio ambiente. Al reducir el desperdicio de material y optimizar los procesos de producción, esta técnica promueve la sostenibilidad y la eficiencia en la fabricación. Además, al eliminar la necesidad de transportar productos acabados en grandes cantidades, se reducen las emisiones asociadas al transporte y se fomenta la producción localizada.

La impresión 3D no se limita solo a la producción de objetos físicos. Actualmente, se están explorando nuevos materiales y técnicas para imprimir componentes electrónicos, tejidos biológicos e incluso alimentos. Estos avances abren un mundo de posibilidades infinitas para la investigación científica, la medicina, la ingeniería y muchos otros campos.

Por lo tanto, la fabricación aditiva posee grandes ventajas respecto a los métodos de fabricación sustractiva tradicionales como pueden ser el torneado, el fresado o el Control Numérico Computacional (CNC). La FA construye objetos capa por capa a partir de un modelo digital, mientras que la fabricación sustractiva remueve material de una pieza para obtener la forma deseada, siendo este imposible de reutilizar (Figura 2). Además, la fabricación aditiva permite

crear formas más complejas y personalizadas, mientras que la sustractiva es adecuada para producir piezas con geometrías más simples.

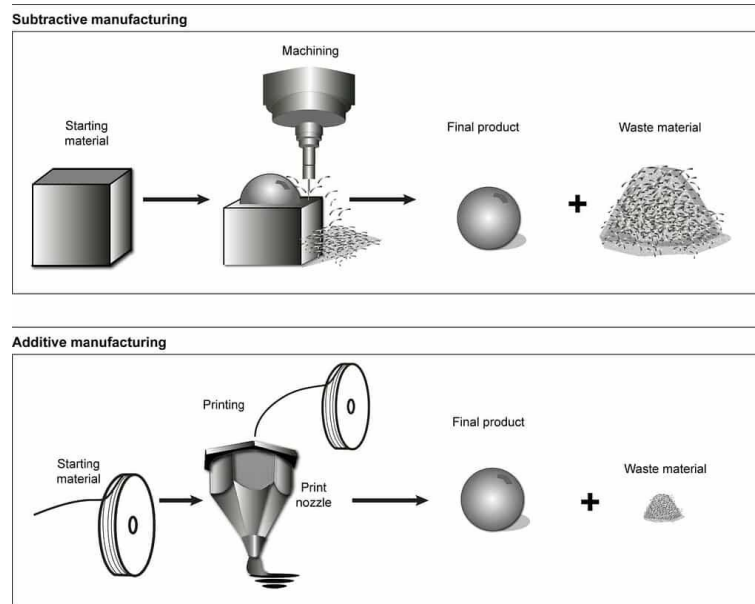


Figura 2: Comparativa entre fabricación sustractiva y aditiva. [2]

Aunque la fabricación aditiva tiene numerosas ventajas, también presenta algunos inconvenientes a destacar. En primer lugar, el tiempo requerido para imprimir objetos puede ser considerablemente mayor en comparación con los métodos tradicionales de fabricación. Además, la calidad de las superficies de las piezas impresas puede no ser tan suave o precisa como en la fabricación sustractiva lo que implica una mala precisión dimensional y una poca repetibilidad geométrica. La disponibilidad de materiales adecuados puede ser limitada, lo que restringe las opciones de diseño. Por último, la resistencia y durabilidad de las piezas impresas pueden ser inferiores en comparación con las fabricadas con métodos convencionales, teniendo así unas peores características mecánicas. Estos inconvenientes son debidos al proceso de calentamiento y enfriamiento necesario para la creación de la pieza. Este ciclo térmico rápido provoca un fenómeno conocido como “warping”, que resulta en la contracción del material depositado y afecta tanto su comportamiento dimensional como mecánico. No obstante, existen medidas para mitigar estos problemas, como aumentar la temperatura de la cama de impresión, aplicar técnicas de curado térmico o utilizar soportes circulares durante la generación de las piezas, entre otras posibilidades.



2. Objetivos

El objetivo principal del presente proyecto es evaluar la influencia del número de carcassas y su espesor en probetas normalizadas fabricadas mediante la técnica de fabricación aditiva por extrusión de material (FDM) utilizando PLA como material base. El enfoque del estudio se centrará en la realización de ensayos de fatiga por flexión rotativa.

Para lograr el objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos complementarios:

- Realizar un control geométrico dimensional en cada una de las probetas.
- Someter a cada probeta al ensayo de fatiga por flexión rotativa, manteniendo constante el peso del estudio, para generar comparativas basadas en el número de carcassas y ciclos.
- Estudiar la generación de grietas mediante fotografías microscópicas de la zona de rotura en los casos más interesantes.
- Analizar los datos mediante metodologías estadísticas.
- Cuantificar la influencia de los parámetros variables en los resultados obtenidos.

El propósito de estos objetivos es establecer una opción óptima para la fabricación de herramientas y útiles con una resistencia aceptable.

3. Marco teórico

En primer lugar, es fundamental situar en contexto el tema central abordado en este trabajo: la fabricación aditiva, más conocida como Impresión 3D. Se trata de un proceso de manufactura relativamente reciente, que presenta ciertas ventajas en comparación con otros métodos de fabricación; no obstante, se evidencian aspectos susceptibles de mejora.

Como se ha mencionado anteriormente, en este proceso de fabricación aún no se ha alcanzado una relación “perfecta” entre los parámetros de impresión que permitan obtener un rendimiento óptimo debido a la multitud de variables involucradas. Sin embargo, la fabricación aditiva es un proceso que actualmente está siendo ampliamente investigado debido a sus numerosas ventajas en comparación con los métodos de fabricación convencionales. Estas investigaciones buscan determinar los valores más recomendables para algunos de estos parámetros y su verdadero impacto en el resultado final de la pieza.

Uno de los aspectos cruciales de este proceso es el material utilizado. A lo largo de esta memoria se presentará el material más comúnmente empleado en la FA: el ácido poliláctico (PLA).

El estudio se llevará a cabo sometiendo probetas fabricadas con distintos parámetros de impresión a ensayos de fatiga. Posteriormente, se aplicarán técnicas de análisis de resultados mediante diseño de experimentos para evaluar la influencia de dichos parámetros en el resultado final.

3.1. Procesos de fabricación

Un *Proceso de fabricación* es una secuencia organizada de pasos y operaciones técnicas que transforman materias primas o componentes en productos terminados, siguiendo una metodología específica para obtener el resultado deseado. Dicho resultado debe cumplir una serie de especificaciones, ya sean de forma, color o funcionalidad.

Como se plantea en la norma UNE-EN ISO / ASTM 52900:2022 [3], la transformación de materia prima a producto que implica un proceso de fabricación puede lograrse por uno o más **principios básicos**, los cuales definen la forma en la que el proceso transforma el material:

- **Conformado:** técnica de fabricación que da forma a materiales sólidos, como metales, plásticos o cerámicas, mediante la aplicación de fuerzas mecánicas o térmicas (el producto obtiene su forma final a través de la aplicación de presión de otro cuerpo sobre él). Existen diferentes métodos de conformado, como el forjado, estampado, laminado, extrusión, embutido (Figura 3), moldeo por inyección, entre otros.

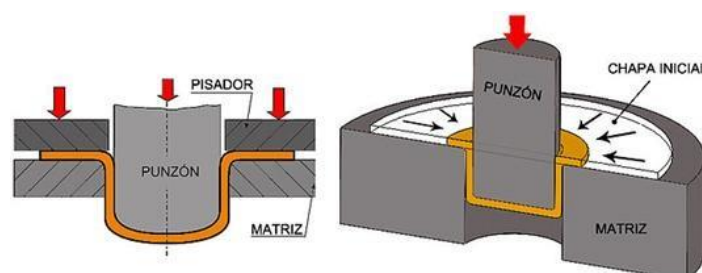


Figura 3: Proceso de embutido. [4]

- **Fabricación sustractiva:** proceso de manufactura que consiste en la sustracción progresiva de material de una pieza bruta hasta obtener la forma y dimensión deseada. Engloba varios procesos controlados de mecanizado y eliminación de materiales en los que herramientas como tornos, fresadoras y taladros se utilizan para cortar, perforar, fresar o torneare la materia prima hasta obtener la pieza final con precisión.

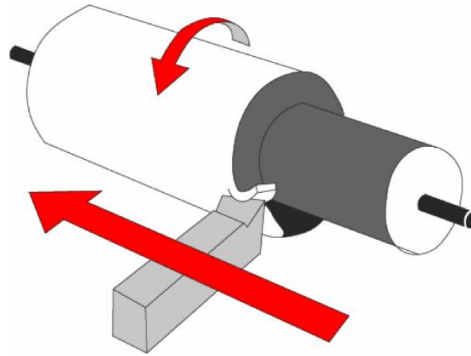


Figura 4: Proceso de torneado. [5]

- **Fabricación aditiva:** proceso de fabricación que construye objetos mediante la adición controlada de material, generalmente capa a capa. Dependiendo de la tecnología, la impresora 3D deposita material, funde y derrite polvo o cura materiales de fotopolímero líquido para crear piezas basándose en los datos proporcionados por el software.

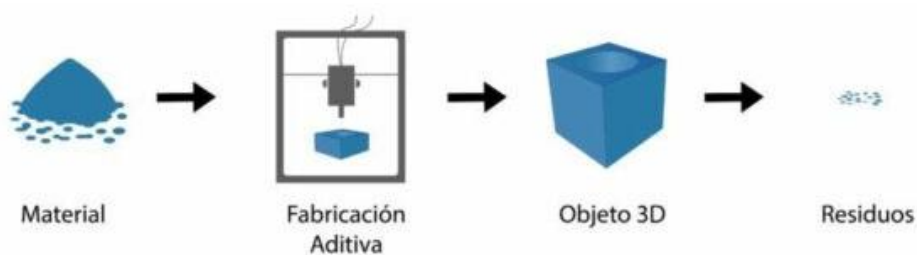


Figura 5: Proceso de fabricación aditiva. [6]

3.2. Fabricación aditiva

Siguiendo con la definición anterior, la *fabricación aditiva*, también conocida por las siglas *FA*, es un tipo de proceso de manufactura que se caracteriza por la adición controlada de material hasta alcanzar el objeto o resultado final deseado. Una definición más exhaustiva y precisa puede ser hallada en la norma UNE-EN ISO / ASTM 52900:2022 [3], la cual define la *fabricación aditiva* como el proceso de unión de materiales para fabricar piezas u objetos a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa a capa, en oposición a métodos de fabricación mediante eliminación de material y de conformado.

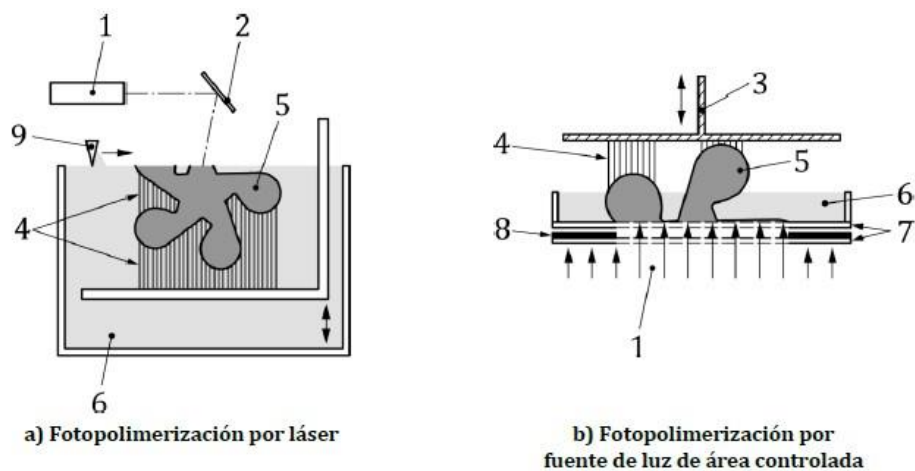
En los procesos de fabricación por conformado o sustractivos, se encuentran diversas técnicas, como el moldeo por inyección y el torneado, respectivamente. De manera similar, en la clasificación de fabricación aditiva, existen numerosos procesos, los cuales serán presentados a continuación.

3.2.1. Categorías de procesos en la fabricación aditiva

Como se detalla en la norma UNE-EN ISO 17296-2:2017 [7], se identifican 7 grupos distintos en los procesos de fabricación aditiva. Estos grupos se clasifican según la maquinaria empleada, el material utilizado y el tipo de deposición. A continuación, se describen cada uno de ellos, especificando el material empleado, el mecanismo de unión, la fuente de activación y, si es pertinente, el procesado secundario.

- **Fotopolimerización en tanque o cuba**

Definido en la norma UNE-EN ISO 17296-2:2017 [7] como el proceso de fabricación aditiva en el que el fotopolímero líquido se cura selectivamente en una cuba mediante polimerización activada por luz (Figura 6).



Leyenda

- | | |
|--|--|
| 1 Fuente de energía luminosa | 6 Cuba llena de resina líquida fotocurable |
| 2 Espejo inclinado con enfoque | 7 Placas transparentes |
| 3 Plataforma de fabricación y elevador | 8 Máscara de fotos |
| 4 Estructura de soporte | 9 Mecanismo de recubrimiento y nivelación de superficies |
| 5 Producto | |

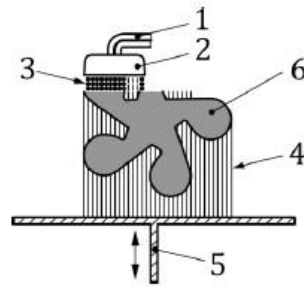
Figura 6: Diagrama esquemático de dos principios alternativos para la fotopolimerización. [7]

En el proceso de fotopolimerización la materia prima utilizada es resina fotorreactiva, que puede contener o no relleno y se encuentra en estado líquido o pasta. El mecanismo de unión se lleva a cabo mediante una reacción química y la fuente de activación comúnmente empleada es la radiación UV generada por láseres o lámparas. Como procesado secundario se requiere de limpieza, eliminación del material de soporte y post-curado mediante una mayor exposición UV.

- **Proyección de material**

Definido en la norma UNE-EN ISO 17296-2:2017 [7] como el proceso de fabricación aditiva en el cual se depositan selectivamente gotas del material de fabricación (Figura 7).

En el proceso de proyección de material la materia prima utilizada es fotopolímero líquido o cera fundida, que puede contener o no relleno. El mecanismo de unión se lleva a cabo mediante una reacción química o una adhesión por solidificación de material fundido y la fuente de activación es la radiación luminosa. Como procesado secundario se requiere de limpieza, eliminación del material de soporte y post-curado mediante una mayor exposición a la radiación luminosa.



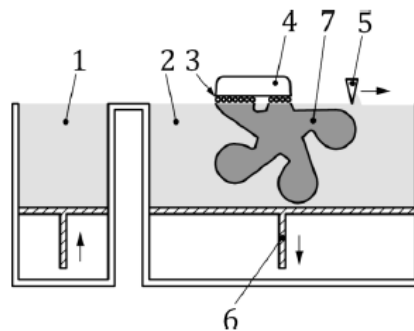
Leyenda

- 1 Sistema de suministro de materia prima para el material de fabricación y el soporte (opcional dependiendo del proceso específico)
- 2 Aparato dispensador (fuente de radiación luminosa o térmica)
- 3 Gotas de material de fabricación
- 4 Estructura de soporte
- 5 Plataforma de fabricación y elevador
- 6 Producto

Figura 7: Diagrama esquemático de proyección de material. [7]

• **Proyección de aglutinante**

Definido en la norma UNE-EN ISO 17296-2:2017 [7] como el proceso de fabricación aditiva en el que un agente líquido aglutinante se deposita selectivamente para unir materiales en polvo (Figura 8).



Leyenda

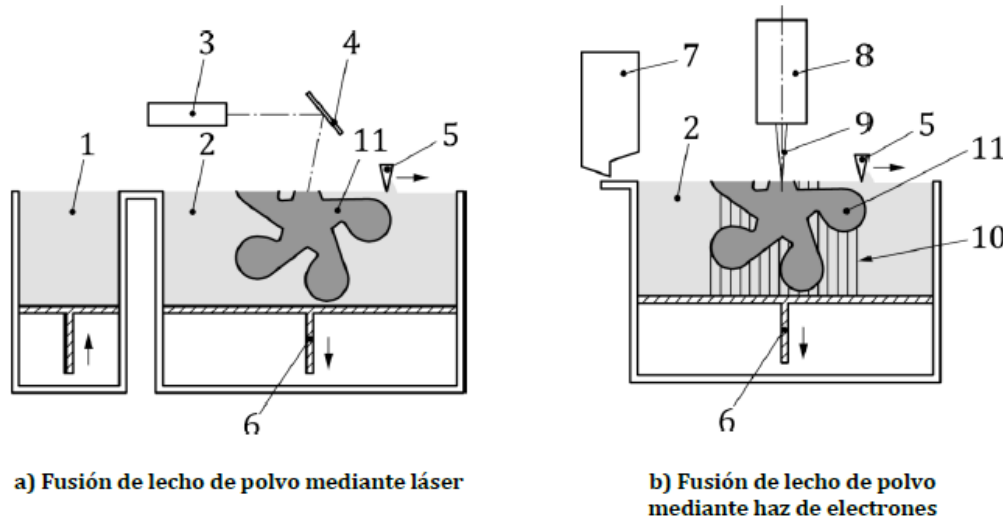
- 1 Sistema de alimentación de polvo
- 2 Material en polvo distribuido en un lecho de polvo
- 3 Agente líquido aglutinante
- 4 Aparato dispensador que incluye la conexión al sistema de alimentación del aglutinante
- 5 Dispositivo de extensión de polvo
- 6 Plataforma de fabricación y elevador
- 7 Producto

Figura 8: Diagrama esquemático de proyección de aglutinante. [7]

En el proceso de proyección de aglutinante la materia prima utilizada es polvo, mezclas de polvo o materiales en forma de partículas y un agente líquido adhesivo/aglutinante. El mecanismo de unión se lleva a cabo mediante una reacción química y/o térmica y la fuente de activación es la reacción química. Como procesado secundario se requiere de la eliminación del polvo suelto y la impregnación o infiltración de material líquido adecuado en función del material en polvo y de la aplicación prevista.

- **Fusión de lecho de polvo**

Definido en la norma UNE-EN ISO 17296-2:2017 [7] como el proceso de fabricación aditiva en el cual la energía térmica funde selectivamente ciertas zonas de un lecho de polvo (Figura 9).



Leyenda

- | | |
|---|--------------------------------|
| 1 Sistema de alimentación de polvo (en algunos casos, contenedor del polvo como en 7) | 7 Contenedor de materia prima |
| 2 Material en polvo distribuido en un lecho de polvo | 8 Pistola de haz de electrones |
| 3 Láser | 9 Haz de electrones focalizado |
| 4 Espejo inclinado con enfoque | 10 Estructura de soporte |
| 5 Dispositivo de distribución del polvo | 11 Producto |
| 6 Plataforma de fabricación | |

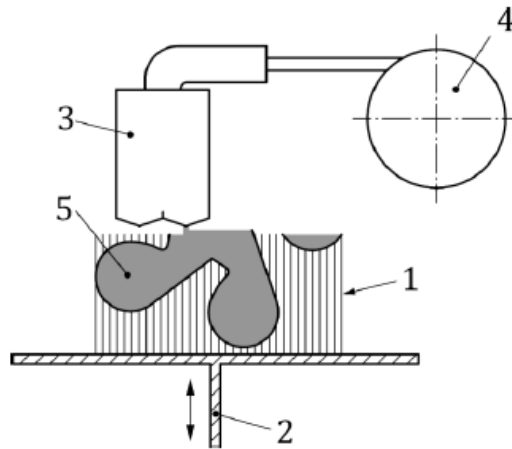
Figura 9: Diagrama esquemático de dos tipos de fusión de lecho de polvo. [7]

En el proceso de fusión de lecho de polvo la materia prima utilizada son diversos polvos: polímeros termoplásticos y cerámicas estructurales o industriales, que pueden contener o no relleno y aglutinantes. El mecanismo de unión se lleva a cabo mediante una reacción química y la fuente de activación es la energía térmica, generalmente transferida por el láser, un haz de electrones y/o lámparas de infrarrojos. Como procesado secundario se requiere de la eliminación de polvo suelto y, si procede, del material de soporte, y diversas operaciones para mejorar el acabado superficial, la precisión dimensional y las propiedades del material.

- **Extrusión de material**

Definido en la norma UNE-EN ISO 17296-2:2017 [7] como el proceso de fabricación aditiva en el cual el material se dispensa selectivamente a través de una boquilla o un orificio (Figura 10).

En el proceso de extrusión de material la materia prima utilizada es filamento o pasta, generalmente termoplásticos y cerámicas estructurales. El mecanismo de unión se lleva a cabo mediante una reacción química o térmica y la fuente de activación es calor, ultrasonidos o la reacción química entre componentes. Como procesado secundario se requiere de la eliminación de la estructura de soporte.



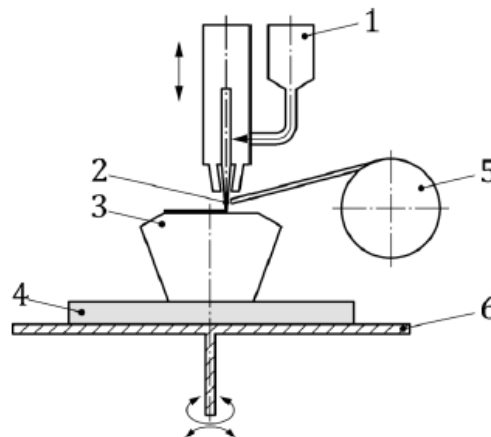
Leyenda

- 1 Estructura de soporte
- 2 Plataforma de fabricación y elevador
- 3 Boquilla calefactada
- 4 Suministro de materias primas
- 5 Producto

Figura 10: Diagrama esquemático de la extrusión de material. [7]

- **Deposición de energía focalizada**

Definido en la norma UNE-EN ISO 17296-2:2017 [7] como el proceso de fabricación aditiva en el cual se utiliza energía térmica focalizada para unir materiales mediante fusión, a medida que se depositan (Figura 11).



Leyenda

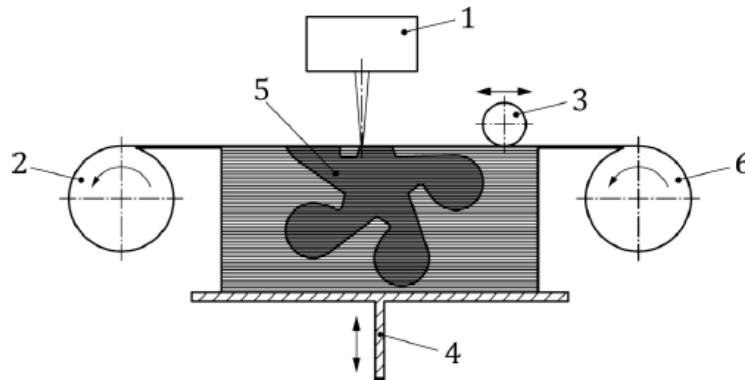
- 1 Tolva de polvo
- 2 Haz de energía focalizado, por ejemplo: láser, haz de electrones o arco de plasma
- 3 Producto
- 4 Sustrato
- 5 Bobina de hilo (filamento)
- 6 Plataforma de fabricación

Figura 11: Diagrama esquemático de la deposición de energía focalizada. [7]

En el proceso de deposición de energía focalizada la materia prima utilizada es polvo o filamento, generalmente metálico. El mecanismo de unión se lleva a cabo mediante una reacción química y la fuente de activación es láser, haz de electrones o arco de plasma. Como procesado secundario se requiere de mejora del acabado superficial.

- **Laminado de hojas**

Definido en la norma UNE-EN ISO 17296-2:2017 [7] como el proceso de fabricación aditiva en el cual el material en forma de láminas u hojas se une para formar un objeto (Figura 12).



Leyenda

- 1 Dispositivo de corte
- 2 Bobina de material sobrante
- 3 Rodillo laminador
- 4 Plataforma de fabricación y elevador
- 5 Producto
- 6 Bobina de materia prima

Figura 12: Diagrama esquemático del laminado de hojas. [7]

En el proceso de laminado de hojas la materia prima utilizada es material en láminas, generalmente papel, lámina metálica, polímeros o láminas compuestas. El mecanismo de unión se lleva a cabo mediante una reacción química o térmica y la fuente de activación es calentamiento localizado o a gran escala, reacción química y transductores ultrasónicos. Como procesado secundario se requiere de la eliminación de residuos y, opcionalmente, sinterizado, infiltración, tratamiento térmico, arenado o mecanizado, para mejorar el acabado superficial.

En la **presente investigación** se va a seguir un proceso de FA basado en la **extrusión de material**, o también conocido como Modelado por Deposición Fundida, Fused Deposition Modeling (FDM) en inglés.

3.2.2. Ventajas de la fabricación aditiva

Como se ha mencionado anteriormente, la FA es una forma de fabricación relativamente nueva e innovadora. Esta presenta significativas ventajas frente a la fabricación tradicional, las cuales son expuestas en el artículo de Mohsen Attaran titulado: *“The rise of 3D printing: The advantages*

of additive manufacturing over traditional manufacturing” [8]. Algunas de estas ventajas a destacar son:

- **Eficiencia industrial**

Desde este punto de vista, el consumidor es capaz de fabricar, por ejemplo, recambios para piezas previamente adquiridas, puesto que le es suficiente con contar con una Impresora 3D y el archivo de dicha pieza.

- **Personalización masiva**

A diferencia de la fabricación tradicional, en la que la personalización de productos afecta de forma directa tanto en el coste de la pieza como en el tiempo de producción, la FA nos facilita esta tarea sin que el tiempo de entrega se vea demasiado afectado.

- **Fabricación a la carta**

La necesidad de mantener un gran inventario de ciertos productos pasará a ser cosa del pasado dado que, con tan solo tener una Impresora 3D y el archivo de la pieza o producto deseado, se puede imprimir en cualquier momento.

- **Fabricación descentralizada**

Al igual que es posible fabricar ciertos productos mediante la FA en cualquier momento, también es posible hacerlo en casi cualquier lugar. Por lo tanto, los costos logísticos se reducen notablemente y, con esta reducción, también se disminuye el impacto ambiental.

- **Fabricación de componentes**

La FA admite la fabricación de cantidades bajas de componentes que deben ser impresos según ciertas especificaciones con poca tolerancia, lo que presenta una gran ventaja frente a procesos de fabricación tradicionales.

- **Impresión de sistemas completos**

La capacidad de obtener la impresión de sistemas o subsistemas completos se debe a la capacidad multimaterial de la fabricación aditiva, se pueden realizar impresiones utilizando dos o más materiales simultáneamente.

- **Mejora de la calidad**

Complementando lo comentado, la FA ofrece calidad en cuanto a tolerancias y también brinda una calidad notable al consumidor, ya que proporciona la posibilidad de convertirlo en consumidor-productor. Además, la FA ha aportado aplicaciones que han mejorado considerablemente la calidad de vida de las personas, por ejemplo, en prótesis e implantes.

- **Modificaciones y rediseños sin penalizaciones**

Teniendo en cuenta que durante el proceso de producción de un producto se producen innumerables cambios en el diseño, la FA presenta una gran ventaja frente a la fabricación tradicional, puesto que la última implica en estos casos un incremento de los costes y del tiempo de producción, mientras que en la FA estos valores no se ven tan afectados.

Como era de esperar, al tratarse de un método de fabricación “novedoso”, aún queda espacio para mejoras. Aun así, en la siguiente figura se muestra cómo han ido evolucionando los parámetros de coste y velocidad a lo largo de los años, junto con una posible proyección futura de los mismos.

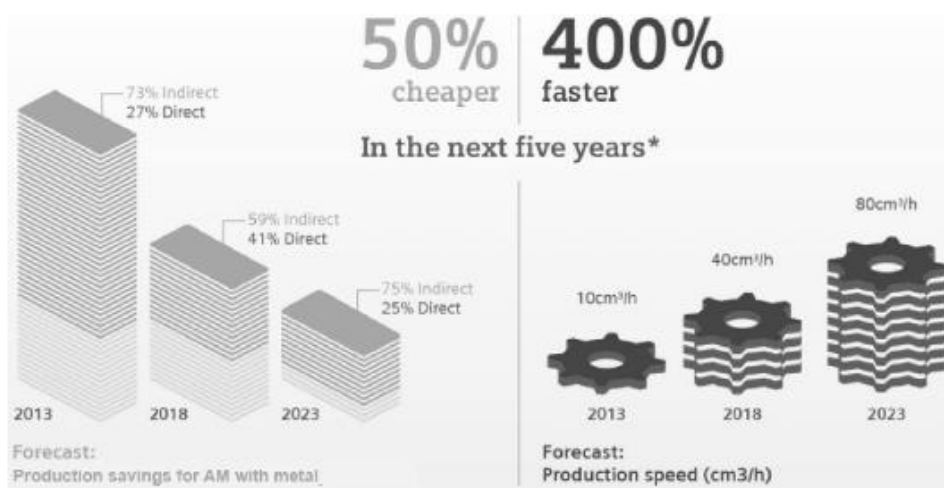


Figura 13: Ahorro en costes y velocidad en la producción por FA: hechos y previsiones. [8]

Se puede concluir que la fabricación aditiva presenta ventajas en las siguientes áreas de aplicación:

- Prototipos rápidos.
- Producción de piezas de recambio.
- Fabricación de pequeños volúmenes.
- Artículos personalizados.
- Piezas de trabajo muy complejas.
- Fabricación in situ y bajo demanda.
- Reparación rápida.

3.2.3. Desventajas de la fabricación aditiva

Al igual que la fabricación aditiva representa una técnica novedosa en la fabricación, lo que conlleva notables ventajas respecto a los métodos tradicionales, también presenta ciertas desventajas. Estos inconvenientes se convierten en obstáculos para el crecimiento de la fabricación aditiva, tal como se describe en el artículo de Mohsen Attaran: “*The rise of 3D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing*” [8]. En dicho artículo se exponen las siguientes limitaciones:

- **Restricciones en cuanto al tamaño de la pieza**

Como se explicará en la sección 3.3.2., las impresoras 3D están compuestas por diversos componentes, entre los cuales se encuentra la boquilla. La función de la boquilla es permitir el flujo de material y depositarlo en el lugar adecuado. Por tanto, su tamaño impone una restricción significativa con relación al tamaño de la pieza dado que el material ha de ser capaz de fluir por dentro de esta.

- **Tiempo de producción**

En este contexto, la fabricación aditiva presenta desventajas en comparación con los métodos de fabricación tradicionales. Cuando se trata de productos que necesitan ser fabricados en grandes cantidades, los métodos de fabricación tradicionales serán siempre más adecuados, ya que proporcionan la rapidez que la fabricación aditiva no puede lograr. Sin embargo, en situaciones donde se requieran productos personalizados o no se necesite producción a gran escala, la FA puede ser viable y, en algunos casos, ofrecer ventajas.

- **Coste**

El costo del equipo requerido para realizar procesos de impresión 3D plantea una preocupación, aunque es importante destacar que este aspecto está en proceso de mejora. A medida que la fabricación aditiva se integre de manera más amplia en la industria manufacturera, es probable que el costo de los equipos y de los materiales disminuya, lo que lo hará más accesible y eliminará la barrera de los costos.

- **Regulación**

Como sucede con cualquier tecnología nueva, el uso de la FA aún no está completamente regulado. Esto plantea un problema ya que aún no están definidos claramente los límites en cuanto a normativas. Con el tiempo, se espera que la fabricación aditiva esté completamente regulada en este aspecto, lo que evitará que se convierta en un obstáculo para su desarrollo.

3.2.4. Aplicaciones de la fabricación aditiva

A continuación, se enumeran las principales aplicaciones de la fabricación aditiva que están transformando una variedad de campos industriales.

Uno de los campos más notables es la **industria médica**, donde la FA ha revolucionado la producción de prótesis y dispositivos médicos personalizados. Esta tecnología ha permitido la creación de implantes y prótesis hechos a medida (Figura 14), adaptados a la anatomía única de cada paciente, lo que mejora significativamente la eficacia y la comodidad de los tratamientos médicos.



Figura 14: Prótesis fabricada mediante FA. [9]

Otro campo de aplicación prometedor es la **industria aeroespacial**. La FA ha allanado el camino para la creación de componentes aeroespaciales más ligeros, eficientes y resistentes, lo que se

traduce en aeronaves más avanzadas y económicas. Los motores de aeronaves, por ejemplo, pueden beneficiarse de piezas impresas en 3D con geometrías complejas y mejoras en el rendimiento, reduciendo el consumo de combustible y las emisiones.



Figura 15: Turbina fabricada mediante FA. [10]

En el **sector automotriz**, la FA ha demostrado ser un recurso invaluable para el diseño y la producción de piezas personalizadas (Figura 16) y prototipos de vehículos. Esto ha acelerado significativamente los procesos de desarrollo y reducido los costos asociados con la fabricación de herramientas y moldes tradicionales. Además, la posibilidad de crear componentes livianos y optimizados ha contribuido a la mejora de la eficiencia del combustible y la seguridad en los automóviles.



Figura 16: Detalle personalizado fabricado por la empresa Mini mediante FA. [11]

La fabricación aditiva también está impactando en el **mundo de la moda y el diseño**. Diseñadores innovadores están utilizando esta tecnología para crear prendas de vestir únicas y accesorios de vanguardia. La capacidad de producir productos personalizados a pequeña escala ha revolucionado la industria de la moda, permitiendo la expresión individual y la creación de piezas realmente exclusivas.

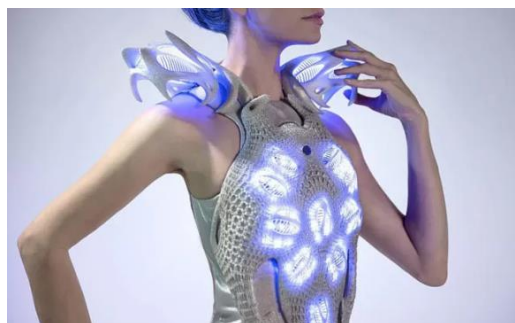


Figura 17: Moda textil fabricada mediante FA. [12]

En el **ámbito gastronómico**, la FA está abriendo nuevas posibilidades para la creación de alimentos y presentaciones culinarias innovadoras. Chefs y cocineros están utilizando tecnologías de impresión 3D para crear platos únicos con formas y texturas sorprendentes, elevando la experiencia gastronómica a nuevos niveles de creatividad y diseño.



Figura 18: Detalle de chocolate creado con la impresora Mycusini mediante FA. [13]

Finalmente, en el **campo arquitectónico**, la FA está revolucionando la forma en que se diseñan y construyen estructuras. La capacidad de imprimir componentes arquitectónicos complejos y personalizados está permitiendo la creación de edificios únicos y sostenibles, con formas y diseños audaces que antes eran difíciles de lograr con métodos tradicionales de construcción.



Figura 19: Estructura fabricada mediante FA. [14]

3.3. Modelado por deposición fundida

El Modelado por Deposición Fundida (FDM) o Fabricación por Filamento Fundido (FFF), como se ha mencionado previamente, es un tipo de proceso dentro de la fabricación aditiva. Básicamente, consiste en la deposición controlada de material, en forma de capas, para obtener el producto final deseado.

Este proceso se realiza utilizando bobinas de material, denominadas filamento, que pueden ser de origen metálico o plástico. El material es expulsado a través de una boquilla, que se mantiene a una temperatura superior a la temperatura de fusión del material, permitiendo que salga en un estado semilíquido.

A continuación, se detallará el procedimiento para obtener un producto fabricado mediante FDM, se explicarán las características y componentes principales de una impresora 3D, se abordarán los materiales más comúnmente utilizados y, por supuesto, se analizarán los parámetros que influyen en este proceso de impresión.

3.3.1. Proceso de fabricación por filamento fundido

Para conseguir la fabricación de cualquier producto mediante FFF, será esencial seguir una serie de etapas que culminarán en la obtención del producto final.

1. Generación de un modelo 3D

El primer paso consistirá en crear un modelo 3D del objeto que se desea fabricar. Para ello, en la actualidad, existe una amplia variedad de software de modelado CAD disponible, tales como Autocad, Rhinoceros 3D, Catia, Solidworks (Figura 20), etc. Todas estas herramientas nos permiten definir con gran precisión la geometría de la pieza. Además, algunos de ellos comparten interfaces similares y son bastante intuitivos de utilizar.

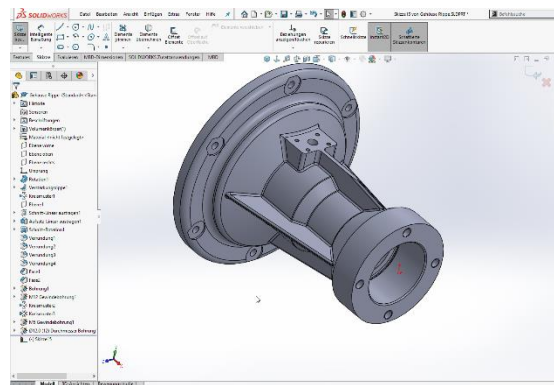


Figura 20: Modelado 3D de producto mediante Solidworks.

2. Laminado del modelo 3D

Los laminadores desempeñan un papel intermedio entre el modelo 3D y la impresión final. Al igual que con los programas de modelado CAD, existe una amplia gama de laminadores o Slicers 3D disponibles, tales como Cura, 3DPrinterOS, IdeaMaker y Slic3r, entre otros. Se debe tener precaución al seleccionar el adecuado, ya que no todos son compatibles con todos los tipos de archivos que se pueden encontrar (por ejemplo, .stl, .obj, .x3d).

Estos programas se encargan de dividir la pieza en capas y generar el código G necesario para que el extrusor de la impresora 3D pueda fabricar la pieza. Este código incluye la definición de movimientos, temperaturas, relleno y otros parámetros esenciales para el proceso. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos parámetros estarán siempre condicionados por las características específicas de la impresora 3D utilizada.



Figura 21: Interfaz del Slicer3D IdeaMaker. [15]

3. Impresión de la pieza

En este punto, la labor recae en la impresora 3D, que se encargará de procesar el código G generado por el laminador y comenzará a fabricar el objeto deseado. La duración de este paso variará dependiendo de la complejidad de la geometría de la pieza y su tamaño.

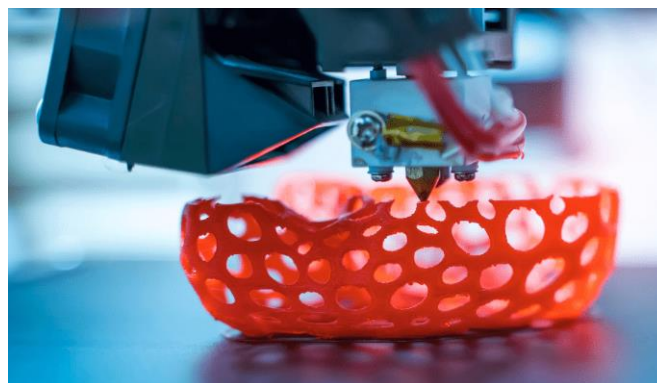


Figura 22: Impresión 3D de una pieza. [16]

4. Extracción de la pieza y postprocesado

Una vez finalizada la impresión, se procederá a retirar la pieza del equipo. En caso de que la pieza tenga soportes de impresión, rebabas o algún defecto que requiera ser lijado, se llevará a cabo un proceso de postprocesado para lograr el resultado deseado.



Figura 23: Eliminación manual de soportes de impresión. [17]

3.3.2. Equipo

El equipo necesario para llevar a cabo la fabricación mediante tecnología FFF consiste únicamente en una impresora 3D. Estas impresoras están disponibles en una amplia gama de precios, la más económica cuesta alrededor de 200 €, como el modelo que se ilustra en la Figura 24 de la marca Voxelab, diseñado generalmente para uso doméstico y perfecto para introducirse en el mundo de la impresión 3D.

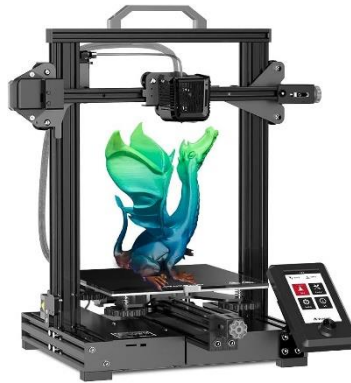


Figura 24: Impresora 3D de Voxelab. [18]

Por otro lado, existen modelos como el 2156 de Imprimere, que se venden por hasta 2 millones y medio de dólares y están destinados a la fabricación de hormigón en el ámbito de la construcción.

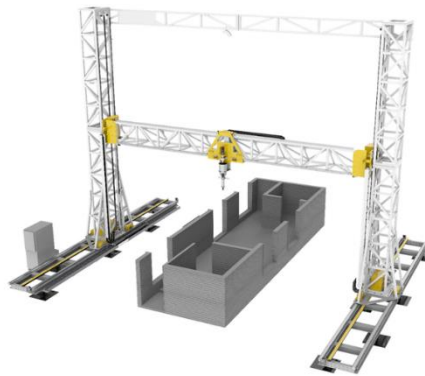


Figura 25: Impresora 3D modelo 2156 de Imprimere. [19]

Es evidente que las diferencias en prestaciones y calidad entre estos extremos pueden ser significativas, pero ambos tipos de impresoras se basan en los mismos principios fundamentales y comparten componentes similares. Dichos componentes pueden dividirse en los siguientes grupos:

- **Estructura**

La base física de una impresora 3D está compuesta por su estructura, que resguarda el resto de los elementos y proporciona soporte y estabilidad a todo el sistema. Para su construcción se emplean diversos tipos de materiales, pero destaca notablemente el aluminio puesto que aporta un peso bastante reducido al equipo, al mismo tiempo que proporciona una excelente estabilidad.

- **Extrusor o cabezal de impresión**

El corazón de la impresora 3D es el extrusor, también conocido como cabezal de impresión. Este componente es responsable de fundir el material de impresión y depositarlo en capas sucesivas sobre la plataforma. El material fundido fluye a través de una boquilla que se desplaza en los ejes X, Y y Z según las instrucciones del software.

- **Materiales de impresión**

La elección del material de impresión es fundamental. Los filamentos, que pueden ser de plástico, metal, cerámica o incluso alimentos, son alimentados al extrusor. Estos se derriten y solidifican capa por capa para formar la pieza final. La calidad y propiedades del material influyen en la resistencia, la textura y la durabilidad del objeto impreso.

- **Plataforma de impresión y superficie de adhesión**

La plataforma de impresión, o cama, es la superficie donde se crean las capas y se construye el objeto. El nivelado preciso de esta plataforma es crucial para garantizar una adhesión adecuada y una impresión uniforme. Algunas impresoras utilizan camas calentadas para prevenir la deformación del material durante el proceso de impresión. Superficies especiales, como cintas adhesivas o láminas de construcción, pueden aplicarse para facilitar la adherencia y el desprendimiento de la pieza.

- **Sistema de movimiento y ejes**

Los movimientos precisos en los ejes X, Y y Z son controlados por motores y rieles de movimiento. Estos componentes garantizan que el cabezal de impresión se desplace con precisión milimétrica para crear cada capa de la pieza. Los sistemas de movimiento son esenciales para lograr una impresión detallada y exacta.

- **Electrónica y controladores**

La impresora 3D está equipada con componentes electrónicos y controladores que interpretan el código G generado por el software de laminado. A destacar por su relevancia la fuente de alimentación, la placa base y el panel de control. Estos componentes controlan la temperatura, los movimientos y cualquier otro aspecto del proceso de impresión para garantizar una operación fluida y precisa.

- **Sensores**

Para mejorar la experiencia de impresión, algunas impresoras 3D están equipadas con sensores que monitorean la temperatura, el nivel de material y otros parámetros clave como la calibración de la cama caliente. Estos sensores pueden ajustar automáticamente la configuración para evitar problemas y garantizar una impresión sin complicaciones.

Todas estas partes y componentes de la impresora 3D se encuentran esquematizados en la Figura 26 para facilitar su comprensión y ubicación dentro del sistema.

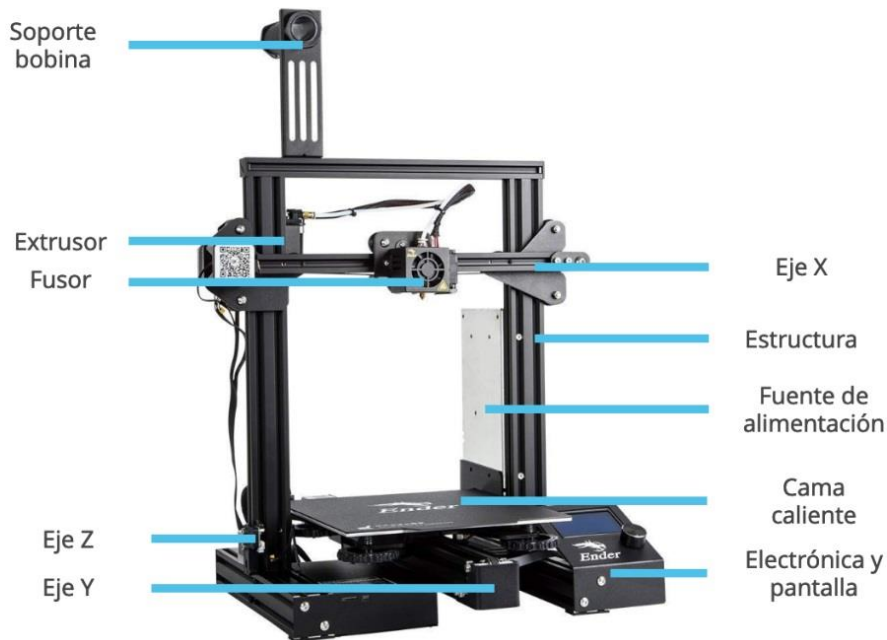


Figura 26: Partes de una impresora 3D. [20]

3.3.3. Materiales

En la actualidad, disponemos de una amplia variedad de materiales que son utilizados en la implementación de la tecnología FDM. Cada uno de estos materiales presenta características específicas que los hacen más o menos adecuados para ciertas aplicaciones. En la siguiente tabla, se muestra un resumen de los materiales más comúnmente utilizados en la industria actual.

Tabla 1: Resumen de los materiales de impresión 3D más utilizados. [21]

| MATERIAL | CARACTERÍSTICAS | APLICACIONES |
|--|--|--|
| ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) | Tenaz y duradero. Resistente a impactos y al calor. Necesita una plataforma caliente para imprimirse. Necesita ventilación. | Prototipos funcionales |
| PLA (ácido poliláctico) | Material de FDM más fácil de imprimir. Rígido, fuerte pero frágil. Menos resistente al calor y a los productos químicos. Biodegradable. Inodoro. | Modelos conceptuales Prototipos estéticos |
| PETG (tereftalato de polietileno glicolizado) | Compatible con temperaturas de impresión | Aplicaciones impermeables |

| | | |
|---|---|--|
| | más bajas para una producción más rápida. Resistente a la humedad y a los productos químicos. Alta transparencia. Puede ser apto para la alimentación. | Componentes de fijación mediante presilla |
| Nylon | Resistente, duradero y ligero. Duro y parcialmente flexible. Resistente al calor y a los impactos. Muy difícil de imprimir con FDM. | Prototipos funcionales Piezas resistentes al desgaste |
| TPU (poliuretano termoplástico) | Flexible y estirable. Resistente a impactos. Excelente amortiguación de vibraciones. | Prototipos flexibles |
| PVA (alcohol polivinílico) | Material de soporte soluble. Se disuelve en el agua. | Material para soportes |
| HIPS (poliestireno de alto impacto) | Material de soporte soluble que se usa a menudo con ABS. Se disuelve en limoneno químico. | Material para soportes |
| Compuestos (fibra de carbono, kevlar, fibra de vidrio) | Rígidos, fuertes o extremadamente resistentes. Compatibilidad limitada a algunas impresoras 3D FDM industriales caras. | Prototipos funcionales Guías, fijaciones y herramientas |

3.3.4. Parámetros de impresión

Los parámetros de impresión desempeñan un papel fundamental en el proceso de fabricación y en la calidad del resultado final. Cada uno de estos parámetros debe ser ajustado cuidadosamente para optimizar la impresión y asegurar que el objeto final cumpla con las expectativas deseadas. A continuación, se explorarán los parámetros más relevantes y su influencia en el resultado final.

- **Velocidad de impresión**

La velocidad de impresión hace referencia a la rapidez con la que el cabezal de la impresora se mueve durante el proceso de impresión. Este parámetro se ve estrictamente limitado por la capacidad de los motores y, a su vez, por la capacidad del extrusor para mover el material mientras que avanza el cabezal. Aumentar la velocidad puede acelerar la producción, pero también puede afectar a la precisión y la calidad de los detalles finos.

- **Diámetro de la boquilla**

El diámetro de la boquilla determina el grosor de las líneas de material depositadas en cada capa. Una boquilla más pequeña permite detalles más finos, pero también puede aumentar el tiempo de impresión.



Figura 27: Boquilla de diámetro 0.4 mm. [22]

- **Altura de capa**

La altura de capa hace referencia al grosor de cada capa impresa y se ve limitada por el diámetro de la boquilla. Una capa más delgada resulta en una superficie más suave y detallada, mientras que capas más gruesas pueden acelerar la impresión, pero reduciendo la calidad.

- **Temperatura de extrusión**

La temperatura de extrusión controla la viscosidad y fluidez del material fundido. A la hora de imprimir, es importante conocer la temperatura de fusión del material que se está usando, y las temperaturas de impresión entre las que usualmente se trabaja. Una mayor temperatura de impresión permite al material encontrarse en un estado más fluido, pero, a su vez, demasiada fluidez puede dar lugar a deslizamientos entre capas. Una temperatura incorrecta puede llevar a problemas como atascos o mala adhesión entre capas.

- **Temperatura de la cama**

La temperatura de la cama de impresión afecta a la adherencia del material a la superficie de impresión. Una temperatura adecuada previene el desprendimiento de la pieza durante la impresión.

- **Densidad de relleno**

La densidad de relleno determina cuánto espacio en el interior de la pieza estará lleno de material. Se cuantifica en tanto por ciento, siendo el 0% una pieza hueca y el 100% una pieza maciza (Figura 28). Mayor densidad brinda mayor resistencia, pero también puede aumentar el consumo de material y el tiempo de impresión.

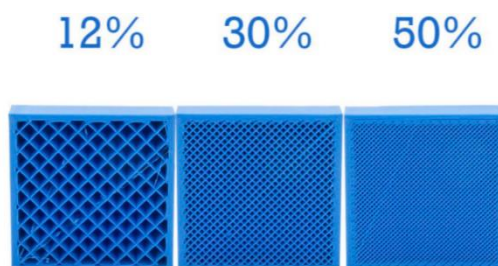


Figura 28: Densidad de relleno del 12%, 30% y 50%. [23]

- **Patrón de relleno**

El patrón de relleno define cómo se deposita el material en el interior de la pieza. Los patrones más comunes son rectilíneos o hexagonales. Puede influir en la resistencia y la eficiencia del material utilizado.

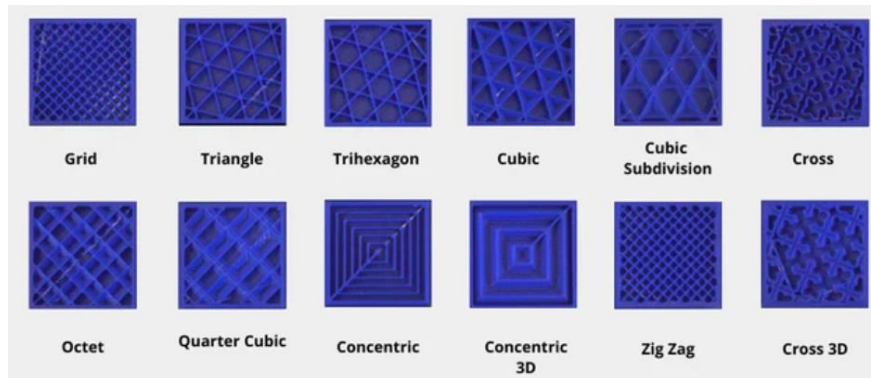


Figura 29: Patrones de relleno. [24]

3.4. Metrología dimensional

La metrología dimensional es una disciplina esencial en la ciencia de la medición que se enfoca en la cuantificación y análisis de las dimensiones físicas de objetos y componentes. Su objetivo primordial es asegurar la precisión y la exactitud en las medidas de longitudes, formas, tamaños y otros atributos geométricos. Mediante el uso de instrumentos de medición de alta precisión, como calibradores, micrómetros y máquinas de medición por coordenadas, la metrología dimensional busca establecer estándares y tolerancias para garantizar la calidad y la interoperabilidad de productos en diversas industrias, como la manufactura, la automotriz y la aeroespacial. La metrología dimensional desempeña un papel fundamental en el control de calidad, la investigación y el desarrollo, asegurando que los productos cumplan con especificaciones precisas y se ajusten a las necesidades del mercado y los estándares internacionales.

Así, el estudio de la geometría de una pieza puede dividirse en los siguientes grupos:

Tabla 2: Clasificación de la metrología dimensional.

| | | |
|----------------|---------------------|-------------------|
| Macrogeometría | Dimensiones | Longitudes |
| | | Ángulos |
| | Formas | Rectitud |
| | | Paralelismo |
| | | Perpendicularidad |
| | | Angularidad |
| | | Simetría |
| | | Planitud |
| | | Redondez |
| | | Cilindricidad |
| Concentricidad | | |
| Microgeometría | Acabado superficial | |

3.4.1. Macrogeometría

Dentro del ámbito de la macrogeometría, como se ha mencionado previamente, es posible identificar las desviaciones dimensionales y geométricas de una pieza, así como aquellas relacionadas con su forma y posición. A continuación, se presenta una breve descripción de las desviaciones dimensionales que han sido abordadas en este estudio.

- **Desviaciones dimensionales**

Las desviaciones dimensionales hacen referencia a las diferencias que pueden existir entre las medidas tomadas y los valores teóricos o nominales de longitudes y ángulos de una pieza. Identificar y comprender estas desviaciones es esencial para asegurar la calidad y la precisión en la fabricación y diseño de productos. Dos de los instrumentos de medida más comúnmente utilizados para evaluar desviaciones dimensionales son el pie de rey y el micrómetro.

El **pie de rey**, también conocido como calibrador Vernier, permite medir con alta precisión longitudes internas y externas, profundidades y diámetros (Figura 31). Su diseño incluye una regla principal y una escala vernier o nonio, usualmente marcados en milímetros y centímetros, lo que permite realizar mediciones con gran exactitud.

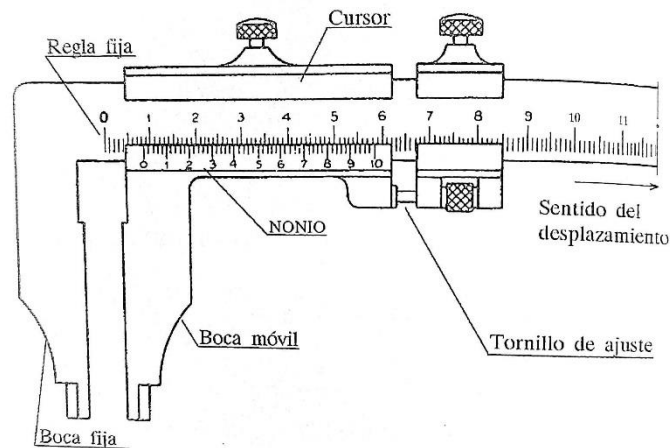


Figura 30: Partes de un pie de rey. [25]

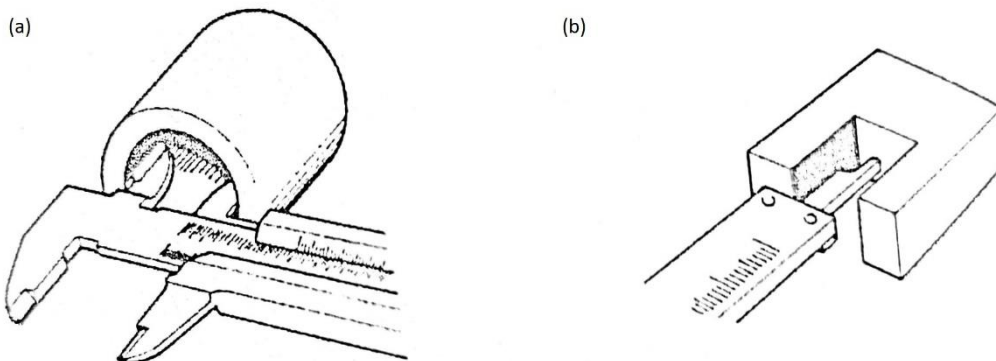


Figura 31: Medida con un pie de rey: de interiores (a) y de profundidad (b). [25]

Por otro lado, el **micrómetro** es un instrumento de medición más especializado y extremadamente preciso. Su funcionamiento se basa en el desplazamiento de un husillo que se traduce en una rotación de un tambor con una escala graduada. Esto permite medir dimensiones con una precisión micrométrica, siendo ideal para objetos pequeños y precisos, como piezas mecánicas y componentes de alta precisión. Existen diferentes tipos de micrómetros: de dos contactos para medidas de interiores, de dos contactos para medidas de exteriores (Figura 32), y de tres contactos.

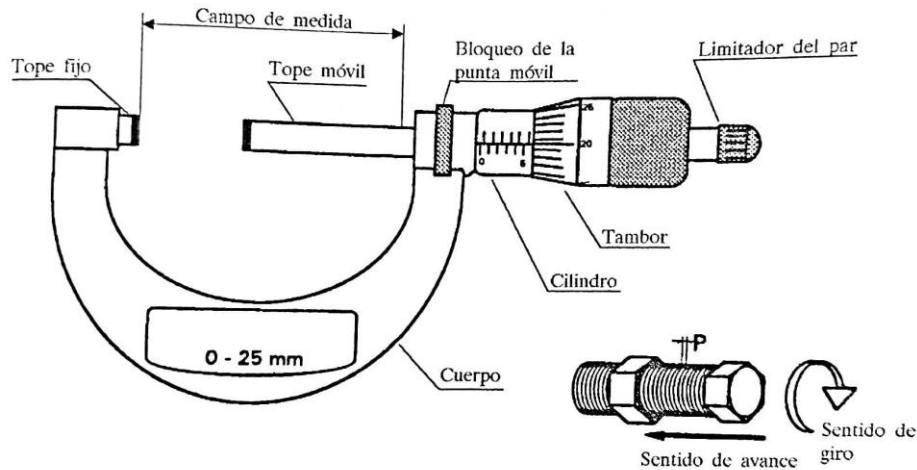


Figura 32: Partes de un micrómetro de dos contactos. [25]

- **Desviaciones geométricas**

Las desviaciones geométricas se encargan de evaluar y cuantificar las discrepancias en la forma y posición de objetos y componentes, miden la diferencia entre la forma o posición real y la ideal. Estas desviaciones juegan un papel fundamental en la determinación de la calidad y la precisión de las piezas manufacturadas, garantizando que cumplan con las especificaciones requeridas.

Dentro de las desviaciones geométricas, varios tipos merecen especial atención, aunque ninguno va a ser medido en este proyecto:

- **Rectitud:** evalúa la desalineación de una línea o superficie con respecto a una referencia deseada. Se mide en términos de distancia entre los puntos extremos y la línea ideal.

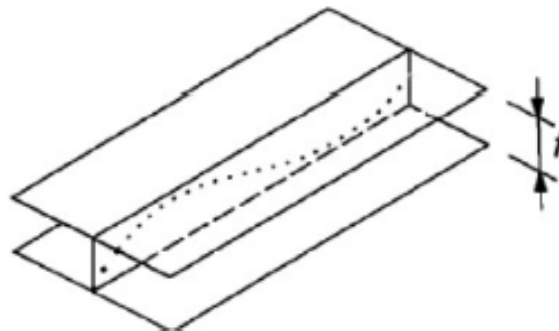


Figura 33: Medida de rectitud. [25]

- **Redondez:** examina la variación de la forma de una superficie en relación con un círculo ideal. Se determina por la diferencia entre los radios reales e ideales en varios puntos.

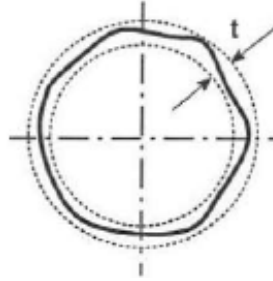


Figura 34: Medida de redondez. [25]

- **Cilindricidad:** mide cuán uniformemente se distribuyen los puntos de una superficie cilíndrica en relación con el eje central del cilindro.

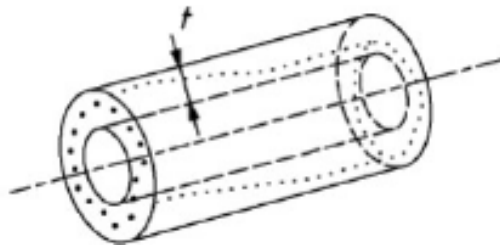


Figura 35: Medida de cilindridad. [25]

- **Concentricidad:** evalúa la coincidencia del eje central de un elemento con el eje central de otro. Indica cuán bien están alineados dos objetos con un mismo centro.

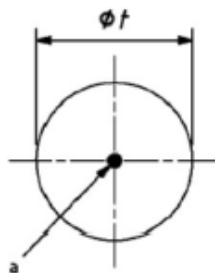


Figura 36: Medida de concentricidad. [25]

- **Coaxialidad:** similar a la concentricidad, esta desviación analiza la coincidencia de los ejes de dos elementos, asegurando que sus centros estén en el mismo eje.



Figura 37: Medida de coaxialidad. [25]

Para medir y cuantificar estas desviaciones geométricas, se utilizan herramientas como las medidoras de forma (Figura 38). Estos dispositivos, como la Máquina de Medición de Coordenadas (CMM), capturan la geometría tridimensional de una pieza mediante el uso de sensores y láseres. La pieza se coloca en la CMM, que registra y analiza su forma y posición en relación con las tolerancias especificadas. Este proceso proporciona información detallada sobre las desviaciones geométricas y permite tomar decisiones informadas sobre ajustes y correcciones.



Figura 38: Máquina medidora de forma. [26]

3.4.2. Microgeometría

Las desviaciones microgeométricas hacen referencia a las pequeñas discrepancias o irregularidades que se presentan en la superficie de un objeto a escala microscópica. Estas desviaciones se relacionan con características finas y detalladas de la superficie, como rugosidades, ondulaciones, irregularidades y texturas. A diferencia de las desviaciones macrogeométricas, que se enfocan en las dimensiones y formas más grandes, las desviaciones microgeométricas se centran en aspectos a nivel micro, que pueden influir en propiedades como la fricción, la adhesión, la lubricación y la apariencia visual de una superficie.

La textura superficial de una pieza está formada principalmente por los perfiles de forma, ondulación y rugosidad, formando así el perfil efectivo (Figura 39).



Figura 39: Perfil efectivo de una pieza. [25]

Dos valores característicos ampliamente utilizados para cuantificar la **rugosidad** son la rugosidad media aritmética (R_a) y la altura media de rugosidad (R_z).

- **Rugosidad media aritmética (R_a):** representa la media aritmética de las desviaciones positivas y negativas de la línea central dentro de un área específica. Es un indicador de la textura superficial promedio y se expresa en unidades de longitud (micrómetros o pulgadas). Cuanto menor sea el valor R_a , más suave será la superficie.

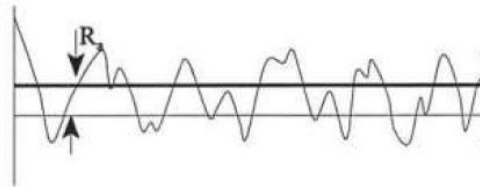


Figura 40: Representación del parámetro R_a . [25]

- **Altura media de la rugosidad (R_z):** mide la distancia promedio entre los puntos más altos y más bajos en varias secciones de la superficie. Proporciona una visión más completa de la rugosidad en comparación con R_a y es útil para evaluar irregularidades más pronunciadas.

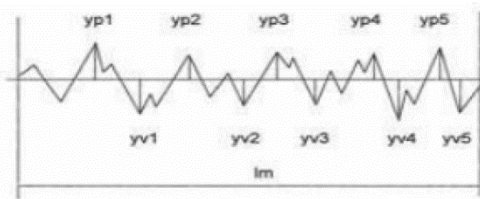


Figura 41: Representación del parámetro R_z . [25]

El rugosímetro es un instrumento esencial para medir la rugosidad. Funciona midiendo las pequeñas variaciones verticales en la superficie de un objeto a través de un palpador o una sonda. El rugosímetro desplaza la sonda sobre la superficie y registra las fluctuaciones en altura, generando un perfil de rugosidad. Este perfil se utiliza para calcular los valores de rugosidad, como R_a y R_z . Los más modernos pueden ser portátiles o de banco, utilizan tecnología táctil o no táctil (óptica o láser) y proporcionan mediciones precisas y confiables de la rugosidad en una amplia gama de materiales y aplicaciones.



Figura 42: Rugosímetro de la marca Mitutoyo. [27]

Desafortunadamente, la rugosidad es un valor que no ha podido ser medido en este proyecto por falta de un equipo de medición capaz de medir en la dirección deseada de la pieza.

3.5. Ensayo de fatiga

La **vida a fatiga** se puede definir como el “fallo debido a cargas repetitivas... que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura” (Fuchs, 1980). El análisis de fatiga estructural es una herramienta para evaluar la validez de un diseño, o su durabilidad, bajo condiciones de carga simples o complejas conocidas como cargas de servicio [28].

En numerosas ocasiones es posible observar cómo un componente industrial se somete a la acción de un esfuerzo cíclico o repetitivo que es inferior al punto de rotura del material. Una amplia variedad de componentes se ve afectada por este tipo de carga, por ejemplo: herramientas, resortes, engranajes, elementos de motores y componentes de las turbinas de aviones, entre otros.

Este esfuerzo cíclico puede originarse por rotación, flexión o tensión. Es importante señalar que incluso cuando el esfuerzo se encuentra por debajo del límite elástico del material, este puede llegar a fallar después de un gran número de aplicaciones de dicho esfuerzo.

El **proceso de fractura** del material por fatiga se divide en tres partes o etapas (Figura x):

- **Fase 1:** se inicia una o más grietas en la superficie del material. Estas pueden aparecer en cualquier punto, pero generalmente ocurren alrededor de alguna fuente de concentración de tensiones y en la superficie exterior donde las fluctuaciones de tensión son más elevadas. Las grietas pueden aparecer por diversas razones como imperfecciones en la estructura microscópica del material, muescas y entallas causadas por las herramientas de fabricación, discontinuidades geométricas, etc.
- **Fase 2:** la fisura se propaga por el efecto de las cargas.
- **Fase 3:** cuando la sección transversal resultante del material resulta demasiado pequeña, es decir, cuando se produce el estrechamiento de la sección debido a la propagación de la grieta, la sección neta es incapaz de continuar resistiendo la carga desde un punto de vista estático y se produce una rotura frágil del material, ocurriendo así la rotura por fatiga.

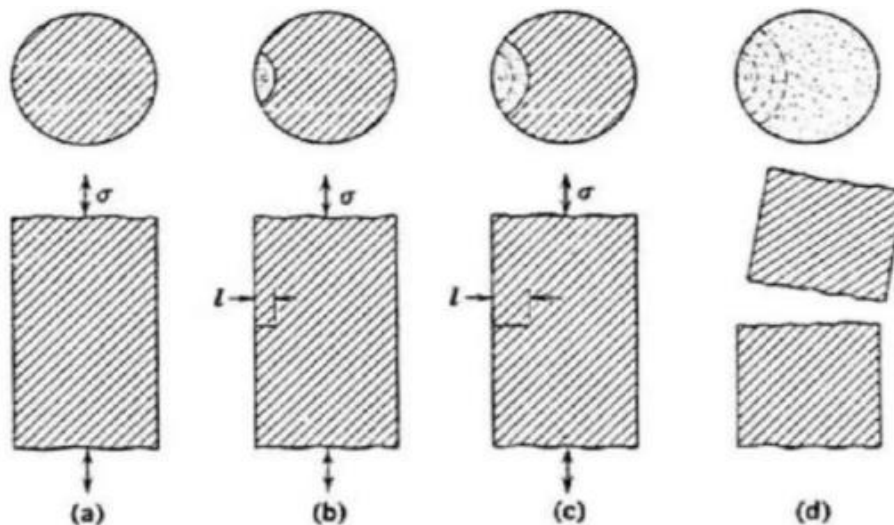


Figura 43: Fases de la rotura por fatiga: estado inicial (a), creación de la grieta (b), propagación de la grieta (c), rotura (d). [29]

3.5.1. Geometría para un ensayo a fatiga rotativa

La norma ISO 1143:2021 [30] establece los parámetros geométricos empleados en los ensayos de fatiga. Aunque esta norma se basa en materiales metálicos, se utiliza en ausencia de directrices específicas para materiales impresos o manufacturados mediante fabricación aditiva. Para el presente estudio, en el que se realiza un ensayo de fatiga mediante flexión rotativa, se sigue la recomendación de la norma para emplear la geometría denominada “*Cylindrical smooth specimen*”. Esta geometría ha demostrado ser la más resistente en la sección donde se espera que ocurra la fractura. Las dimensiones específicas se encuentran ilustradas en la Figura 44.

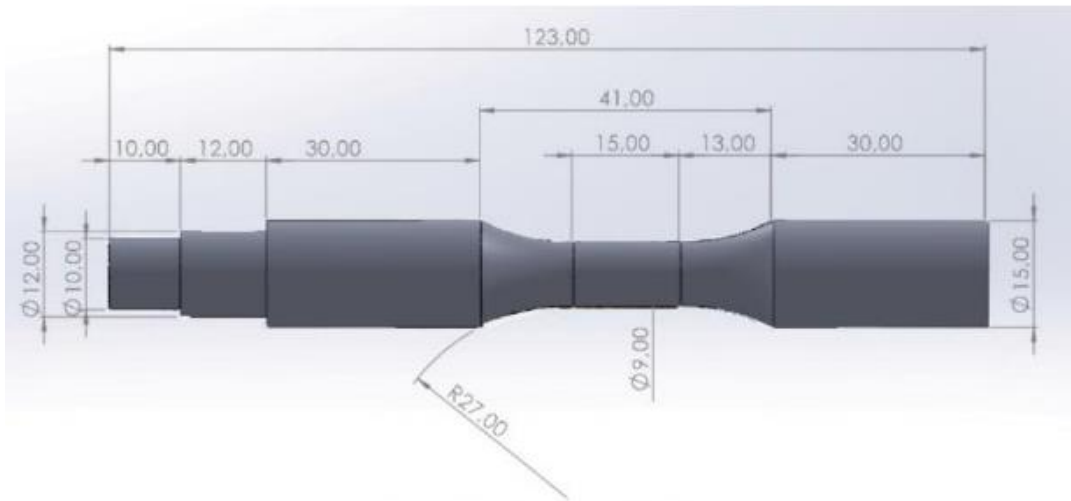


Figura 44: Geometría tipo.

Esta geometría presenta tres zonas claramente distintas (de derecha a izquierda):

- **Zona empotrada:** corresponde al área donde se fija la boca del torno durante la realización del ensayo de fatiga.
- **Zona calibrada:** es la región donde se espera que se produzca la rotura.
- **Zona en voladizo:** corresponde al extremo roscado de la probeta donde se sujetará el vástago cargado.

3.5.2. Análisis de resultados para un ensayo a fatiga rotativa

De manera similar al apartado anterior, la normativa utilizada para el análisis de los resultados de los ensayos de fatiga se basa en materiales metálicos, y se adopta esta debido a la falta de normativa específica.

La norma que guía la obtención de resultados es la ISO 12107:2012 [31]. Esta norma establece que, para estudiar el comportamiento a fatiga de los materiales, comúnmente representado mediante curvas S-N (curvas de Whöler), se requieren al menos 4 ensayos por cada condición para asegurar que los resultados alcancen un nivel de confianza del 95%.

4. Estado del arte

En el mundo de la fabricación aditiva, se han realizado numerosas investigaciones a lo largo de los años con el propósito de comprender mejor estos procesos. No obstante, debido a que se trata de un método de fabricación relativamente novedoso, aún queda una considerable cantidad de trabajo por realizar.

Existe una amplia gama de parámetros que influyen en los procesos de fabricación aditiva, junto con una diversidad significativa de materiales que pueden ser empleados, así como una variedad de aplicaciones a las que los productos resultantes pueden estar destinados. Por tanto, la caracterización de estos procesos está en constante evolución.

Dentro de la bibliografía disponible, se encuentran varios artículos que tratan sobre este tema en particular, lo que permite recopilar cierta información bastante útil para llevar a cabo esta investigación.

En el artículo titulado *“Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection”* [32], se estudia el efecto de la orientación de la construcción, el grosor de la capa y la velocidad de alimentación en el rendimiento mecánico de muestras fabricadas con PLA utilizando una impresora 3D de bajo costo.

Mediante la realización de ensayos de tracción y flexión en tres puntos, con el propósito de evaluar la respuesta mecánica de las muestras impresas, se llega a la conclusión de que la variación del espesor de capa es un parámetro controvertido en especímenes fabricados con PLA sin reforzar. A lo largo del ensayo, se observa que el PLA muestra una gran variabilidad entre resultados. En algunos casos, la resistencia a tracción primero disminuye y luego aumenta a medida que aumenta el espesor de la capa; en otros, el espesor más bajo tiene la mayor resistencia.

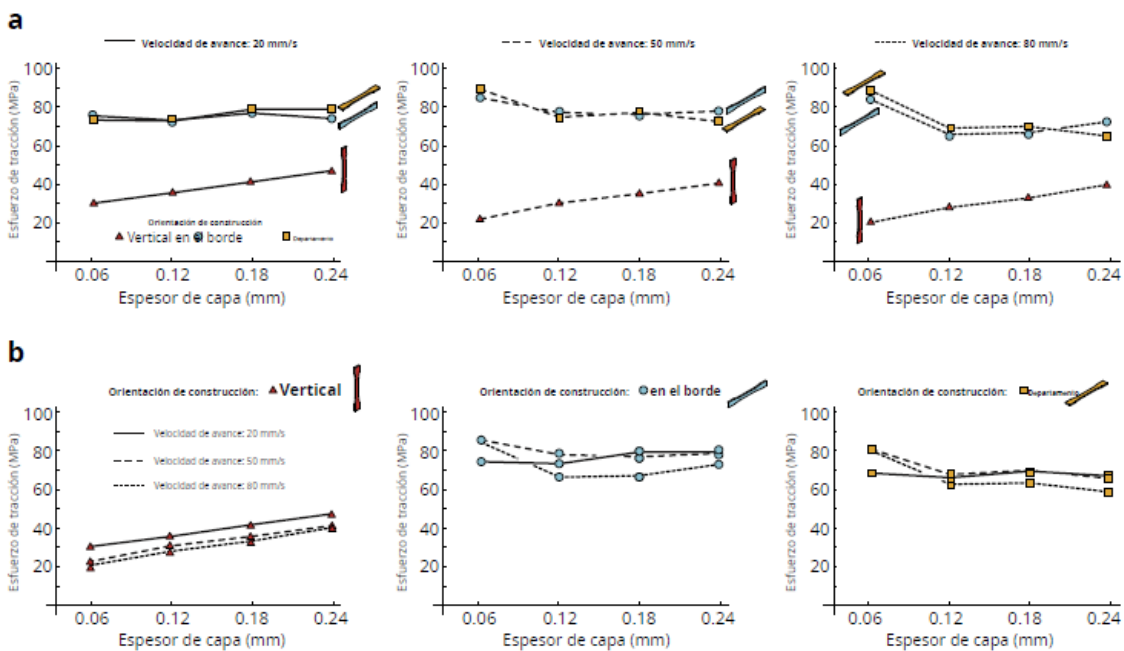


Figura 45: Comparación gráfica de la resistencia a tracción máxima promedio en función del espesor de la capa para una tasa de alimentación fija (a) y para una orientación de construcción dada (b). [32]

En lo que respecta al número de carcassas, se determina que, tanto en especímenes fabricados con PLA como con ABS, este parámetro presenta un bajo nivel de significación sobre el resultado final del ensayo.

Analizando ahora el artículo de Giovanni Gómez-Gras, et al. [33], que estudia la influencia de cuatro factores (altura de capa, densidad de relleno, diámetro de boquilla y velocidad) en el comportamiento a fatiga de probetas cilíndricas a través de un diseño experimental L27 Taguchi, se llega a la conclusión de que la densidad de relleno es el factor de mayor influencia en el rendimiento de fatiga, seguido por el diámetro de la boquilla y la altura de la capa.

En la Figura 46, se puede apreciar como la combinación de una densidad de relleno del 75%, un diámetro de boquilla de 0.5 mm y una altura de capa de 0.3 mm da como resultado la vida útil a fatiga más alta. Además, se establece que la interacción entre el diámetro de la boquilla y la altura de capa indica que el uso de valores similares para ambos da como resultado un rendimiento a fatiga deficiente debido a la deposición inadecuada de material. Es recomendable que el diámetro de la boquilla sea, al menos, 1,5 veces el valor de la altura de capa para garantizar una adecuada cohesión entre los filamentos y, por ende, mejorar la integridad de la pieza.

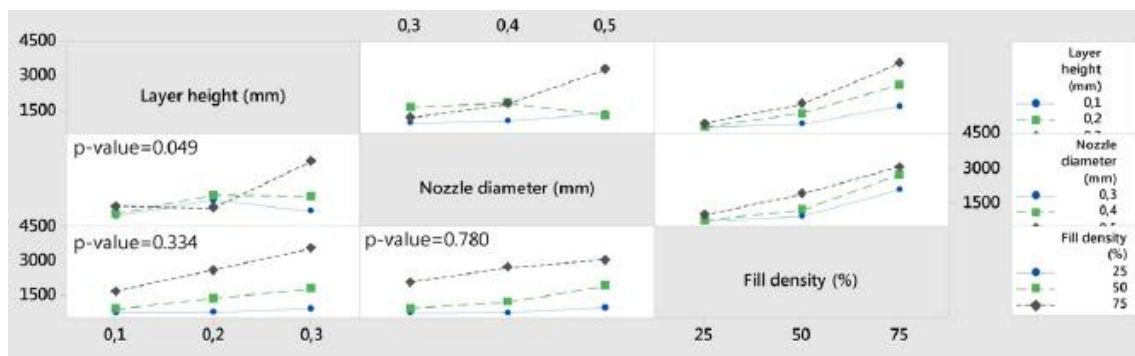


Figura 46: Efectos principales en el número de ciclos hasta el fallo para la variable de respuesta. [33]

Es relevante destacar que es complicado encontrar información sobre la resistencia a fatiga utilizando PLA como material, dado que este ensayo posee bastante variabilidad y no ha sido explorado en profundidad. Mucho menos se encuentran artículos que analicen la influencia del número de carcassas. Es por ello que esta investigación busca sacar algunas conclusiones sobre el comportamiento a fatiga de piezas impresas con PLA y la influencia del número de carcassas, con el fin de optimizar el proceso de impresión.

5. Metodología de trabajo

Antes de iniciar el actual proyecto, se elaboró el plan de trabajo, el cual resulta fundamental para su ejecución. Los objetivos principales y secundarios desempeñaron un papel esencial en la organización de las actividades a realizar, quedando plasmados de la siguiente manera:

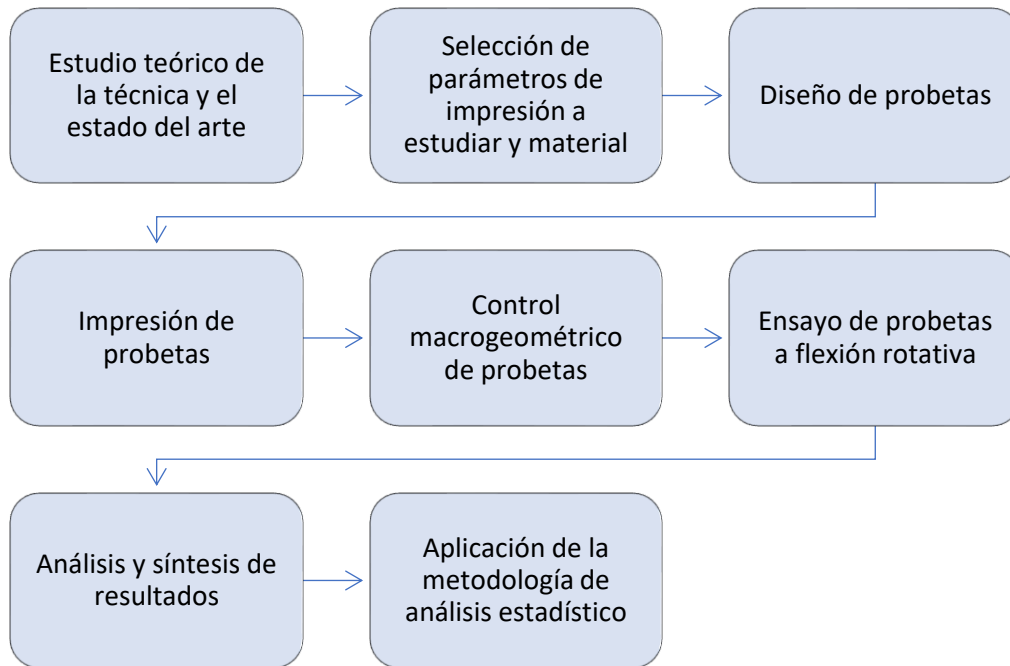


Figura 47: Plan de trabajo.

5.1. Selección de parámetros de impresión y material

5.1.1. Elección de material

En la presente investigación se ha utilizado **ácido poliláctico (PLA)**. Concretamente una bobina de la casa *Fillamentum* de color “Vertigo Jade” (Figura 48). El filamento tiene un diámetro de 1.75 mm y la bobina un peso de 750 gramos.



Figura 48: Bobina de PLA. [34]

Como ya se ha comentado anteriormente, el PLA es uno de los materiales más utilizados en la tecnología FDM. Esto es debido a que su impresión se lleva a cabo fácilmente: requiere de bajas temperaturas, entre 190-210 °C, por lo que no se ve muy afectado por el efecto warping. Además, posee las siguientes propiedades mecánicas destacables:

- Dureza, rigidez y elasticidad.
- Buena resistencia a la torsión.
- Baja resistencia al impacto.

5.1.2. Elección de parámetros de impresión

Al llevar a cabo una investigación sobre FDM, resulta esencial definir los parámetros de impresión que serán objeto de estudio. Con el propósito de analizar el impacto de determinados parámetros en la pieza final, se mantienen constantes los restantes valores, mientras se realizan variaciones en los parámetros específicos en el rango permisible por el material a imprimir y el equipo de impresión.

En esta situación, y en línea con la investigación en manufactura aditiva desarrollada por el grupo de investigación TEP 933 en el área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación, se establecen los siguientes valores como constantes:

- Orientación de la probeta: horizontal.
- Ancho de extrusión: 0.4 mm.
- Temperatura de la cama: 60 °C.
- Temperatura de la impresión: 215 °C.
- Densidad de relleno: 100%.
- Tipo de patrón de relleno: cuadrícula.
- Velocidad de impresión: 40 mm/s.

Por tanto, varían espesor de capa y número de carcasas, tomando los siguientes valores:

- Espesor de capa: 0.2 y 0.3 mm.
- Número de carcasas, 0, 1, 2 y 3.

Se realizan 8 combinaciones diferentes variando estos 2 parámetros, y para cada una de ellas se imprimen 5 probetas, obteniendo así un total de 40 probetas impresas.

5.1.3. Denominación de probetas

Con el fin de evitar confusiones entre las probetas, es crucial establecer una designación uniforme basada en los valores asumidos por los parámetros en cada lote de impresión.

Así, se ha empleado el siguiente código como referencia:

BX_Fatiga_PLA_TXX_RXXX_VXX_TEXXX_EXX_CX

Siendo:

- **BX:** número correspondiente a la bobina usada en la impresión de estas probetas. En esta investigación, se han utilizado dos bobinas dado que la primera se agotó. Por lo tanto, este parámetro adquirirá los valores 1 o 2 dependiendo de si se trató de la primera o la segunda en ser utilizada.
- **Fatiga:** común a todas las probetas, hace referencia al ensayo al que van a someterse las mismas.
- **PLA:** común a todas las probetas, hace referencia al material utilizado.
- **TXX:** común a todas las probetas, hace referencia a la temperatura de la cama, fijada anteriormente en 60 °C.
- **RXXX:** común a todas las probetas, hace referencia a la densidad de relleno, fijada anteriormente en 100 %.
- **VXX:** común a todas las probetas, hace referencia a la velocidad de impresión, fijada anteriormente en 40 mm/s.
- **TEXX:** común a todas las probetas, hace referencia a la temperatura de extrusión, fijada anteriormente en 215 °C.
- **EXX:** espesor de la capa, tomará valores de 0.2 o 0.3 mm.
- **CX:** número de carcassas, tomará valores entre 0 y 3.

Por tanto, y siguiendo el código anteriormente comentado, una probeta impresa con 0.2 mm de espesor y 2 carcassas tendrá la siguiente denominación (Figura 49):

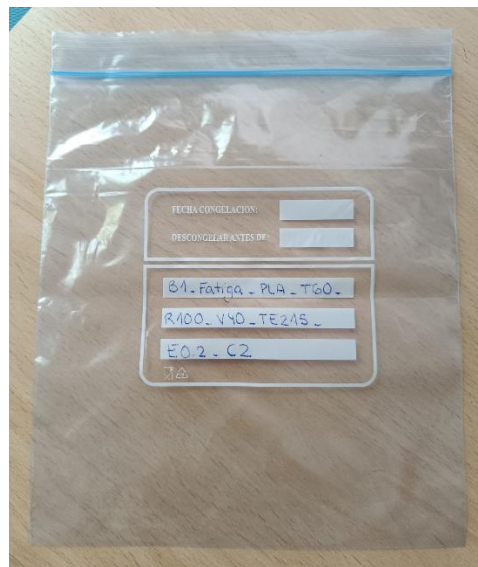


Figura 49: Bolsa hermética con codificación de probetas.

Además, en la Figura 49 se puede observar la bolsa hermética donde se almacena cada lote de probetas para que estas no se vean afectadas por las condiciones climáticas del exterior. A su vez, cada probeta irá numerada del 1 al 5, para poder identificarlas dentro de la tanda (Figura 50).



Figura 50: Probetas de una misma tanda numeradas del 1 al 5.

5.2. Diseño de probetas

Como ya se ha comentado en el apartado 3.3.1., para poder imprimir las probetas con la impresora 3D primero se han de seguir una serie de etapas. A continuación, se explica la metodología seguida en los dos primeros pasos: generación y laminado de un modelo 3D.

5.2.1. Modelado de probetas en SolidWorks

Para la generación del modelo 3D de la probeta se ha utilizado el software de CAD SolidWorks. Primero, se partirá de los siguientes planos en 2D que detallan las dimensiones de la probeta:

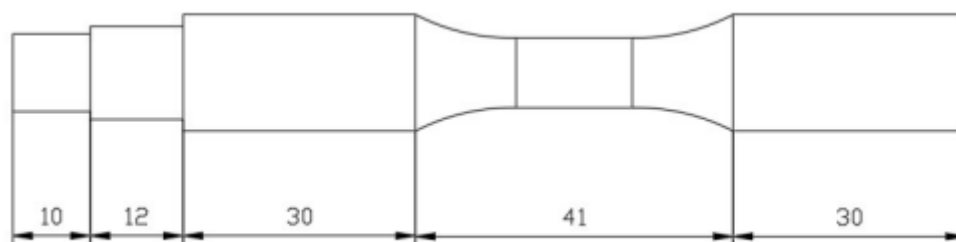


Figura 51: Dimensiones lineales de la probeta en milímetros.

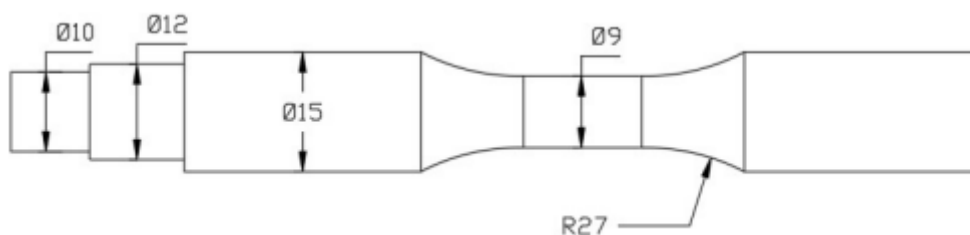


Figura 52: Dimensiones radiales de la probeta en milímetros.

Una vez definida en su totalidad la probeta, se hará uso de la herramienta de modelado **Revolución de saliente/base**. Esta operación permite generar un sólido partiendo de un croquis o de contornos seleccionados y revolucionándolos en torno a un eje.

Por tanto, se dibuja el croquis de la Figura 53, generándose así un contorno cerrado.

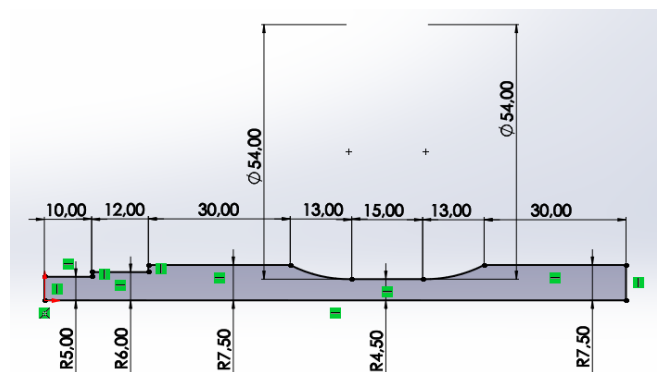


Figura 53: Croquis para la operación de Revolución de saliente/base en SolidWorks.

Seguidamente, seleccionamos la base del croquis como eje y revolucionamos el contorno de la probeta (Figura 54), obteniendo la pieza final (Figura 55).

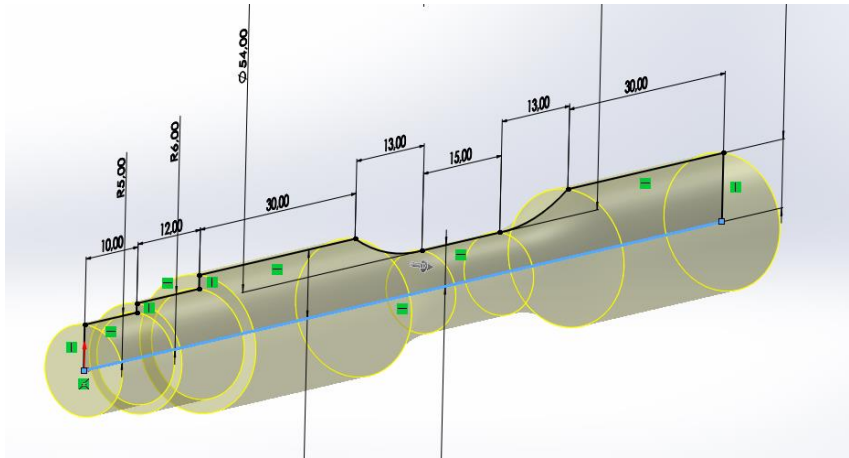


Figura 54: Operación de Revolución de saliente/base en SolidWorks.

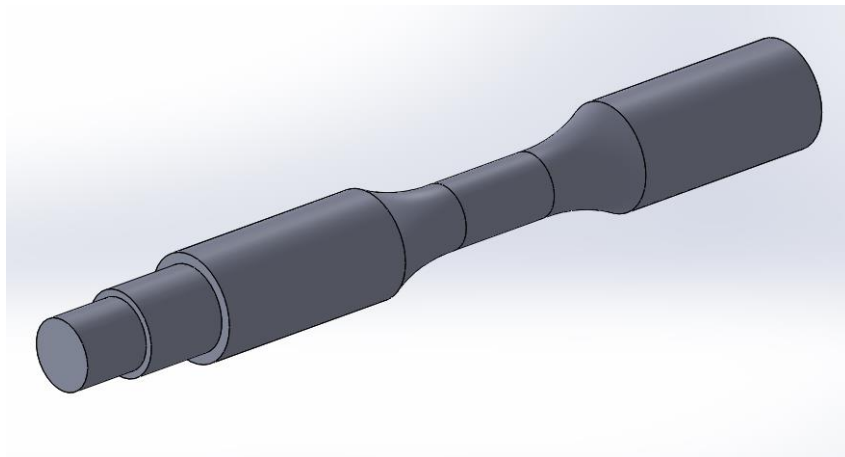


Figura 55: Modelado 3D de la probeta en SolidWorks.

Finalmente, el archivo se guarda en formato STL. Dicho formato aproxima la superficie de un modelo sólido con triángulos, permitiendo así la transmisión de datos de prototipos 3D. Además, es compatible con el software de laminado.

5.2.2. Laminado de probetas en IdeaMaker

Para realizar el laminado del modelo 3D de la probeta se ha utilizado el software IdeaMaker. Este software ha sido diseñado por Raise3D, al igual que la impresora utilizada, lo que evita futuras incompatibilidades entre archivo y lectores de archivo.

Lo primero que debemos hacer es cargar el archivo STL procedente de SolidWorks a IdeaMaker. Dado que se imprimirán 5 probetas con la misma configuración, se procede a mejorar la eficiencia del proceso al cargar simultáneamente las 5 probetas en el laminador. Para ello, se selecciona la probeta ya cargada y se emplea la herramienta duplicar (Figura 56).

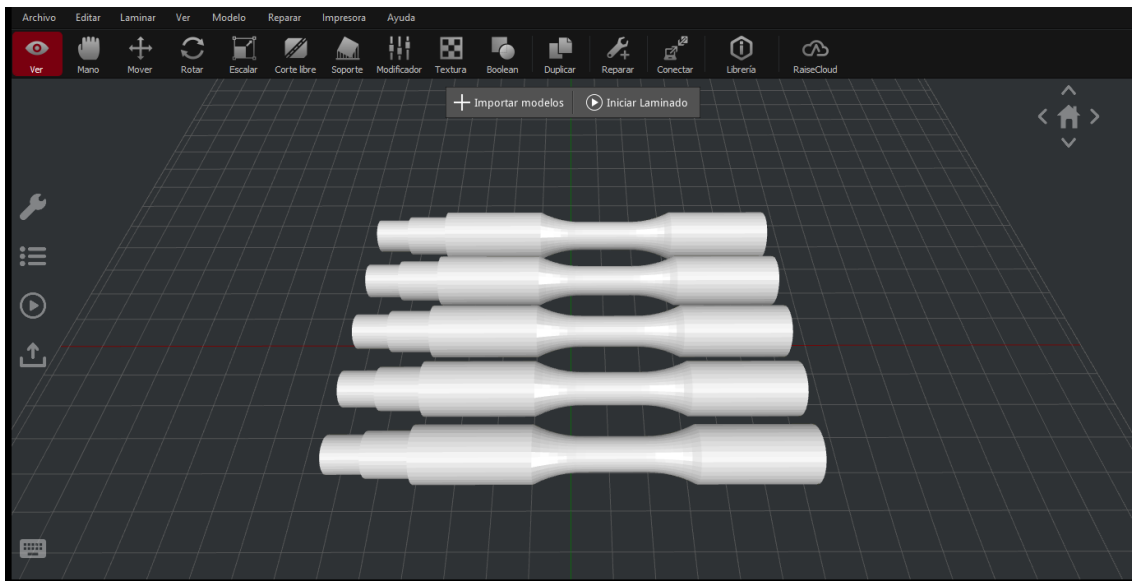


Figura 56: Interfaz de IdeaMaker tras cargar las probetas.

Posteriormente, es necesario generar una plantilla de laminado. En esta se deben ingresar los valores correspondientes a los parámetros necesarios para la impresión. La Figura 57 muestra diversos campos que deben ser llenados para configurar la impresión de las probetas.

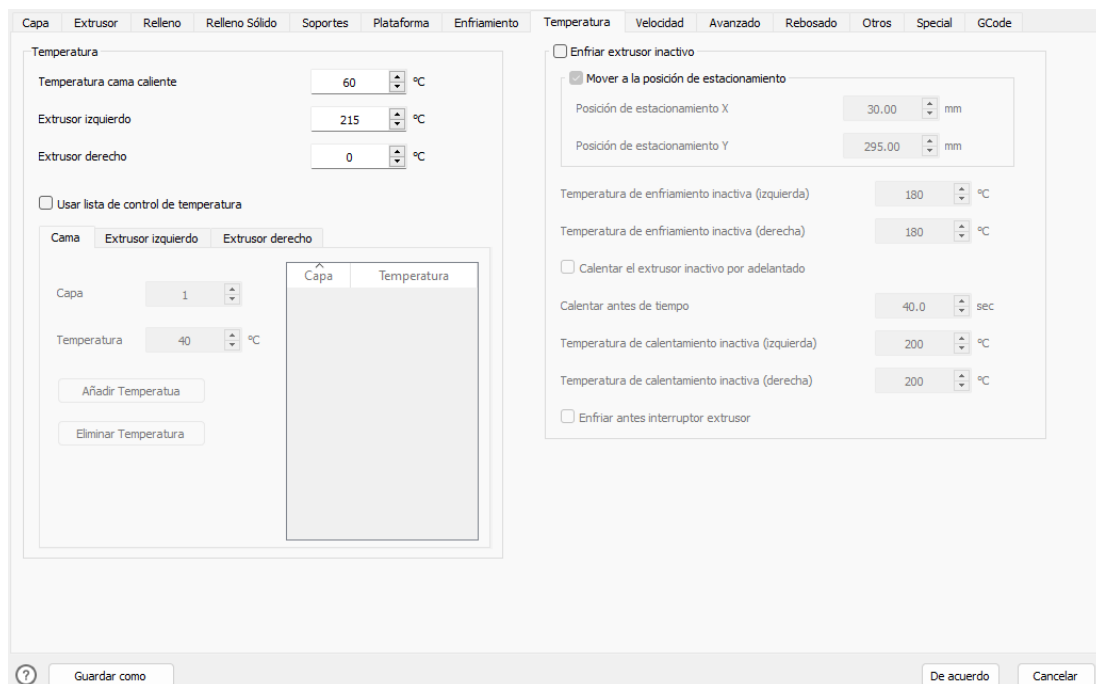


Figura 57: Plantilla de configuración de parámetros de IdeaMaker.

Además, como se puede apreciar en la Figura 57, es posible configurar los parámetros relacionados con el relleno, los soportes, la velocidad y la temperatura, entre otros. Es interesante resaltar la presencia de la pestaña GCode, la cual muestra el código G generado automáticamente por el laminador y que la impresora se encargará de interpretar.

Tras completar la configuración de la impresión, ya se puede iniciar el laminado de la pieza (Figura 58).

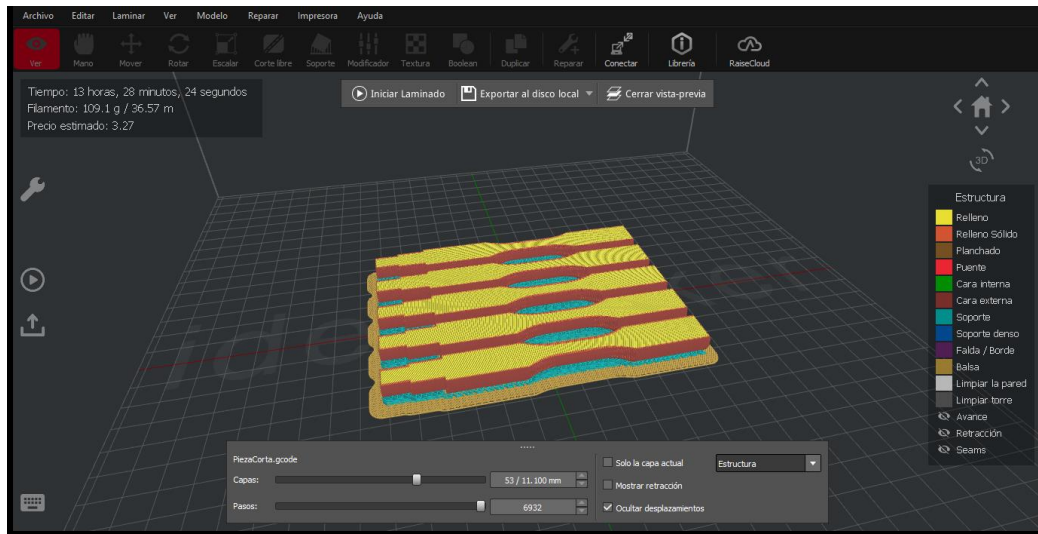


Figura 58: Laminado de probetas en IdeaMaker.

Como se observa en la Figura 58, el software también proporciona información sobre el tiempo aproximado de impresión, la cantidad de filamento necesaria y el precio estimado de fabricación de la pieza.

Por último, se exportan los archivos generados por IdeaMaker a la impresora 3D mediante una unidad USB.

5.3. Impresión de probetas

Siguiendo con la metodología descrita en el apartado 3.3.1., una vez que se han obtenido los archivos del laminador, se procede a transferirlos a la impresora 3D para iniciar la impresión de las probetas. Cuando la impresión ha concluido, se retiran las probetas y se lleva a cabo el postprocesado necesario.

Antes de detallar el proceso de impresión, se brinda una explicación acerca del equipo que será utilizado.

5.3.1. Impresora Raise3D Pro2

El equipo utilizado en este proyecto ha sido la impresora 3D Raise3D Pro2 (Figura 59).

Este equipo dispone de una superficie de impresión de 305 x 305 x 300 mm. Una de sus características principales es su sistema de extrusión dual con cabezales retráctiles, los cuales evitan posibles colisiones entre el extrusor inactivo y la pieza en producción. La máquina permite configurar alturas de capa de hasta 0,01 mm y alcanza temperaturas de extrusión de hasta 300°C.



Figura 59: Impresora Raise3D Pro2. [35]

Además, la impresora está equipada con una pantalla táctil que posibilita el ajuste directo de los parámetros de impresión (Figura 60). Sin embargo, en situaciones en las que se prefiera utilizar un software, como ha sido este caso, cuentan con uno propio, IdeaMaker.

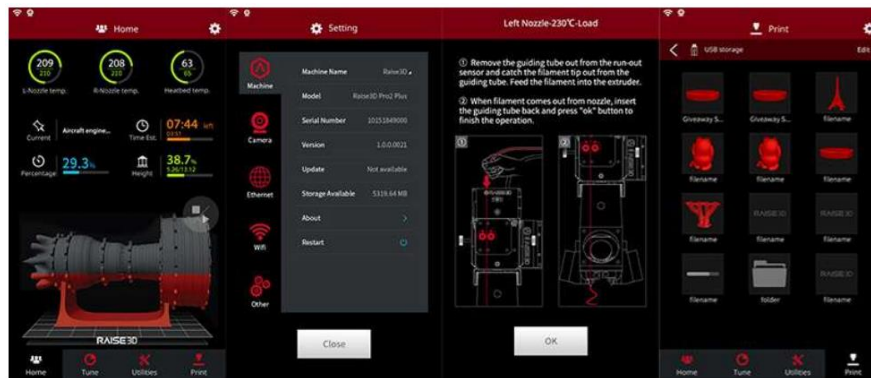


Figura 60: Interfaz de la pantalla táctil de la impresora Raise3d Pro2. [35]

5.3.2. Proceso de impresión de las probetas

Dado que se emplearon dos bobinas de material para la impresión de las probetas, se llevó a cabo un proceso de secado de cada bobina durante un período de 4 horas con el fin de lograr una uniformidad en las propiedades del material (Figura 61).



Figura 61: Secado de bobina de PLA.

Seguidamente, se carga la bobina de material en la impresora 3D y se inicia el proceso de impresión de las probetas.

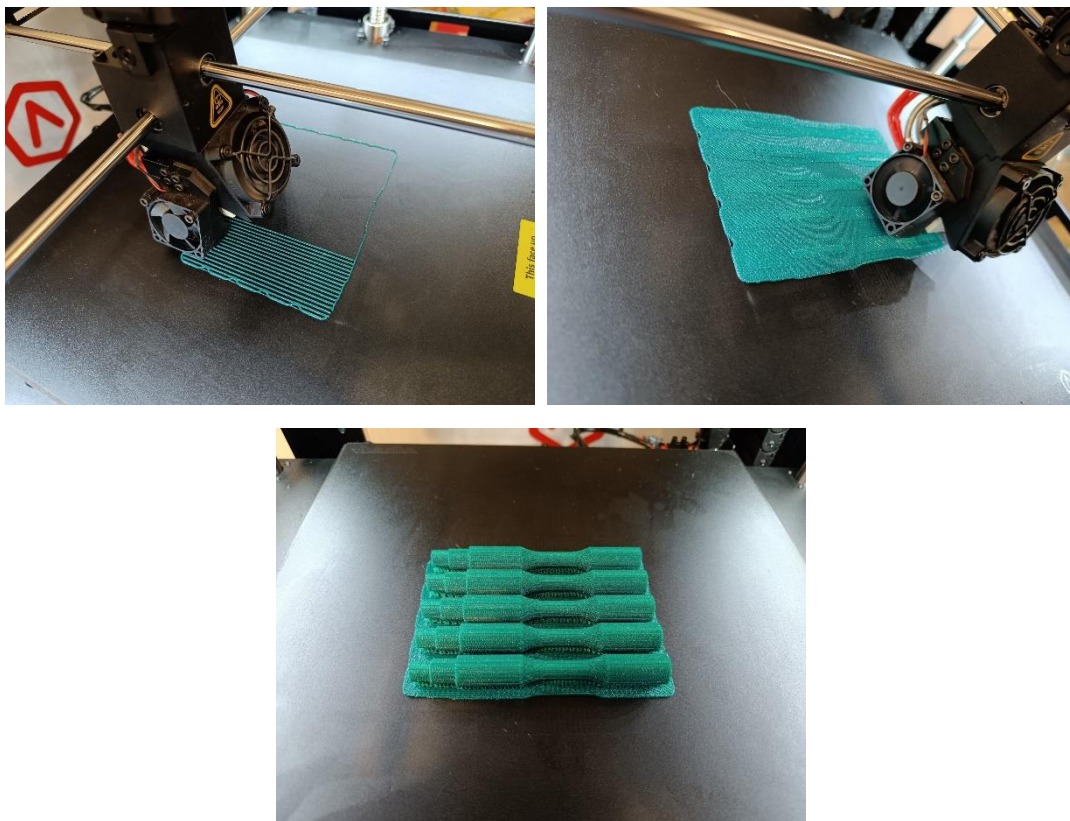


Figura 62: Proceso de impresión de probetas.

Todas las tandas se imprimieron con normalidad, exceptuando las dos últimas: aquellas con un espesor de 0.3 mm y que contaban con 2 y 3 carcasas respectivamente. La impresión presentó dificultades debido a que el extrusor de la impresora se bloqueaba, dejando la impresión a medias (Figura 63).

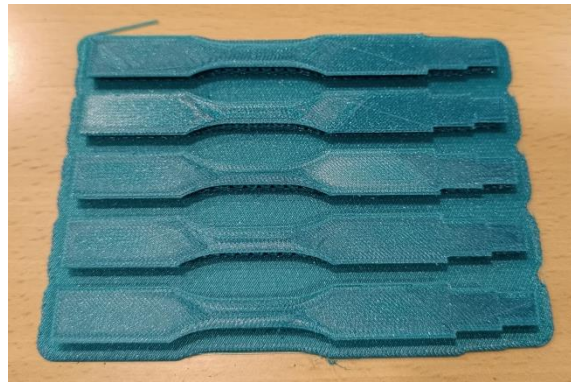


Figura 63: Dificultades para imprimir a 0.3 mm de espesor y 2 y 3 carcasas.

La causa de estos atascos se atribuyó al incremento de la temperatura y la humedad en el laboratorio, ocasionado por la ola de calor sufrida a principios del mes de julio. Como el PLA es especialmente susceptible a la humedad, este se expandía, obstaculizando el flujo correcto de material por el extrusor.

Para resolver esta problemática, se optó por dividir la tanda en dos partes: una con 3 probetas y otra con 2. Además, se planificó la impresión de manera que se evitaran las horas en las cuales el aire acondicionado estuviera apagado.

5.4. Control macrogeométrico

Con el fin de realizar el control dimensional de las probetas impresas, se empleó un micrómetro de exteriores digital de la marca Mitutoyo (Figura 64). Su rango de medición abarca desde 0 hasta 25 mm y tiene una precisión de 0.001 mm, lo que lo convierte en la herramienta ideal para llevar a cabo el control requerido en las probetas.



Figura 64: Micrómetro de exteriores Mitutoyo.

En este caso, como se indica en la Figura 65, se realizaron mediciones de diámetro en 9 puntos diferentes de la probeta. Estas mediciones se llevaron a cabo en cada una de las 40 probetas impresas, realizándose 4 mediciones en cada punto seleccionado. Como se puede observar en la Figura 66, también se utilizó un soporte con el fin de agilizar y facilitar el proceso de medición.

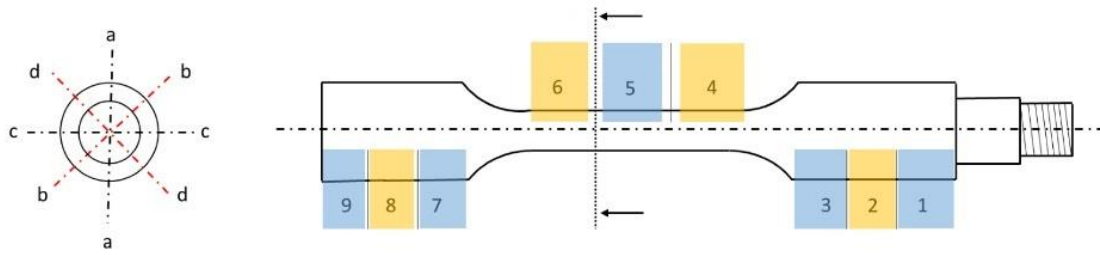


Figura 65: Puntos de medición de las probetas con micrómetro.



Figura 66: Soporte de probetas para la medición.

Es importante destacar que estas mediciones se realizaron en puntos de las probetas alejadas de la zona de la cama, con el propósito de evitar posibles discontinuidades o desperfectos que podrían estar presentes en esta área (Figura 67), lo que podría alterar los resultados de manera incorrecta.



Figura 67: Imperfecciones de la probeta en la zona de contacto con el soporte.

Los datos del control dimensional se encuentran reflejados en el Anexo I: Hojas de datos.

5.5. Ensayo de fatiga a flexión rotativa

Por último, se procede a realizar el ensayo de fatiga a flexión rotativa en cada una de las probetas, obteniendo así el número de ciclos que cada una puede soportar hasta su fractura. Para llevarlo a cabo se ha utilizado una máquina diseñada y fabricada por la Universidad de Málaga (Figura 68). La misma institución creó, además, una caja móvil de madera revestida con material aislante (Figura 69), con el propósito de insonorizar la máquina durante la realización del ensayo y evitar ruidos molestos para el resto del personal del taller.



Figura 68: Máquina para ensayos de fatiga mediante flexión rotativa.



Figura 69: Caja de insonorización de la máquina de fatiga.

En este estudio, se optó por someter las probetas a un único valor de carga con el propósito de evaluar con precisión la influencia de los parámetros bajo análisis y no introducir más variables al proceso. De este modo, se seleccionó un peso específico para llevar a cabo los ensayos,

inicialmente establecido en 1 kg. Para lograr este valor, se agregaron elementos de utilería del taller a la barra donde se acopla el peso, como tuercas, arandelas y pesas de metal, consiguiendo un resultado aproximado (Figura 70).



Figura 70: Masa aplicada para el ensayo de fatiga.

Tras realizar el ensayo en cuatro probetas, dos de la primera configuración y dos de la segunda, se observó que el tiempo hasta la rotura era demasiado prolongado. Por ello, se aumentó el peso del ensayo a 1.5 kg, añadiendo a la barra mostrada en la Figura 70 una pesa de 5 N (Figura 71).



Figura 71: Pesa de 5 N.

La velocidad del ensayo también se ha mantenido constante, siendo esta fijada a 1800 revoluciones por minuto (rpm) (Figura 72).



Figura 72: Velocidad fijada en 1800 rpm para el ensayo.

Para llevar a cabo el ensayo, se coloca la probeta en la abrazadera de la máquina en un extremo, mientras que en el otro extremo se posiciona la varilla que sostiene el peso. Esta varilla cuenta con un rodamiento que se encaja en la probeta, permitiendo su rotación. Este mecanismo requiere de cierta sujeción, si no, se podría desprender la varilla debido a las vibraciones del ensayo. Es por ello que se rosca uno de los extremos de la probeta mediante una terraja M10 (Figura 73) que permite fijar una tuerca. El montaje final se ilustra en la Figura 74.

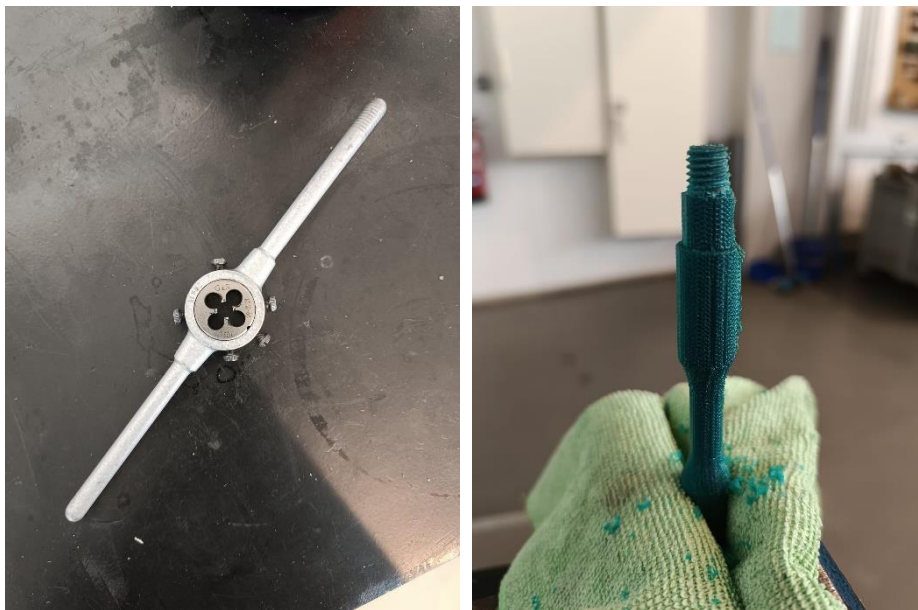


Figura 73: Terraja para roscado M10.



Figura 74: Montaje final para el ensayo.

Por último, se pone en marcha la máquina. Esta está equipada con un contador que registra la cantidad de ciclos que la probeta ha completado (Figura 75). Este contador se detiene automáticamente cuando la probeta se rompe, gracias a un sistema compuesto por un tornillo y una pletina (Figura 76).



Figura 75: Contador de ciclos.



Figura 76: Sistema de parada automática de la máquina.

En la Figura 77 se muestra el sistema tras la rotura de una de las probetas. Todas las probetas rompieron con normalidad exceptuando una, de la configuración de 0.2 mm de espesor y 0 carcacas, que no rompió en su totalidad, quedándose parte del material retorcido por la torsión (Figura 78).



Figura 77: Rotura de probeta.

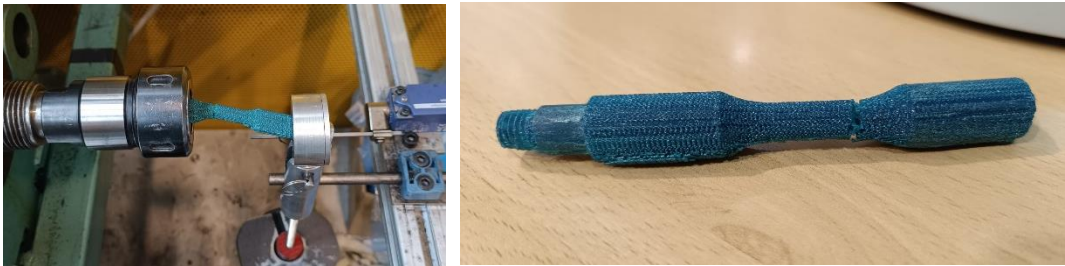


Figura 78: Fallo de rotura en B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_CO.

Después de registrar el número de ciclos que cada probeta ha soportado, se procede a medir la distancia de rotura de la probeta, que equivale a la distancia entre el punto de aplicación de la carga y la zona donde ocurre la rotura (Figura 79). Para llevar a cabo esta medición, se ha utilizado un pie de rey digital de la marca Mitutoyo (Figura 80).

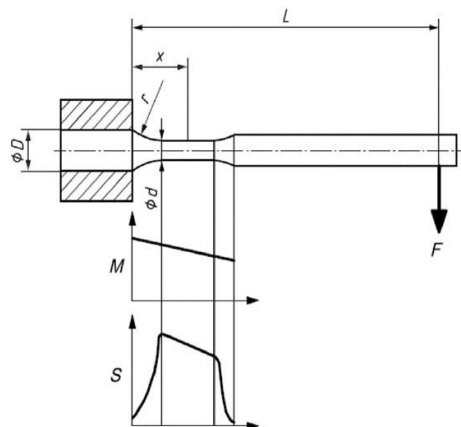


Figura 79: Esquema del ensayo de fatiga.



Figura 80: Pie de rey digital Mitutoyo.

Como es de intuir, la región de mayor relevancia en este tipo de ensayo y probeta es la zona central, ya que es donde se espera que ocurra la fractura. Esto se debe a una mayor concentración de tensiones en esa zona, por la propia geometría y agarre de la probeta en la máquina de ensayo.

Todos los datos del ensayo de fatiga se encuentran reflejados en el Anexo I: Hojas de datos.

6. Análisis y síntesis de resultados

6.1. Análisis de desviaciones macrogeométricas

Después de realizar la medición dimensional de las probetas utilizando el micrómetro de exteriores, se han obtenido los resultados detallados en el Anexo I: Hojas de Datos. Estos datos han sido analizados mediante gráficos para poder obtener ciertas conclusiones sobre los mismos.

A continuación, se presentan las tablas y gráficos que ilustran la variación porcentual del diámetro en los distintos puntos de la probeta respecto al valor nominal. Primero, se analizará la influencia del número de carcadas, manteniendo el espesor de capa constante. Seguidamente, se hará una comparativa de la variación porcentual del diámetro entre los dos espesores estudiados para un mismo número de carcadas.

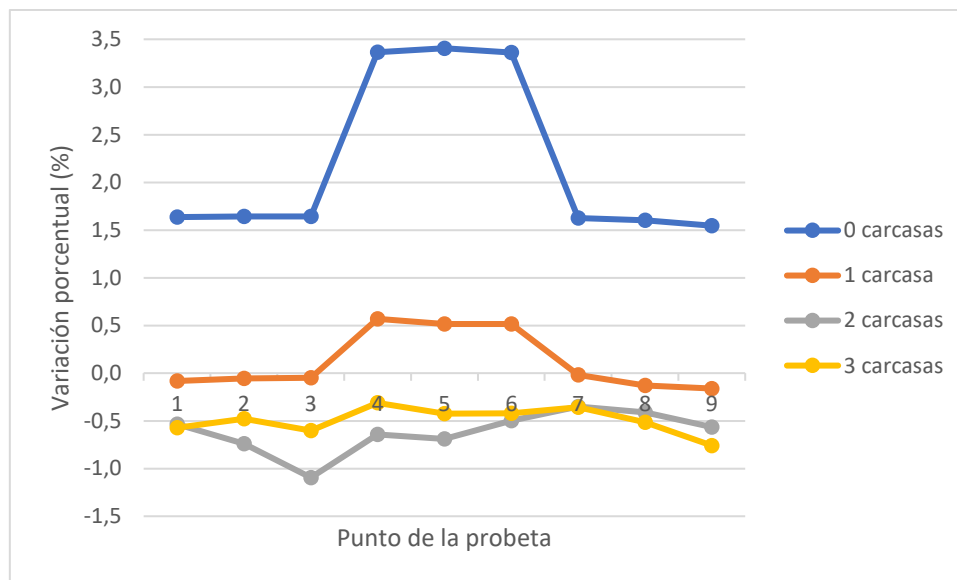


Figura 81: Variación porcentual del diámetro respecto al nominal con 0.2 mm de espesor.

Tabla 3: Datos del control dimensional para 0 carcadas y 0.2 mm de espesor.

| B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C0 | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Puntos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Media | 15.245 | 15.247 | 15.247 | 9.303 | 9.307 | 9.302 | 15.244 | 15.241 | 15.232 |
| % | 1.6357 | 1.6433 | 1.6437 | 3.3644 | 3.4061 | 3.3594 | 1.6250 | 1.6040 | 1.5457 |

Tabla 4: Datos del control dimensional para 1 carcada y 0.2 mm de espesor.

| B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C1 | | | | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Puntos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Media | 14.988 | 14.992 | 14.993 | 9.051 | 9.046 | 9.046 | 14.997 | 14.981 | 14.976 |
| % | -0.0807 | -0.0540 | -0.0477 | 0.5694 | 0.5144 | 0.5150 | -0.0200 | -0.1287 | -0.1610 |

Tabla 5: Datos del control dimensional para 2 carcadas y 0.2 mm de espesor.

| B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C2 | | | | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Puntos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Media | 14.920 | 14.889 | 14.836 | 8.942 | 8.938 | 8.955 | 14.947 | 14.938 | 14.915 |
| % | -0.5340 | -0.7413 | -1.0947 | -0.6411 | -0.6911 | -0.4972 | -0.3503 | -0.4110 | -0.5637 |

Tabla 6: Datos del control dimensional para 3 carcadas y 0.2 mm de espesor.

| B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C3 | | | | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Puntos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Media | 14.914 | 14.928 | 14.910 | 8.972 | 8.962 | 8.962 | 14.947 | 14.923 | 14.886 |
| % | -0.5733 | -0.4773 | -0.6010 | -0.3117 | -0.4239 | -0.4194 | -0.3557 | -0.5150 | -0.7587 |

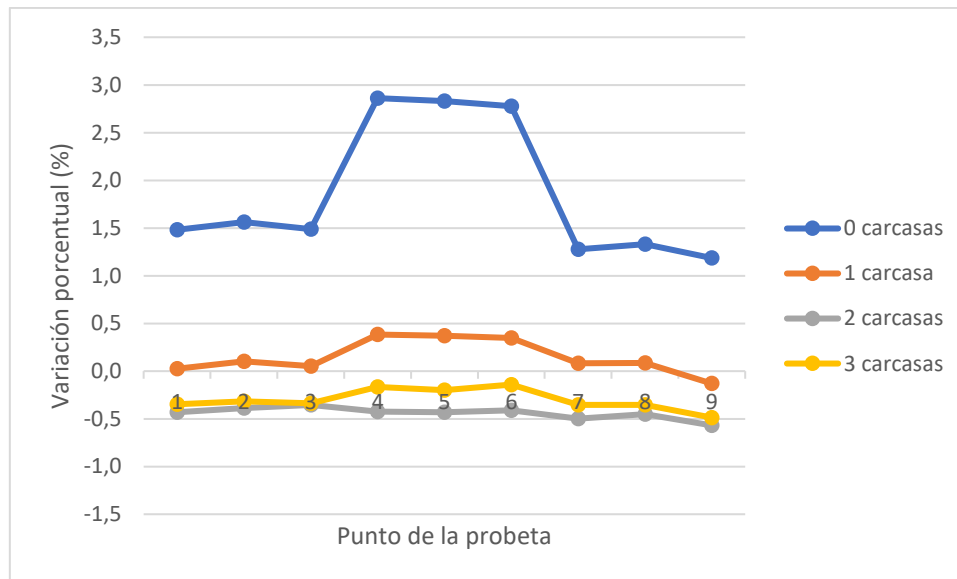


Figura 82: Variación porcentual del diámetro respecto al nominal con 0.3 mm de espesor.

Tabla 7: Datos del control dimensional para 0 carcadas y 0.3 mm de espesor.

| B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C0 | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Puntos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Media | 15.222 | 15.235 | 15.223 | 9.258 | 9.255 | 9.250 | 15.192 | 15.199 | 15.178 |
| % | 1.4807 | 1.5640 | 1.4870 | 2.8617 | 2.8306 | 2.7772 | 1.2787 | 1.3293 | 1.1853 |

Tabla 8: Datos del control dimensional para 1 carcada y 0.3 mm de espesor.

| B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C1 | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Puntos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Media | 15.004 | 15.015 | 15.008 | 9.035 | 9.033 | 9.031 | 15.013 | 15.013 | 14.980 |
| % | 0.0267 | 0.1010 | 0.0530 | 0.3833 | 0.3717 | 0.3489 | 0.0833 | 0.0873 | -0.1303 |

Tabla 9: Datos del control dimensional para 2 carcadas y 0.3 mm de espesor.

| B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C2 | | | | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Puntos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Media | 14.935 | 14.942 | 14.947 | 8.962 | 8.961 | 8.963 | 14.925 | 14.932 | 14.915 |
| % | -0.4320 | -0.3890 | -0.3543 | -0.4228 | -0.4300 | -0.4111 | -0.4997 | -0.4527 | -0.5690 |

Tabla 10: Datos del control dimensional para 3 carcadas y 0.3 mm de espesor.

| B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C3 | | | | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Puntos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Media | 14.948 | 14.952 | 14.949 | 8.985 | 8.982 | 8.987 | 14.947 | 14.947 | 14.927 |
| % | -0.3470 | -0.3180 | -0.3380 | -0.1644 | -0.1983 | -0.1411 | -0.3547 | -0.3547 | -0.4870 |

De las Figuras 81 y 82 se puede extraer la siguiente información:

- Las variaciones porcentuales de diámetro entre la probeta impresa (valor real) y la probeta modelada (valor teórico o nominal) son relativamente pequeñas. Estas presentan valores de entre -1% y 3.4%, dándose el signo negativo cuando la probeta impresa es menor a la probeta modelada.
- Al comparar de manera genérica las gráficas de las dos figuras, se aprecia que las variaciones porcentuales adquieren valores menores a medida que el espesor de capa aumenta. Esto se debe a que el efecto *warping* tiene un impacto más pronunciado cuanto menor es el espesor de hilo extruido.
- En términos generales, las probetas impresas sin carcasa presentan desviaciones porcentuales positivas, mientras que aquellas con 1, 2 y 3 carcadas muestran desviaciones porcentuales negativas o cercanas a 0%. Esto podría atribuirse a que la ausencia de carcasa permite una deposición más libre del material fundido: la carcasa proporciona una barrera que delimita e impide que el material fluya por los bordes cuando es depositado por la impresora, y en su carencia, es más fácil que la probeta supere las dimensiones teóricas.
- Para ambos espesores de capa, la presencia o ausencia de carcadas es más significativa que la cantidad de las mismas. Las variaciones porcentuales son mucho mayores, en valor absoluto, cuando no hay carcasa, mientras que para 1, 2 o 3 carcadas las desviaciones porcentuales no difieren mucho entre sí.
- La adición de más de 1 carcasa no resulta en una mejora significativa en las desviaciones porcentuales. Mucho menos en las zonas alejadas de la zona de interés, es decir, lejos de la zona central de la probeta.
- En todas las configuraciones, la diferencia entre las dimensiones de las probetas impresas y el valor nominal es mayor en la zona central de estas. Esto podría deberse al hecho de que dicha zona se imprime sobre el soporte en lugar de sobre la cama, lo que conlleva ciertas imperfecciones.

A continuación, se presentan los gráficos de variación porcentual de diámetro para los dos espesores estudiados y un mismo número de carcassas:

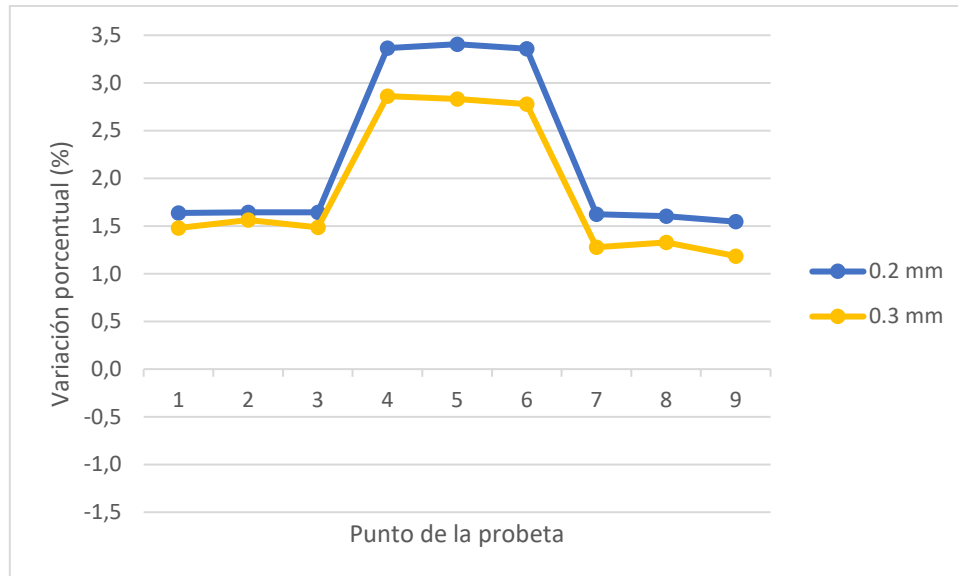


Figura 83: Variación porcentual del diámetro respecto al nominal con 0 carcassas.

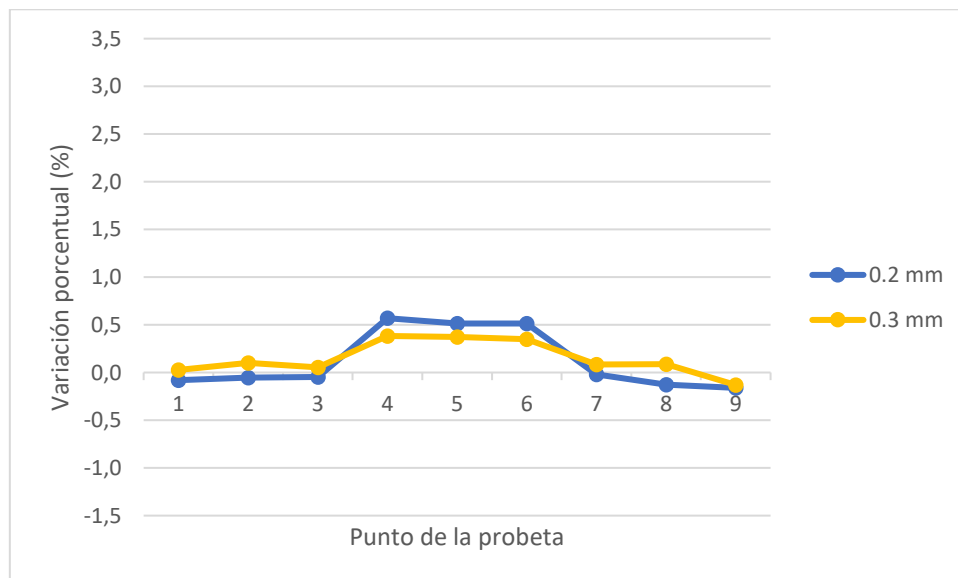


Figura 84: Variación porcentual del diámetro respecto al nominal con 1 carcassa.

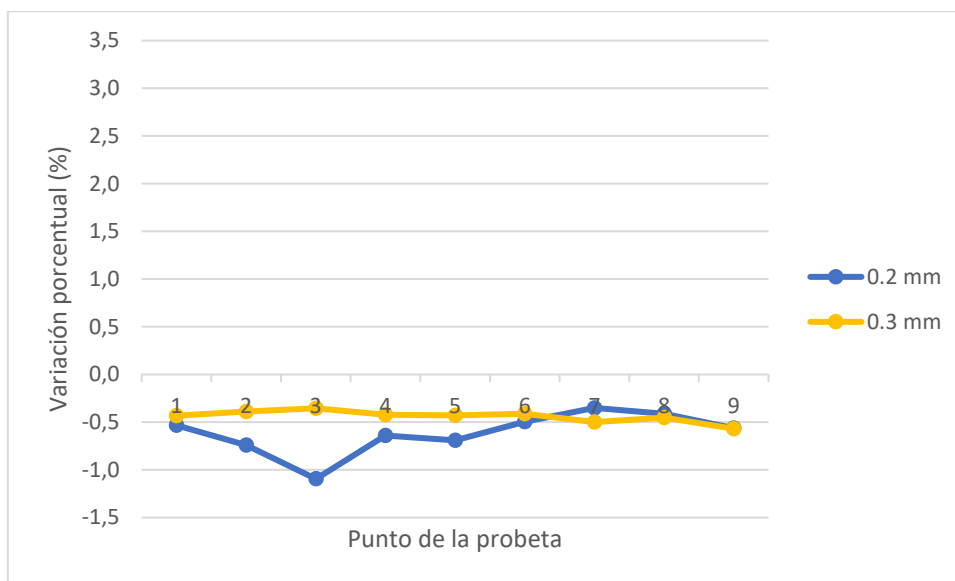


Figura 85: Variación porcentual del diámetro respecto al nominal con 2 carcadas.

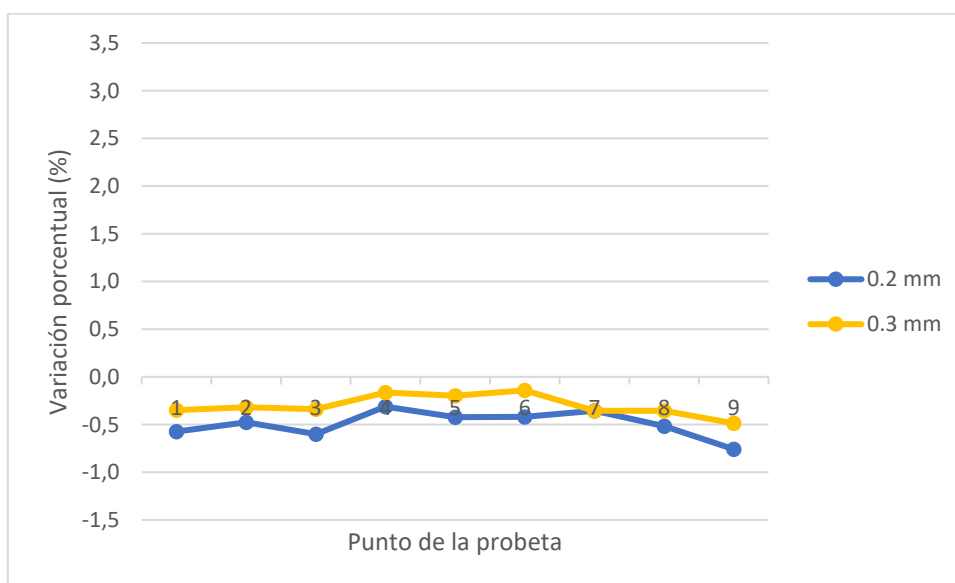


Figura 86: Variación porcentual del diámetro respecto al nominal con 3 carcadas.

Las Figuras 83, 84, 85 y 86 reafirman lo anteriormente comentado.

6.2. Análisis de los resultados del ensayo de fatiga

A continuación, se presenta la tabla que detalla el número promedio de ciclos que cada serie de probetas ha soportado, junto con su correspondiente combinación de parámetros.

El ensayo de fatiga, como se mencionó previamente, es un ensayo con una variabilidad significativa. Por lo tanto, dentro de una misma serie de impresión, se han observado ciertas disparidades en los valores entre las diferentes probetas. Estos contrastes son evidentes en las Hojas de Datos que se encuentran en el Anexo I.

Tabla 11: Valores medios del número de ciclos soportado por las probetas.

| Parámetros de interés | | Valor medio de ciclos |
|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| Espesor de capa (mm) | Número de carcasas | |
| 0.2 | 0 | 39082 |
| 0.2 | 1 | 117669 |
| 0.2 | 2 | 124918 |
| 0.2 | 3 | 185284 |
| 0.3 | 0 | 24966 |
| 0.3 | 1 | 88701 |
| 0.3 | 2 | 120071 |
| 0.3 | 3 | 142151 |

Con los datos proporcionados en la Tabla 11, se analiza gráficamente la influencia del número de carcasas en la vida a fatiga de las probetas para los dos espesores estudiados:

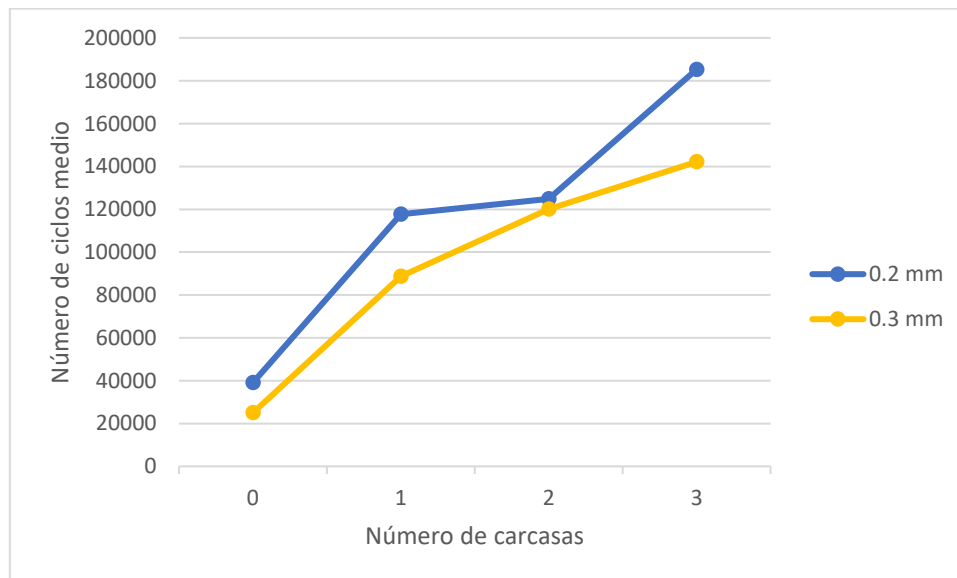


Figura 87: Número de ciclos medio en función del número de carcasas.

De la Figura 87 se puede extraer la siguiente información:

- Al comparar el número de ciclos soportado por cada tanda, se observa que incrementar el espesor de la capa no conduce a una mejora; por el contrario, perjudica los valores ligeramente. Excepto en el caso de 2 carcasas, donde el resultado es prácticamente idéntico. Aun así, en las demás tandas, la diferencia entre los puntos de ambas rectas apenas alcanza los 40000 ciclos, lo cual carece de una relevancia significativa. Se podría

concluir que, a un mismo número de carcassas, el espesor de la capa no tiene un papel crucial en este estudio.

- Las rectas trazadas en la figura siguen una tendencia lineal positiva: a mayor número de carcassas, mejor resistencia a la fatiga.
- De manera similar a lo sucedido en el control dimensional, el factor más influyente es la presencia o ausencia de carcassas, dándose en el primer tramo de las rectas la pendiente más pronunciada. En el resto de los tramos, la diferencia es menor a 40000 ciclos, lo que sugiere nuevamente que el número de carcassas no es un parámetro influyente.

A continuación, se muestra con detalle lo ocurrido en cada una de las tandas de impresión:

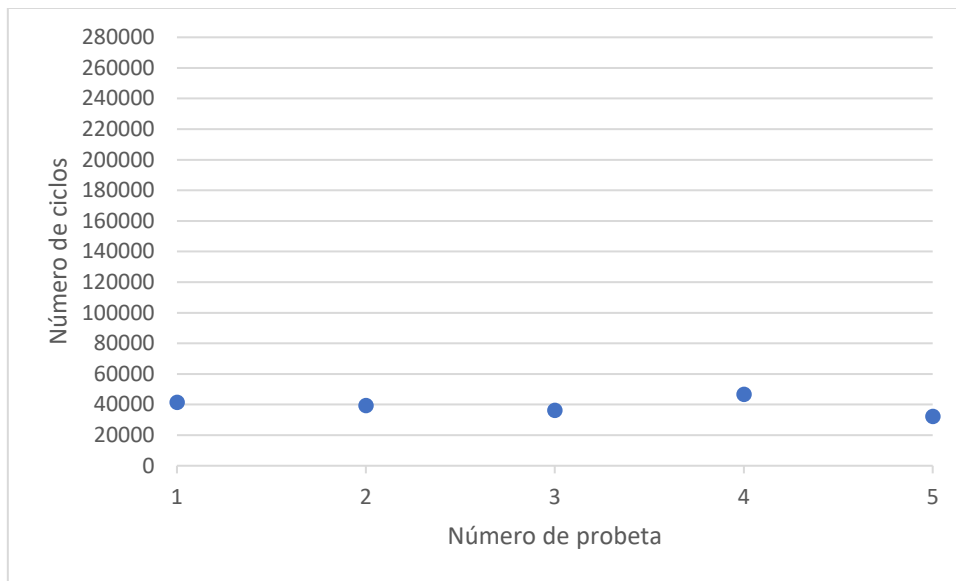


Figura 88: Vida a fatiga para 0.2 mm de espesor y 0 carcassas.

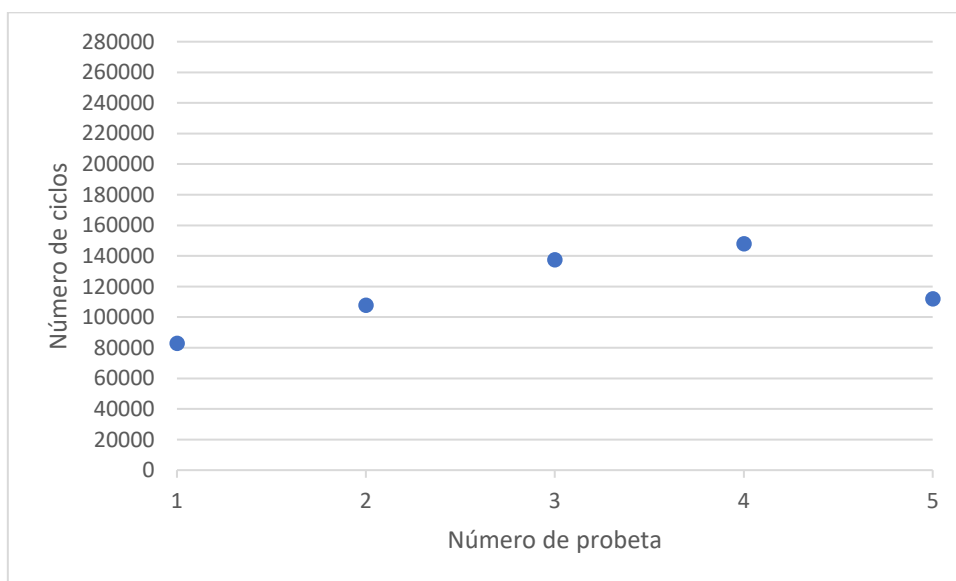


Figura 89: Vida a fatiga para 0.2 mm de espesor y 1 carcassa.

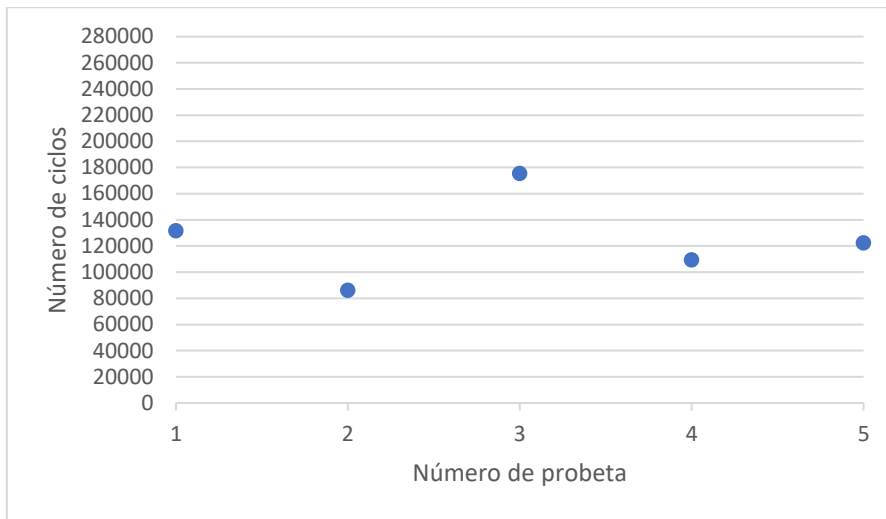


Figura 90: Vida a fatiga para 0.2 mm de espesor y 2 carcasas.

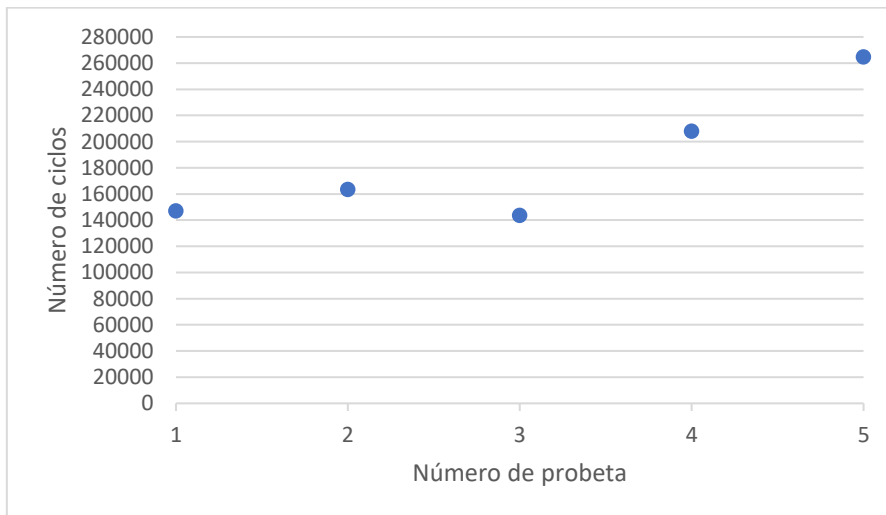


Figura 91: Vida a fatiga para 0.2 mm de espesor y 3 carcasas.

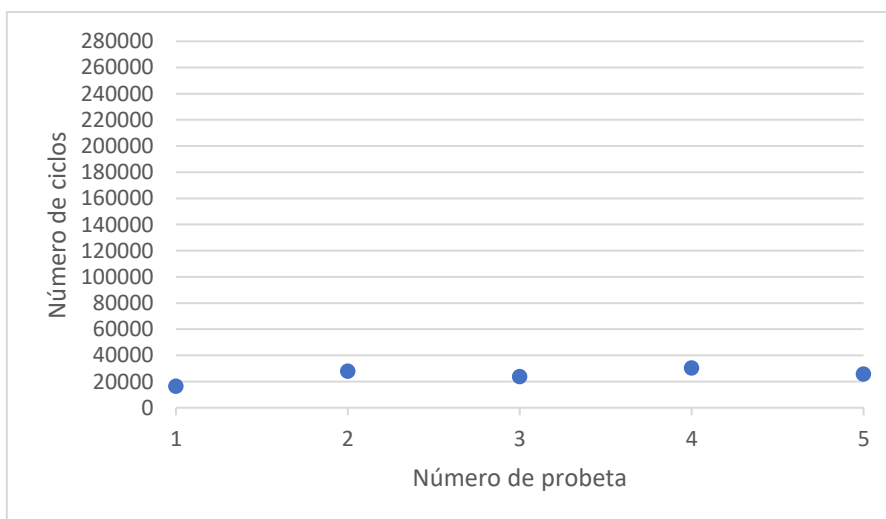


Figura 92: Vida a fatiga para 0.3 mm de espesor y 0 carcasas.

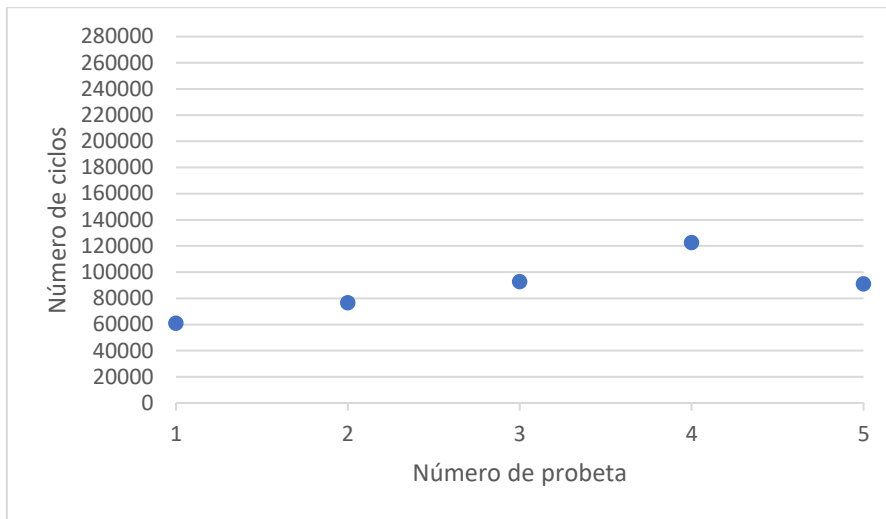


Figura 93: Vida a fatiga para 0.3 mm de espesor y 1 carcasa.

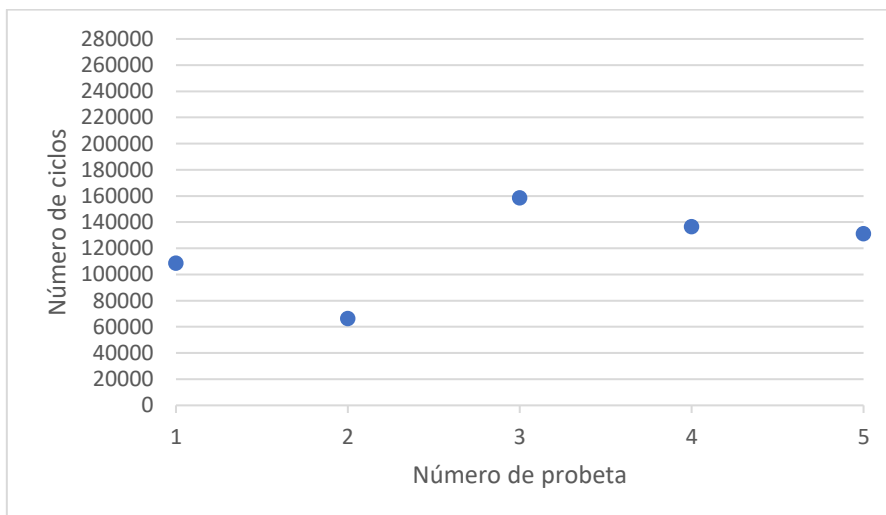


Figura 94: Vida a fatiga para 0.3 mm de espesor y 2 carcadas.

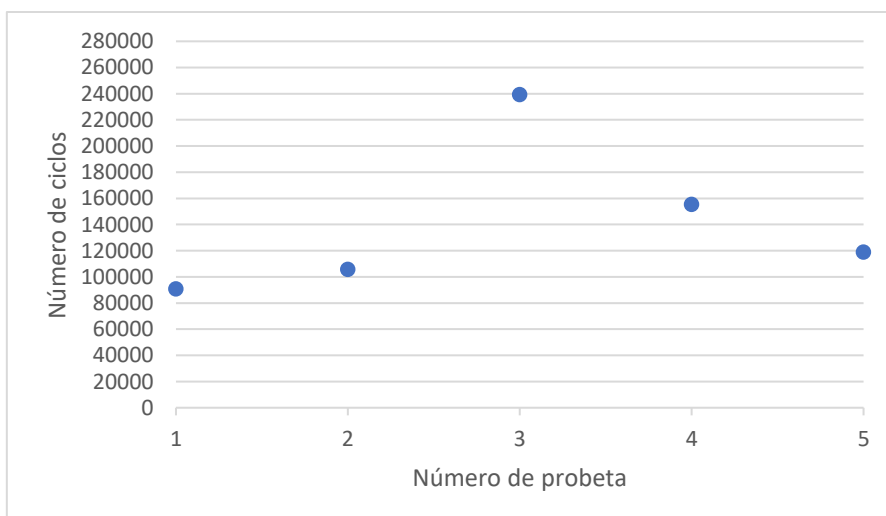


Figura 95: Vida a fatiga para 0.3 mm de espesor y 3 carcadas.

Las representaciones gráficas de la Figura 88 hasta la Figura 95 respaldan lo mencionado anteriormente. Además, evidencian que el factor más relevante es la tenencia de carcasa, sin que la cantidad de estas tenga una influencia significativa.

Por último, en la Tabla 12 se detalla la longitud de rotura promedio para cada configuración. Esta ha sido medida desde el punto de aplicación de la carga hasta la zona de rotura, conforme se explica al final del apartado 5.5.

Tabla 12: Valores medios de la longitud de rotura de las probetas.

| Parámetros de interés | | Longitud media de rotura (mm) |
|-----------------------|---------------------|-------------------------------|
| Espesor de capa (mm) | Número de carcassas | |
| 0.2 | 0 | 67.41 |
| 0.2 | 1 | 67.52 |
| 0.2 | 2 | 67.75 |
| 0.2 | 3 | 67.31 |
| 0.3 | 0 | 67.11 |
| 0.3 | 1 | 66.49 |
| 0.3 | 2 | 68.13 |
| 0.3 | 3 | 68.48 |

Es evidente que, en todas las probetas, la zona de rotura ha sido prácticamente la misma.

6.2.1. Fractografías

La fractografía es una rama de la ciencia de los materiales que se centra en el estudio de las fracturas de materiales, particularmente en la evaluación de las características de las fracturas para comprender cómo y por qué se rompen los materiales. Por ello, después de que todas las probetas se hayan fracturado, resulta de interés examinar alguna de las roturas a través del microscopio.

Se ha utilizado el microscopio de la marca Zeiss equipado con la cámara *Axiocam 208 color*, también de la misma casa (Figura 96). Esta cámara inteligente es capaz de transmitir imágenes en directo nítidas, con muchos detalles y alta fidelidad de colores, a una resolución Full 4K.



Figura 96: Microscopio Zeiss.

La casa Zeiss cuenta con su propio software de microscopía denominado ZEN core (Figura 97). ZEN core es el paquete más exhaustivo de herramientas de captura de imágenes, segmentación, análisis y conectividad de datos para la microscopía multimodal en laboratorios.

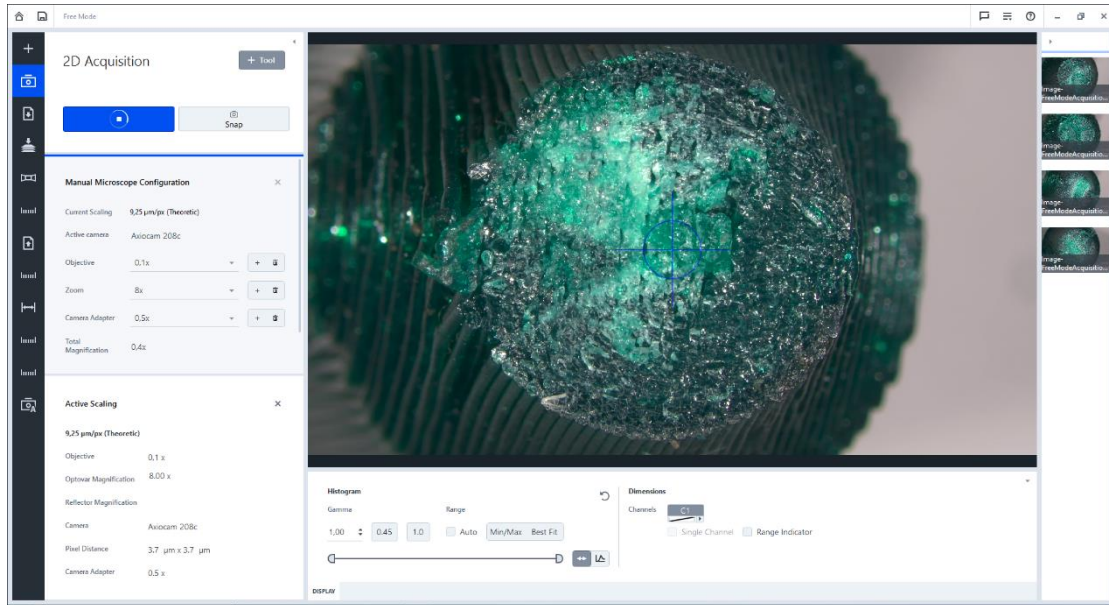


Figura 97: Interfaz del programa ZEN core.

Como se puede apreciar en la Figura 97, se ha posicionado la probeta en el centro del microscopio y se ha ajustado el zoom óptico a un factor de 8x.

La mayoría de las fracturas de probetas con carcasa y espesor de capa de 0.2 mm presentan una sección del siguiente tipo (Figura 98, 99, y 100):

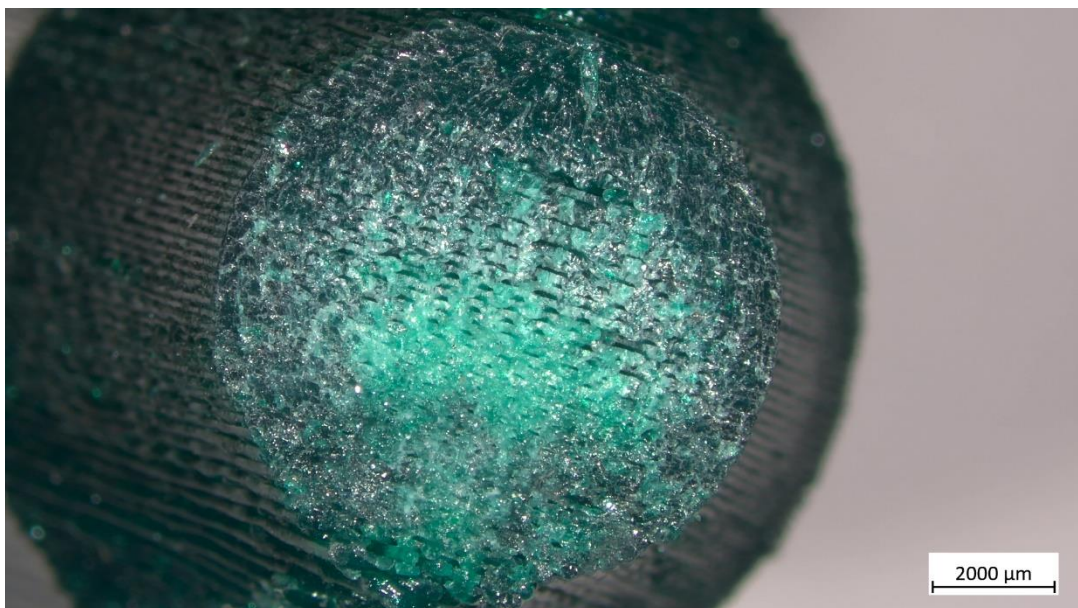


Figura 98: Fractografía de la Probeta 2 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C1.

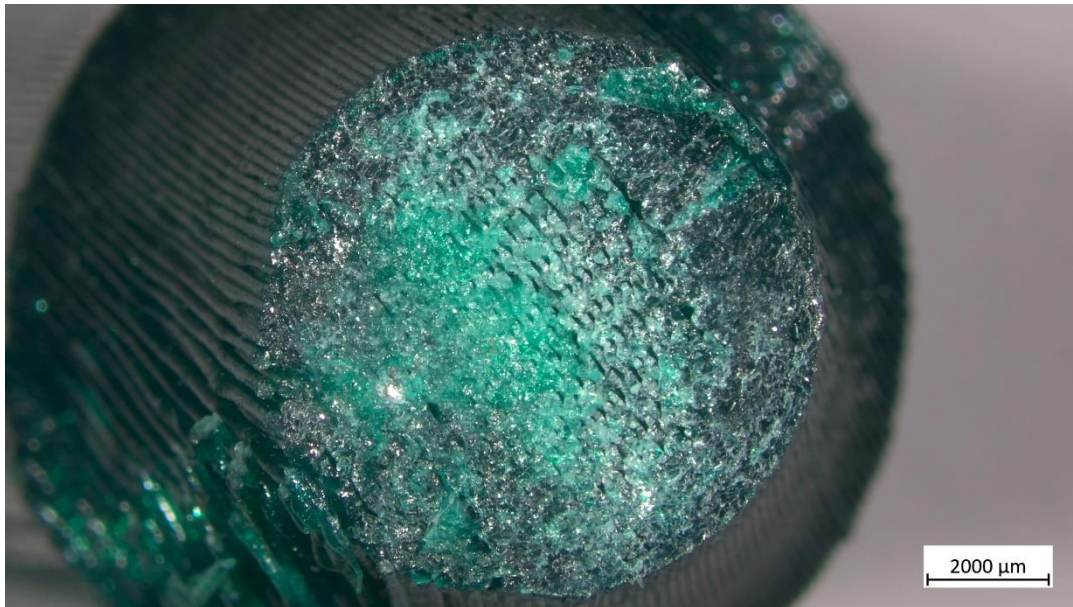


Figura 99: Fractografía de la Probeta 3 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C2.

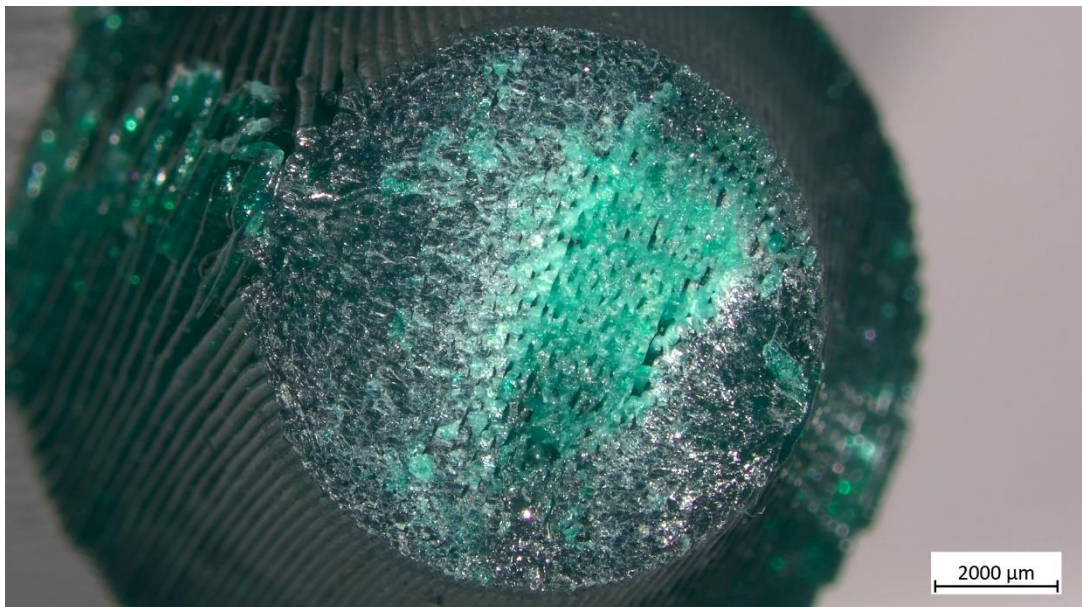


Figura 100: Fractografía de la Probeta 4 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C3.

La fractura de estas probetas es bastante uniforme, destacándose dos áreas distintas: la zona de fractura frágil, que presenta un tono más oscuro, y la zona de fractura dúctil, que tiene un tono más claro. A priori, no se aprecia un posible punto de inicio de grieta.

La misma situación se presenta en el caso de las probetas con carcasa y un espesor de capa de 0.3 mm (Figura 101), con la salvedad de que en la mayoría de estas se evidencia la falta de adherencia entre las capas de la zona que se encuentra en contacto con la cama de impresión (Figura 102 y 103).

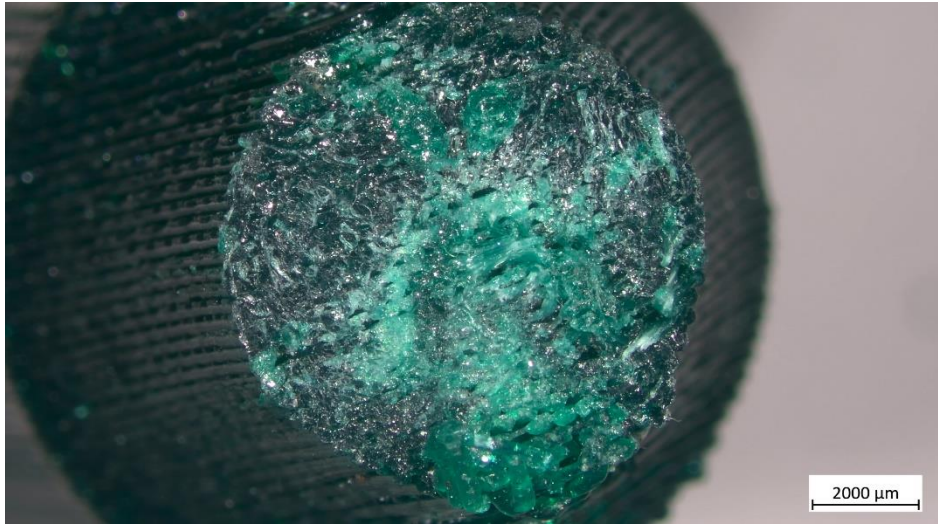


Figura 101: Fractografía de la Probeta 4 de la configuración B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C1.

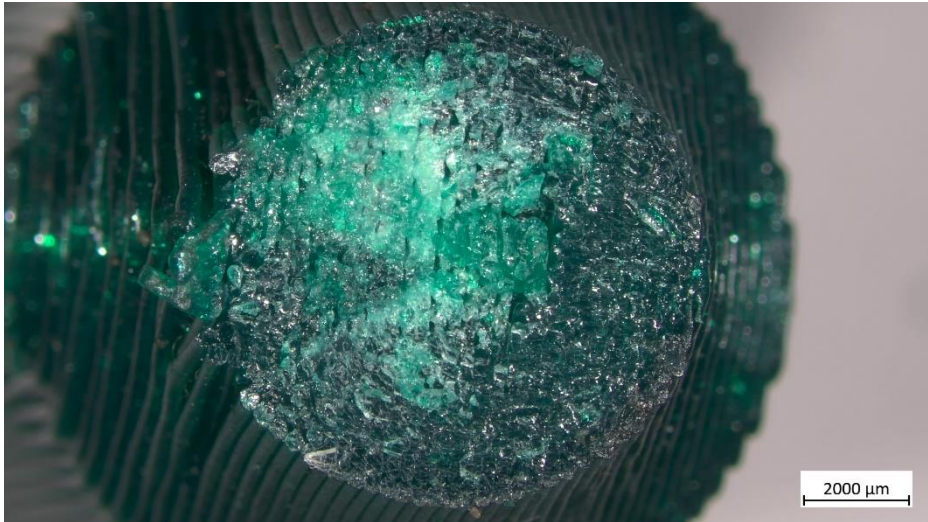


Figura 102: Fractografía de la Probeta 3 de la configuración B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C2.



Figura 103: Fractografía de la Probeta 3 de la configuración B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C3.

Si observamos ahora las probetas sin carcasa, se aprecia una diferencia notable: estas muestran una zona de fractura dúctil mucho más extensa, donde el material se ha estirado significativamente (Figura 104 y 105).

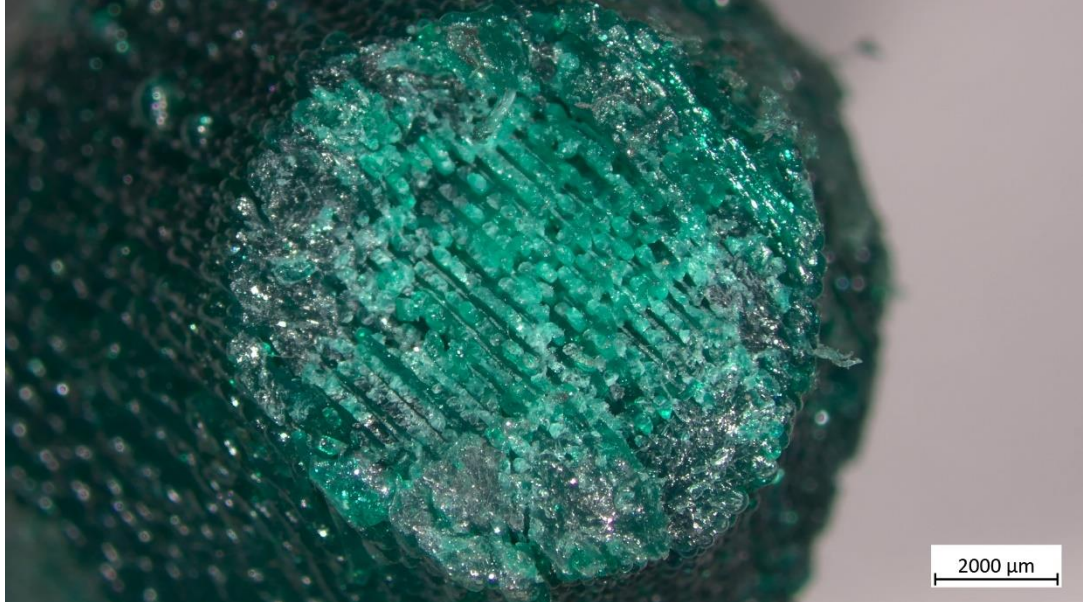


Figura 104: Fractografía de la Probeta 2 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_CO.

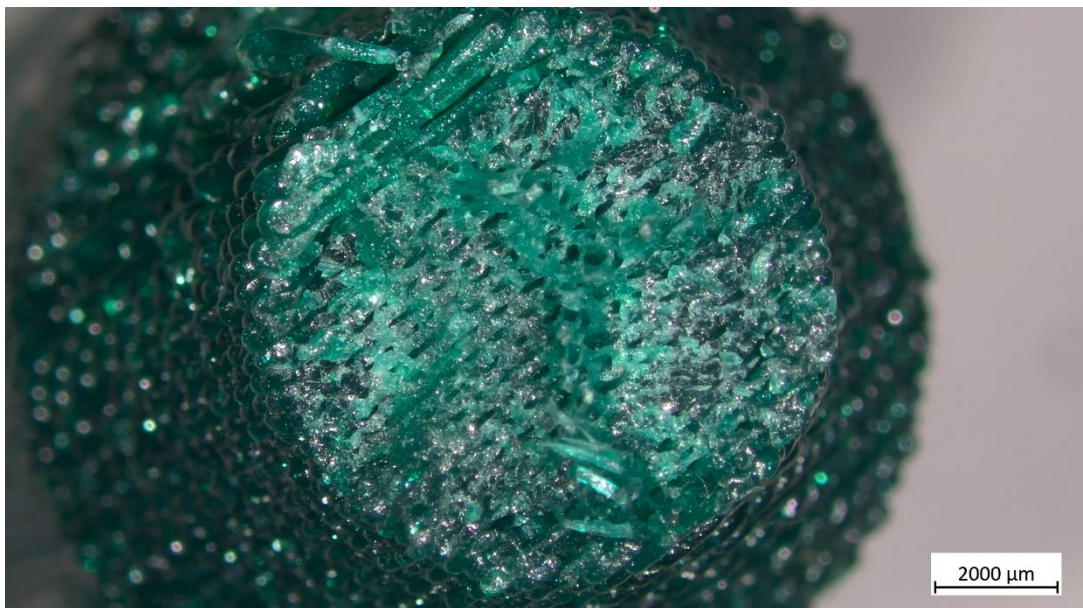


Figura 105: Fractografía de la Probeta 2 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_CO.

Como ejemplo de especial interés, se ha llevado a cabo un análisis más detenido de la fractura de dos probetas debido a sus características singulares. En el primer caso, ilustrado en las Figuras 106 y 107, se observa una fractura completamente frágil que se originó a partir de una muesca en la probeta. Por otro lado, en el segundo caso, ocurrió algo contrario: la probeta no se rompió por completo y quedó unida por fibras que plastificaron, experimentando también el efecto de la torsión (Figura 108).

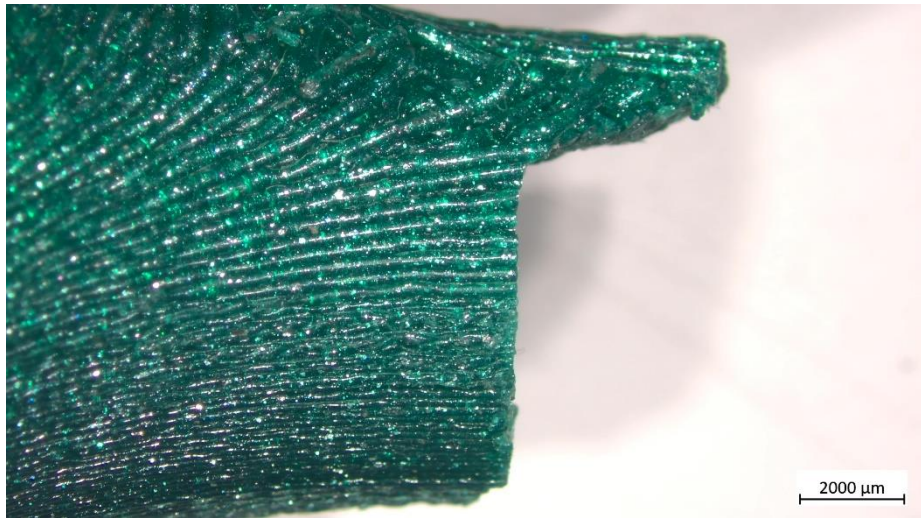


Figura 106: Fractografía de perfil de la Probeta 1 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C1.

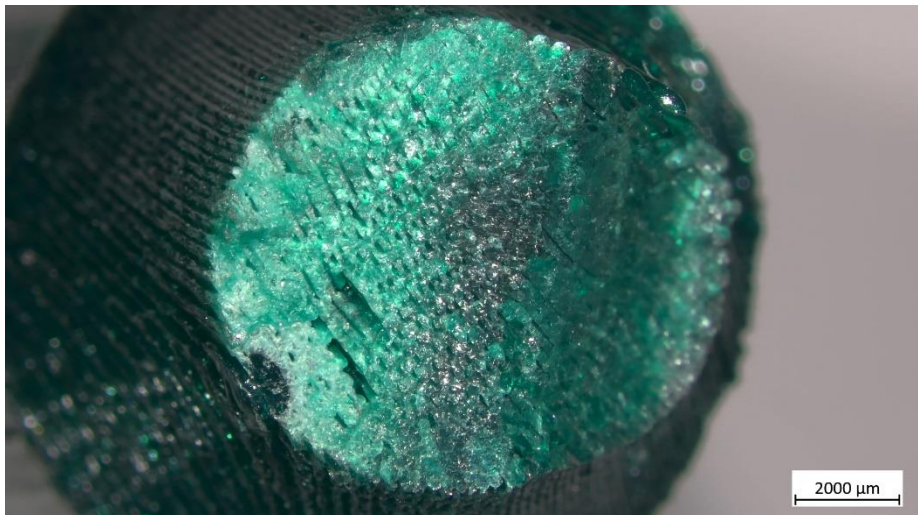


Figura 107: Fractografía de la Probeta 1 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C1.

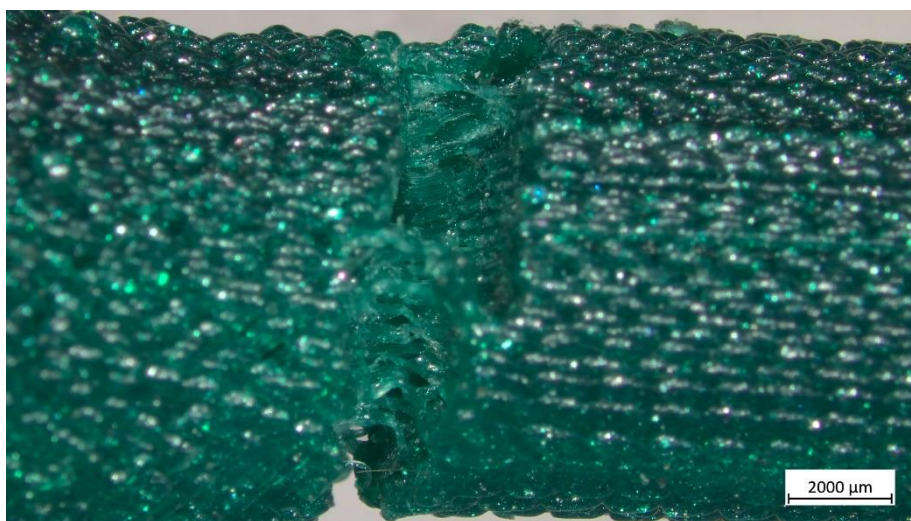


Figura 108: Fractografía de la Probeta 4 de la configuración B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C0.

Finalmente, dado que se ha resaltado en varias ocasiones la importancia de la presencia o ausencia de carcasa en el acabado superficial y la vida a fatiga de las probetas, se han capturado dos fotografías adicionales para ilustrar este concepto: la primera a una probeta impresa sin carcasa y la segunda a una probeta impresa con dos carcasa (Figura 109 y 110, respectivamente).

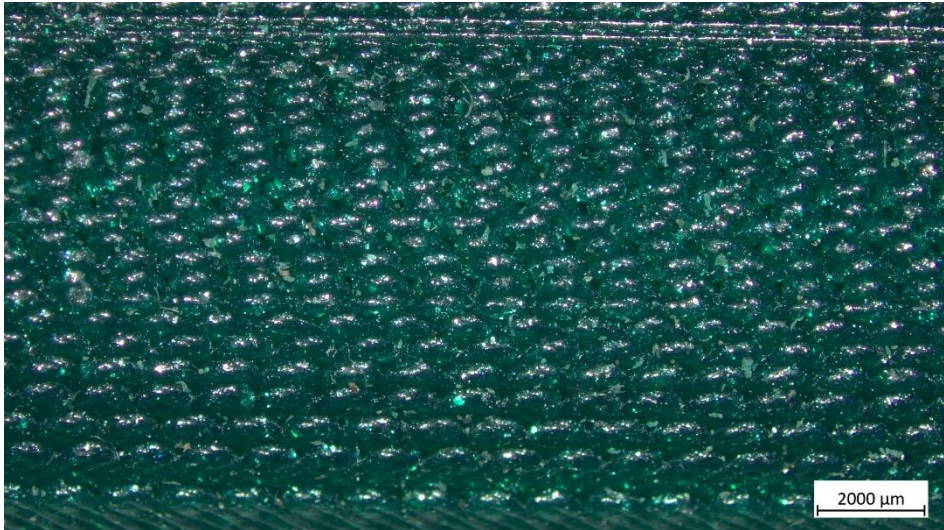


Figura 109: Fractografía del acabado superficial de una probeta sin carcasa.

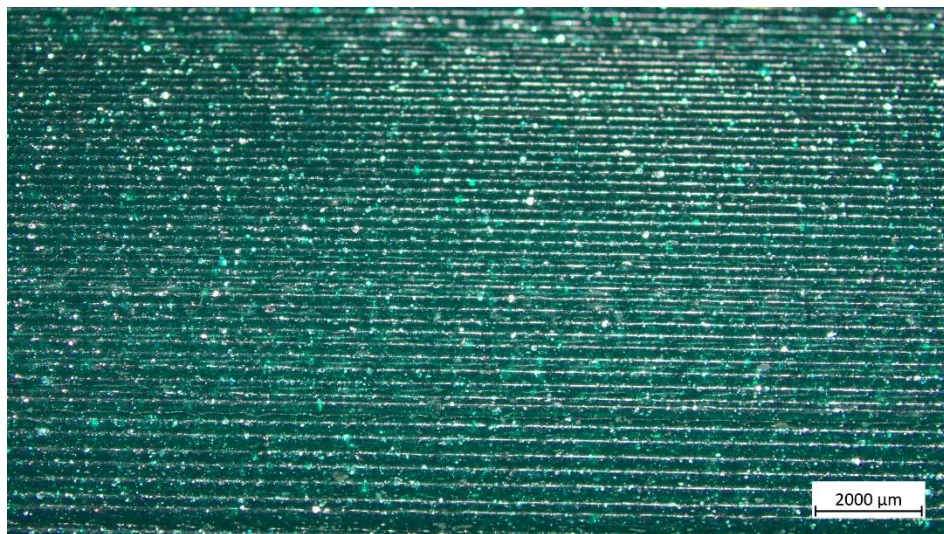


Figura 110: Fractografía del acabado superficial de una probeta con 2 carcasa.

En la imagen correspondiente a la probeta sin carcasa, se aprecia que la capa externa muestra un patrón similar al relleno, mientras que, en la probeta con dos carcasa, los hilos están alineados en la dirección longitudinal de la probeta. El entramado rectangular en las probetas sin carcasa facilita la fractura por fatiga, ya que parte de las fibras se orientan de manera paralela al plano de rotura, concentrando la tensión en esos puntos. Por consiguiente, se puede entender que la incorporación de la carcasa supone un refuerzo sustancial para la resistencia a la fatiga, ya que en estas probetas los hilos externos están orientados en la dirección que ofrece una mayor resistencia a las tensiones.

7. Conclusiones

Después de realizar un análisis de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Con relación al **control dimensional** de las probetas:

Primeramente, las variaciones porcentuales entre el diámetro real y el valor nominal de las probetas son relativamente pequeñas, oscilando entre -1% y 3.4%. Estos rangos indican una calidad de impresión satisfactoria, lo que resulta en resultados confiables y consistentes.

Se ha notado que estas desviaciones porcentuales tienden a aumentar cuando el espesor de capa disminuye. Esto es debido a que el impacto del efecto *warping* es menor en espesores mayores, lo que contribuye a una mayor estabilidad dimensional.

En todas las configuraciones, se ha observado que la diferencia porcentual entre el valor real y nominal es más pronunciada en la zona central de las probetas, en comparación con los extremos. Esto es debido a que la zona central de la probeta es un voladizo, que para su impresión se apoya sobre soportes, los cuales cuentan con un relleno inferior a la pieza. También es debido a que la sección es inferior, por lo que el enfriamiento es más rápido, y las contracciones del material mayores. Esto afecta negativamente a la precisión dimensional de esta zona, aunque no en gran medida.

Es interesante notar que las probetas sin carcasa presentan desviaciones porcentuales positivas, indicando que el diámetro medido supera al valor nominal. En contraste, las probetas con carcasa exhiben desviaciones negativas, lo que significa que el diámetro medido es menor que el valor nominal. Esto podría atribuirse a que la ausencia de carcasa permite una deposición más libre del material fundido: la carcasa proporciona una barrera que delimita e impide que el material fluya por los bordes cuando es depositado por la impresora, y en su carencia, es más fácil que la probeta supere las dimensiones teóricas.

La presencia o ausencia de carcasas se ha revelado como el factor más influyente en las desviaciones, es más significativo que la cantidad de carcasas en sí. Además, la adición de más de una carcasa no mejora notablemente las desviaciones porcentuales, especialmente en zonas alejadas de la zona central. Por ende, la incorporación de un mayor número de carcasas no parece justificarse en términos de mejorar la precisión dimensional, pudiendo optimizarse el proceso, ahorrando material y tiempo de impresión, si se utilizan configuraciones con un número menor de carcasas.

Por último, resulta importante señalar que no se ha podido realizar un análisis de la rugosidad superficial de las probetas debido a la falta de equipo en el laboratorio. Aún así, se ha observado a simple vista que las piezas sin carcasa poseen un acabado superficial mucho más deficiente que las demás configuraciones.



En cuanto a la **resistencia a la fatiga** de las probetas, se ha observado que:

Dentro de una misma configuración, las variaciones en la vida a fatiga de las probetas son notables debido a la variabilidad del ensayo.

Según lo comentado en el apartado 4. Estado del arte, el aumento del espesor de capa debe conducir a una mejora en la vida a fatiga del material. Sin embargo, contradiciendo lo esperado, el ensayo muestra que el aumento del espesor de capa no mejora la resistencia a la fatiga y, en algunos casos, incluso perjudica ligeramente los valores.

De nuevo, la influencia más destacada en la vida a fatiga de las probetas es la presencia o ausencia de carcadas.

Además, se ha observado que cuando se aumenta el número de carcadas en las configuraciones de las probetas, la resistencia a la fatiga tiende a mejorar. Esto es evidente al observar la media del número de ciclos que cada tanda puede soportar. Sin embargo, al examinar los datos de manera individual, no se observa una mejora significativa en la resistencia a la fatiga. Esto sugiere que es posible optimizar el proceso de impresión al reducir el número de carcadas sin afectar sustancialmente los resultados. En otras palabras, al imprimir con menos carcadas, es probable que se obtengan resultados muy similares a los obtenidos con un mayor número de carcadas, lo que podría ahorrar recursos y tiempo en el proceso de impresión.

Por último, nuevamente debido a limitaciones de equipo, no se ha podido llevar a cabo un análisis microgeométrico. Sin embargo, es relevante mencionar que medir la rugosidad superficial de las probetas sin carcada hubiera sido de interés. Estas probetas muestran una calidad inferior debido a su mayor rugosidad, lo que conlleva un mayor número de puntos de concentración de tensiones y, por ende, un comportamiento menos favorable en la vida a fatiga.



8. Líneas futuras de investigación

Este estudio brinda una visión general de la influencia del número de carcassas y su espesor en el comportamiento a fatiga de probetas de PLA. Sin embargo, aún existen aspectos que requieren un mayor análisis en profundidad.

En el futuro, sería factible realizar otro estudio igual que el presente con el propósito de determinar los valores óptimos de ambos parámetros de impresión para lograr los mejores resultados en términos de vida a fatiga. Para lograr esto, sería necesario aumentar la cantidad de repeticiones experimentales y emplear una gama más amplia de valores intermedios. Estos ajustes contribuirían a identificar tendencias de manera más definida. Además, se llevaría a cabo una evaluación para verificar si verdaderamente no tiene influencia el número de carcassas, y se buscaría explicar por qué las probetas con mayor espesor presentan un desempeño inferior en comparación con las de menor espesor de capa.

Además, con el objetivo de adentrarse más en la comprensión de las propiedades de este material ante la fatiga, sería sumamente interesante explorar la variación de otros parámetros de impresión que han sido mantenidos constantes en este ensayo. Tanto la variación individual de parámetros como su combinación generarían una amplia cantidad de información que podría ser utilizada para optimizar la elección de los parámetros a utilizar en la fabricación de piezas o componentes que se someten a flexión rotativa.

Como se ha mencionado previamente, habría resultado interesante llevar a cabo mediciones de la rugosidad superficial de las probetas para así determinar su influencia en la vida a fatiga. Ha sido notorio que las probetas sin carcassa presentan un peor comportamiento, y sería provechoso indagar si esta tendencia se origina únicamente por el acabado superficial o si otros factores también influyen en ello.

9. Bibliografía

- [1] M. F. Záh, C. Seidel, y D. Sellmer, «La fabricación aditiva, una tecnología (hoy) exclusiva pero de potencial infinito - Metalmecánica», 22 de octubre de 2018. [https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/227677-La-fabricacion-aditiva-una-tecnologia-\(hoy\)-exclusiva-pero-de-potencial-infinito.html](https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/227677-La-fabricacion-aditiva-una-tecnologia-(hoy)-exclusiva-pero-de-potencial-infinito.html) (accedido 16 de junio de 2023).
- [2] 3DZ, «¿Fabricación sustractiva o aditiva? Descubra estos procesos!», 21 de junio de 2019. <https://3dz.es/fabricacion-aditiva-o-sustractiva/> (accedido 16 de junio de 2023).
- [3] Organización Internacional de Estandarización, «Norma UNE-EN ISO / ASTM 52900:2022», 2022
- [4] B. Salazar López, «Procesos de conformado » Ingeniería Industrial Online», 3 de septiembre de 2019. <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/procesos-industriales/procesos-de-conformado/> (accedido 1 de agosto de 2023).
- [5] V. Contreras, «Torno CNC y Tecnologías de Prototipos, Casiopea». https://wiki.ead.pucv.cl/V%C3%ADctor_Contreras:_T%C3%ADtulo_II (accedido 1 de agosto de 2023).
- [6] 3DALIA, «La fabricación aditiva, descubre sus ventajas», 2019. <https://3dalia.com/las-ventajas-de-la-fabricacion-aditiva/> (accedido 1 de agosto de 2023).
- [7] Organización Internacional de Estandarización, «UNE-EN ISO 17296-2:2017», 2017
- [8] M. Attaran, «The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing», *Bus Horiz*, vol. 60, n.º 5, pp. 677-688, sep. 2017, doi: 10.1016/j.bushor.2017.05.011.
- [9] L. Contreras, «Las prótesis impresas en 3D, ayudar gracias a las nuevas tecnologías - 3Dnatives», 7 de abril de 2022. <https://www.3dnatives.com/es/protesis-impresas-en-3d-100420182/#!> (accedido 7 de agosto de 2023).
- [10] filament2print, «¿Qué aporta la impresión 3D a la industria aeroespacial?» https://filament2print.com/es/blog/152_que-aporta-la-impresion-3d-a-la-industria-aer.html (accedido 7 de agosto de 2023).
- [11] impresoras3d, «Mini ofrece un servicio de personalización de sus coches con impresión 3D», 2018. <https://www.impresoras3d.com/mini-ofrece-servicio-personalizacion-coches-impresion-3d/> (accedido 7 de agosto de 2023).
- [12] Creatorium, «Moda textil e Impresión 3D», 2021. <https://creatorium3d.com/la-influencia-de-impresion-3d-en-la-moda-textil/> (accedido 7 de agosto de 2023).
- [13] Mycusini, «Impresora de chocolate 3D mycusini: tecnología profesional para el hogar». <https://mycusini.com/es/> (accedido 7 de agosto de 2023).
- [14] Inarquia, «Construir con Impresoras 3D, ¿el futuro de la Arquitectura?» <https://inarquia.es/construir-impresoras-futuro-arquitectura/> (accedido 7 de agosto de 2023).

- [15] 3Dnatives, «ideaMaker, el slicer gratuito de Raise3D», 2022. <https://www.3dnatives.com/es/ideamaker-slicer-gratuito-raise3d-040720222/#!> (accedido 8 de agosto de 2023).
- [16] E. Mondragón, «La industria de la impresión 3D, un sector en crecimiento», 2021. <https://www.bbva.ch/noticia/la-industria-de-la-impresion-3d-un-sector-en-crecimiento/> (accedido 8 de agosto de 2023).
- [17] Formlabs, «Técnicas avanzadas de eliminación de soportes». <https://support.formlabs.com/s/article/Advanced-Support-Removal-Techniques?language=es> (accedido 8 de agosto de 2023).
- [18] Amazon, «Impresora Voxelab Aquila D1». <https://www.amazon.es/Voxelab-Superficie-construcci%C3%B3n-reanudaci%C3%B3n-filamentos/dp/B0BSTWP6FV?th=1> (accedido 8 de agosto de 2023).
- [19] Top10, «Las cinco impresoras 3D más caras del mercado actual», 2021. <https://salaguamotors.com/top-10/las-cinco-impresoras-3d-mas-caras-del-mercado-actual/> (accedido 8 de agosto de 2023).
- [20] Bitfab, «Las partes de una impresora 3D ¿Qué componentes elegir?». <https://bitfab.io/es/blog/partes-impresora-3d/> (accedido 9 de agosto de 2023).
- [21] Formlabs, «Guía de materiales de impresión 3D: Tipos, aplicaciones y propiedades». <https://formlabs.com/es/blog/materiales-impresion-3d/> (accedido 9 de agosto de 2023).
- [22] Captis, «Boquilla MK8 para impresora 3D». <https://impresionescaptis.com/products/boquilla-mk8-para-impresora-3d> (accedido 9 de agosto de 2023).
- [23] Filament2print, «La importancia del tipo de relleno en impresión 3D», 2019. https://filament2print.com/es/blog/71_importancia-relleno-impresion-3d.html (accedido 9 de agosto de 2023).
- [24] BCN3D, «Entendiendo el relleno». <https://support.bcn3d.com/es/knowledge/infill> (accedido 9 de agosto de 2023).
- [25] L. Sevilla Hurtado y M. J. Martín Sánchez, *Metrología dimensional*. UMA Editorial, 2020.
- [26] Metronic, «Marform - Máquina de medición de formas». <https://www.metronicnet.com/marform-metrologia/> (accedido 11 de agosto de 2023).
- [27] Mitutoyo, «Rugosímetro Portátil SurfTest SJ-210 - 178-561-02A». <https://mitutoyo.com.ar/surftest-sj-210-serie-178-rugosimetro-portatil-178-561-02> (accedido 11 de agosto de 2023).
- [28] Escuela Colombiana de Ingeniería, «FATIGA PROTOCOLO Curso de Materiales», 2011.
- [29] D. Balladares, J. Medina, J. Moreno, G. Cajas, y F. Paredes, «Fatiga del material», 2013. <https://es.slideshare.net/josemedinabarro/fatiga-del-material> (accedido 11 de agosto de 2023).
- [30] Organización Internacional de Estandarización, «UNE-EN ISO 1143:2021», 2021



- [31] Organización Internacional de Estandarización, «UNE-EN ISO 12107:2012», 2012
- [32] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, y P. J. Núñez, «Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection», *Mater Des*, vol. 124, pp. 143-157, jun. 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.03.065.
- [33] G. Gomez-Gras, R. Jerez-Mesa, J. A. Travieso-Rodriguez, y J. Lluma-Fuentes, «Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens», *Mater Des*, vol. 140, pp. 278-285, feb. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2017.11.072.
- [34] Fillamentum, «PLA Extrafill “Vertigo Jade”». <https://shop.fillamentum.com/products/pla-extrafill-vertigo-jade> (accedido 14 de agosto de 2023).
- [35] Raise3D, «Dual Extruder 3D Printer - Raise3D Pro2». <https://www.raise3d.com/products/pro2-3d-printer/> (accedido 18 de agosto de 2023).



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA
DEL NÚMERO DE CARCASAS Y SU ESPESOR EN EL
COMPORTAMIENTO A FATIGA DE PROBETAS DE PLA
IMPRESAS MEDIANTE FDM





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA
DEL NÚMERO DE CARCASAS Y SU ESPESOR EN EL
COMPORTAMIENTO A FATIGA DE PROBETAS DE PLA
IMPRESAS MEDIANTE FDM



ANEXO I: HOJAS DE DATOS

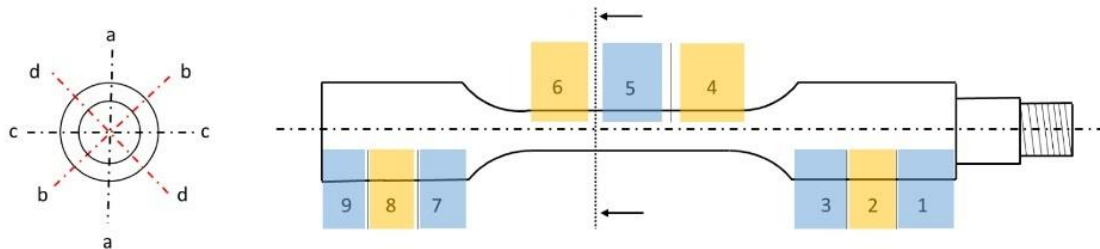
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_CO |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 1 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 0 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.212 | 15.275 | 15.245 | 9.267 | 9.296 | 9.297 | 15.287 | 15.276 | 15.296 |
| B | 15.249 | 15.234 | 15.223 | 9.282 | 9.276 | 9.255 | 15.166 | 15.173 | 15.163 |
| C | 15.293 | 15.287 | 15.259 | 9.371 | 9.396 | 9.382 | 15.244 | 15.232 | 15.211 |
| D | 15.232 | 15.212 | 15.253 | 9.259 | 9.263 | 9.278 | 15.184 | 15.191 | 15.130 |
| Media | 15.247 | 15.252 | 15.245 | 9.295 | 9.308 | 9.303 | 15.220 | 15.218 | 15.200 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.622 |
| Ciclos | 41237 | Tiempo rotura (min) | 22.91 |
| L-x rotura (mm) | 66.32 | Tipo de rotura | Completa |

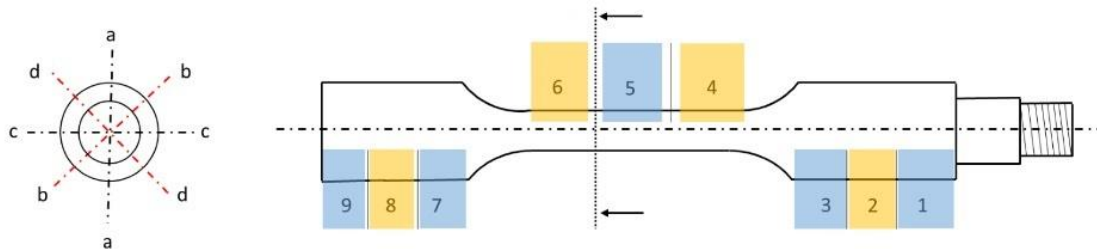
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_CO |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 2 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 0 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.271 | 15.281 | 15.268 | 9.342 | 9.368 | 9.328 | 15.322 | 15.361 | 15.302 |
| B | 15.231 | 15.248 | 15.244 | 9.312 | 9.316 | 9.304 | 15.194 | 15.179 | 15.189 |
| C | 15.201 | 15.195 | 15.191 | 9.281 | 9.286 | 9.279 | 15.179 | 15.183 | 15.157 |
| D | 15.235 | 15.247 | 15.258 | 9.367 | 9.368 | 9.357 | 15.297 | 15.294 | 15.292 |
| Media | 15.235 | 15.243 | 15.240 | 9.326 | 9.335 | 9.317 | 15.248 | 15.254 | 15.235 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 14.063 |
| Ciclos | 39312 | Tiempo rotura (min) | 21.84 |
| L-x rotura (mm) | 68.47 | Tipo de rotura | Completa |

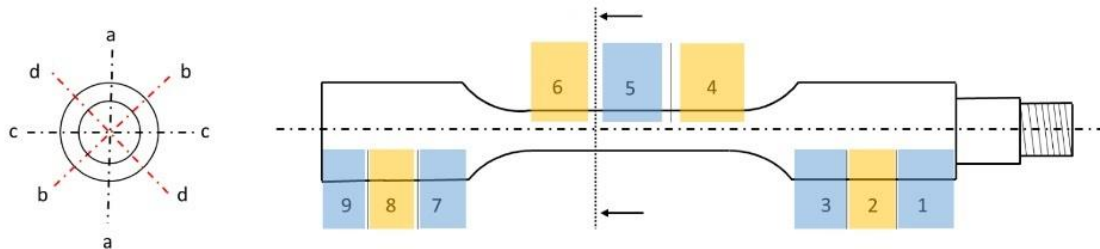
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_CO |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 3 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 0 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.267 | 15.258 | 15.256 | 9.367 | 9.373 | 9.369 | 15.276 | 15.255 | 15.246 |
| B | 15.297 | 15.283 | 15.291 | 9.242 | 9.244 | 9.249 | 15.273 | 15.251 | 15.243 |
| C | 15.168 | 15.141 | 15.176 | 9.321 | 9.319 | 9.306 | 15.219 | 15.226 | 15.248 |
| D | 15.316 | 15.305 | 15.324 | 9.326 | 9.329 | 9.328 | 15.325 | 15.331 | 15.329 |
| Media | 15.262 | 15.247 | 15.262 | 9.314 | 9.316 | 9.313 | 15.273 | 15.266 | 15.267 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.790 |
| Ciclos | 36171 | Tiempo rotura (min) | 20.10 |
| L-x rotura (mm) | 67.14 | Tipo de rotura | Completa |

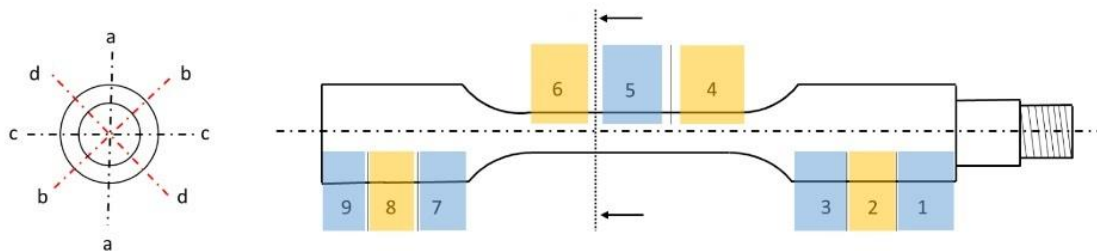
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_CO |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 4 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 0 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.297 | 15.301 | 15.292 | 9.304 | 9.299 | 9.309 | 15.290 | 15.277 | 15.283 |
| B | 15.238 | 15.252 | 15.242 | 9.239 | 9.237 | 9.224 | 15.259 | 15.251 | 15.267 |
| C | 15.189 | 15.199 | 15.196 | 9.295 | 9.308 | 9.302 | 15.206 | 15.198 | 15.192 |
| D | 15.194 | 15.184 | 15.195 | 9.334 | 9.327 | 9.337 | 15.323 | 15.301 | 15.312 |
| Media | 15.230 | 15.234 | 15.231 | 9.293 | 9.293 | 9.293 | 15.270 | 15.257 | 15.264 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|-------------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.932 |
| Ciclos | 46486 | Tiempo rotura (min) | 25.83 |
| L-x rotura (mm) | 67.83 | Tipo de rotura | No completa |

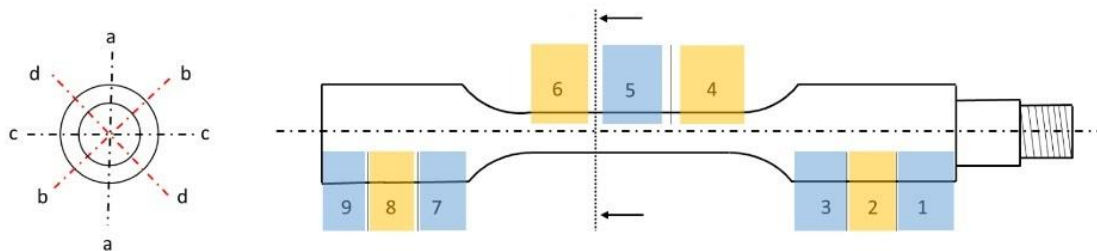
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_CO |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 5 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 0 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.219 | 15.223 | 15.211 | 9.301 | 9.300 | 9.296 | 15.248 | 15.235 | 15.228 |
| B | 15.289 | 15.298 | 15.273 | 9.283 | 9.286 | 9.274 | 15.179 | 15.199 | 15.184 |
| C | 15.169 | 15.178 | 15.198 | 9.312 | 9.309 | 9.298 | 15.139 | 15.121 | 15.114 |
| D | 15.340 | 15.329 | 15.336 | 9.251 | 9.231 | 9.275 | 15.265 | 15.278 | 15.251 |
| Media | 15.254 | 15.257 | 15.255 | 9.287 | 9.282 | 9.286 | 15.208 | 15.208 | 15.194 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.825 |
| Ciclos | 32206 | Tiempo rotura (min) | 17.89 |
| L-x rotura (mm) | 67.31 | Tipo de rotura | Completa |

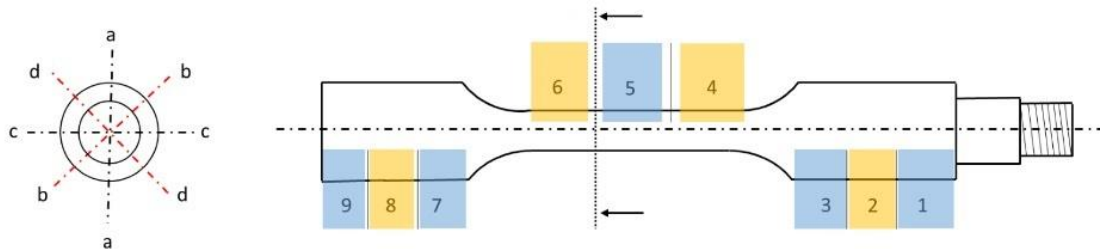
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C1 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 1 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 1 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.986 | 15.063 | 15.024 | 9.040 | 9.042 | 9.105 | 15.071 | 15.062 | 15.052 |
| B | 14.941 | 14.930 | 14.980 | 9.098 | 9.096 | 9.083 | 14.999 | 14.889 | 14.898 |
| C | 14.958 | 14.970 | 14.995 | 8.979 | 8.997 | 9.001 | 15.055 | 15.081 | 15.061 |
| D | 14.873 | 14.874 | 14.855 | 9.088 | 9.035 | 9.056 | 14.984 | 14.889 | 14.844 |
| Media | 14.940 | 14.959 | 14.964 | 9.051 | 9.043 | 9.061 | 15.027 | 14.980 | 14.964 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.809 |
| Ciclos | 82938 | Tiempo rotura (min) | 46.08 |
| L-x rotura (mm) | 67.23 | Tipo de rotura | Completa |

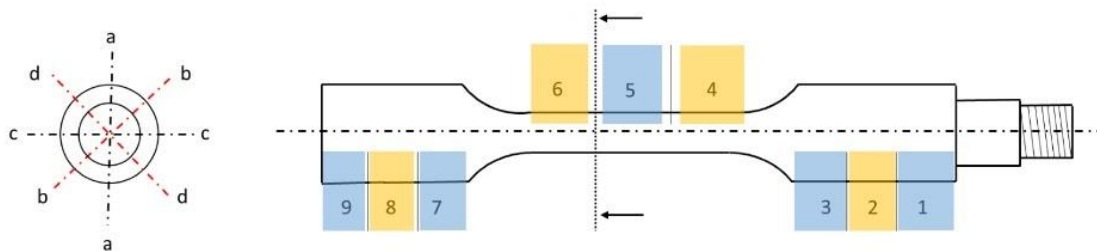
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C1 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 2 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 1 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.080 | 15.098 | 15.039 | 9.052 | 9.061 | 9.037 | 14.993 | 15.013 | 14.917 |
| B | 15.038 | 15.021 | 15.045 | 9.096 | 9.088 | 9.095 | 15.070 | 15.097 | 15.086 |
| C | 15.054 | 15.083 | 15.071 | 8.994 | 8.991 | 8.988 | 15.076 | 15.035 | 15.038 |
| D | 14.904 | 14.845 | 14.843 | 9.018 | 9.005 | 8.994 | 14.915 | 14.886 | 14.841 |
| Media | 15.019 | 15.012 | 15.000 | 9.040 | 9.036 | 9.029 | 15.014 | 15.008 | 14.971 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.876 |
| Ciclos | 107910 | Tiempo rotura (min) | 59.95 |
| L-x rotura (mm) | 67.56 | Tipo de rotura | Completa |

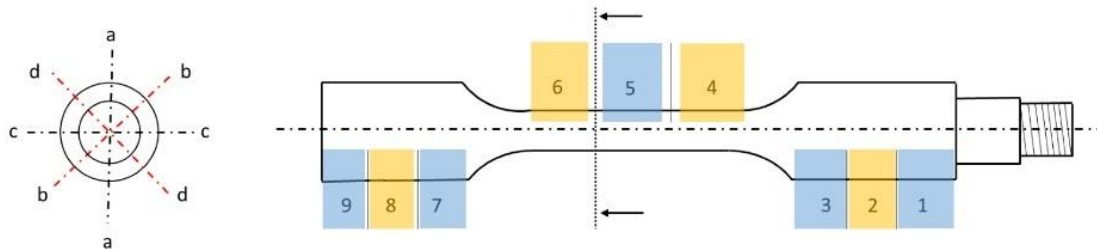
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C1 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 3 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 1 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.080 | 15.063 | 15.051 | 9.095 | 9.087 | 9.067 | 14.901 | 14.872 | 14.922 |
| B | 14.996 | 14.984 | 14.971 | 9.037 | 8.990 | 8.987 | 14.959 | 14.962 | 14.985 |
| C | 14.971 | 14.997 | 14.974 | 9.024 | 9.048 | 9.028 | 14.986 | 14.975 | 14.983 |
| D | 14.952 | 14.991 | 14.995 | 9.043 | 9.005 | 9.080 | 15.004 | 14.977 | 14.944 |
| Media | 15.000 | 15.009 | 14.998 | 9.050 | 9.033 | 9.041 | 14.963 | 14.947 | 14.959 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.858 |
| Ciclos | 137606 | Tiempo rotura (min) | 76.45 |
| L-x rotura (mm) | 67.47 | Tipo de rotura | Completa |

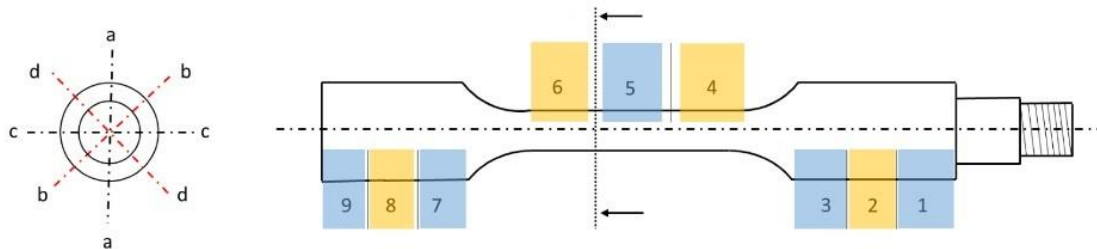
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C1 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 4 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 1 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.951 | 14.927 | 14.988 | 9.054 | 9.043 | 9.002 | 14.969 | 14.946 | 14.989 |
| B | 15.006 | 14.998 | 15.009 | 9.012 | 9.074 | 9.013 | 14.991 | 14.998 | 14.999 |
| C | 14.978 | 15.008 | 15.004 | 9.067 | 9.078 | 9.096 | 14.973 | 15.004 | 15.036 |
| D | 14.974 | 14.972 | 15.006 | 9.089 | 9.066 | 9.077 | 14.985 | 14.979 | 14.998 |
| Media | 14.977 | 14.976 | 15.002 | 9.056 | 9.065 | 9.047 | 14.980 | 14.982 | 15.006 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.911 |
| Ciclos | 147957 | Tiempo rotura (min) | 82.20 |
| L-x rotura (mm) | 67.73 | Tipo de rotura | Completa |

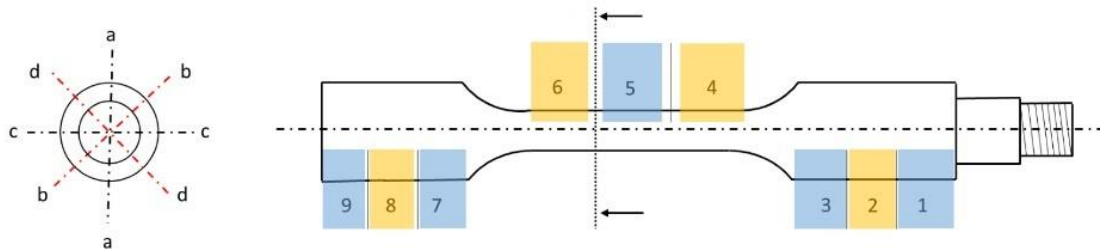
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C1 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 5 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 1 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.966 | 14.932 | 14.957 | 9.062 | 9.072 | 8.999 | 14.889 | 14.920 | 14.925 |
| B | 15.008 | 14.983 | 14.999 | 9.020 | 9.009 | 9.054 | 14.981 | 14.962 | 14.967 |
| C | 15.029 | 15.016 | 15.010 | 9.064 | 9.079 | 9.090 | 15.047 | 15.014 | 15.007 |
| D | 15.013 | 15.083 | 15.041 | 9.093 | 9.060 | 9.075 | 15.092 | 15.053 | 15.025 |
| Media | 15.004 | 15.004 | 15.002 | 9.060 | 9.055 | 9.055 | 15.002 | 14.987 | 14.981 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.889 |
| Ciclos | 111935 | Tiempo rotura (min) | 62.19 |
| L-x rotura (mm) | 67.62 | Tipo de rotura | Completa |

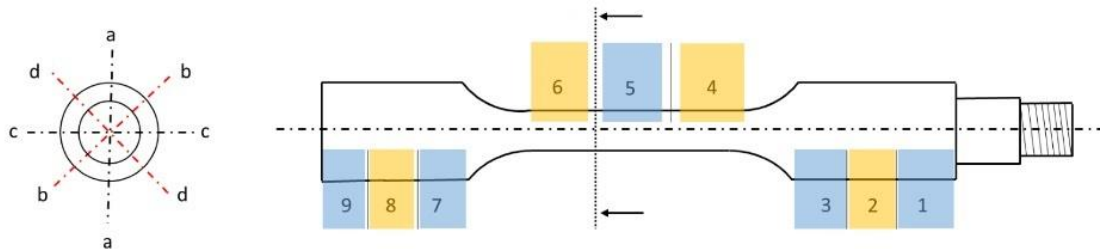
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C2 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 1 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 2 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.914 | 14.959 | 14.954 | 9.006 | 9.024 | 9.021 | 14.916 | 14.915 | 14.906 |
| B | 14.986 | 14.948 | 14.949 | 8.946 | 8.958 | 8.936 | 14.934 | 14.982 | 14.989 |
| C | 14.873 | 14.631 | 14.637 | 8.864 | 8.823 | 8.822 | 14.861 | 14.801 | 14.800 |
| D | 14.900 | 14.655 | 14.690 | 8.844 | 8.829 | 8.837 | 14.953 | 14.823 | 14.836 |
| Media | 14.918 | 14.798 | 14.808 | 8.915 | 8.909 | 8.904 | 14.916 | 14.880 | 14.883 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.895 |
| Ciclos | 131638 | Tiempo rotura (min) | 73.13 |
| L-x rotura (mm) | 67.65 | Tipo de rotura | Completa |

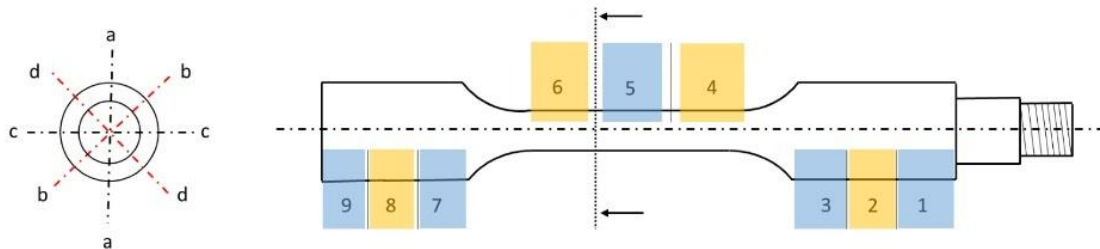
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C2 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 2 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcacas | 2 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.941 | 15.020 | 15.075 | 9.008 | 9.028 | 9.059 | 14.998 | 15.010 | 15.047 |
| B | 14.921 | 14.929 | 14.926 | 8.951 | 8.966 | 8.987 | 15.085 | 15.069 | 15.093 |
| C | 14.964 | 14.975 | 14.897 | 9.016 | 8.992 | 9.003 | 15.019 | 14.981 | 14.965 |
| D | 14.905 | 14.829 | 14.687 | 8.971 | 8.898 | 8.914 | 14.961 | 14.950 | 14.823 |
| Media | 14.933 | 14.938 | 14.896 | 8.987 | 8.971 | 8.991 | 15.016 | 15.003 | 14.982 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.911 |
| Ciclos | 86105 | Tiempo rotura (min) | 47.84 |
| L-x rotura (mm) | 67.73 | Tipo de rotura | Completa |

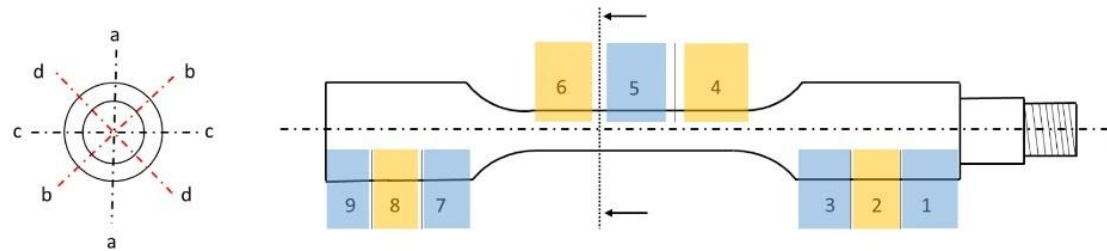
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C2 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 3 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 2 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.917 | 14.963 | 14.966 | 8.879 | 8.866 | 8.861 | 14.979 | 14.981 | 14.941 |
| B | 14.920 | 14.919 | 14.906 | 8.940 | 8.945 | 8.952 | 14.912 | 14.895 | 14.972 |
| C | 14.963 | 14.932 | 14.758 | 9.089 | 8.991 | 9.064 | 14.949 | 14.975 | 14.943 |
| D | 15.016 | 14.837 | 14.641 | 8.816 | 8.818 | 8.831 | 14.892 | 14.825 | 14.713 |
| Media | 14.954 | 14.913 | 14.818 | 8.931 | 8.905 | 8.927 | 14.933 | 14.919 | 14.892 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.952 |
| Ciclos | 175360 | Tiempo rotura (min) | 97.42 |
| L-x rotura (mm) | 67.93 | Tipo de rotura | Completa |

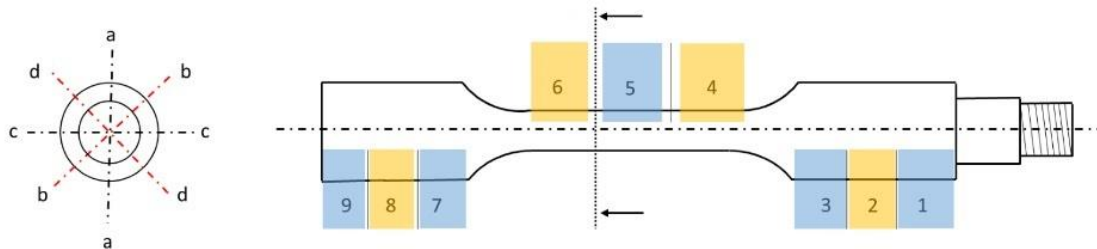
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C2 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 4 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 2 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.861 | 14.934 | 14.962 | 9.011 | 9.009 | 9.004 | 14.872 | 14.867 | 14.847 |
| B | 14.889 | 14.911 | 14.912 | 8.943 | 8.948 | 8.983 | 14.882 | 14.878 | 14.869 |
| C | 14.835 | 14.751 | 14.613 | 8.888 | 8.934 | 8.923 | 14.935 | 14.935 | 14.945 |
| D | 14.901 | 14.907 | 14.692 | 8.889 | 8.932 | 8.988 | 14.892 | 14.976 | 14.898 |
| Media | 14.872 | 14.876 | 14.795 | 8.933 | 8.956 | 8.975 | 14.895 | 14.914 | 14.890 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.905 |
| Ciclos | 109213 | Tiempo rotura (min) | 60.67 |
| L-x rotura (mm) | 67.70 | Tipo de rotura | Completa |

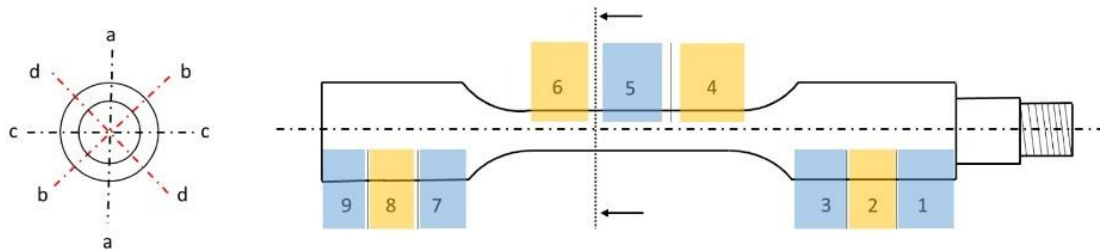
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C2 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 5 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 2 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.950 | 14.967 | 15.027 | 9.006 | 9.016 | 9.018 | 14.951 | 14.891 | 14.875 |
| B | 14.891 | 14.951 | 14.888 | 8.93 | 8.975 | 8.962 | 14.894 | 14.982 | 14.892 |
| C | 14.904 | 14.866 | 14.727 | 8.928 | 8.971 | 9.005 | 15.07 | 15.074 | 15.036 |
| D | 14.947 | 14.892 | 14.809 | 8.921 | 8.833 | 8.935 | 14.994 | 14.957 | 14.919 |
| Media | 14.923 | 14.919 | 14.863 | 8.946 | 8.949 | 8.980 | 14.977 | 14.976 | 14.931 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.909 |
| Ciclos | 122275 | Tiempo rotura (min) | 67.93 |
| L-x rotura (mm) | 67.72 | Tipo de rotura | Completa |

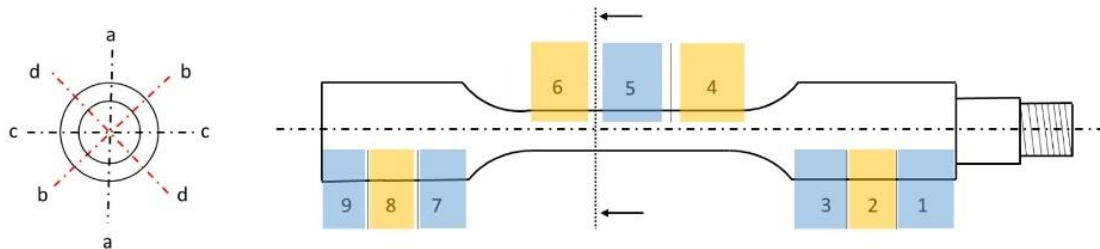
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C3 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 1 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 3 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.841 | 14.938 | 14.998 | 9.069 | 9.059 | 9.052 | 14.846 | 14.834 | 14.771 |
| B | 14.881 | 14.896 | 14.896 | 8.944 | 8.943 | 8.953 | 14.892 | 14.893 | 14.892 |
| C | 14.907 | 14.915 | 14.879 | 8.969 | 8.983 | 8.965 | 14.984 | 14.966 | 14.985 |
| D | 15.019 | 14.997 | 14.853 | 9.076 | 9.045 | 9.067 | 14.961 | 14.975 | 14.917 |
| Media | 14.912 | 14.937 | 14.907 | 9.015 | 9.008 | 9.009 | 14.921 | 14.917 | 14.891 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.864 |
| Ciclos | 146956 | Tiempo rotura (min) | 81.64 |
| L-x rotura (mm) | 67.50 | Tipo de rotura | Completa |

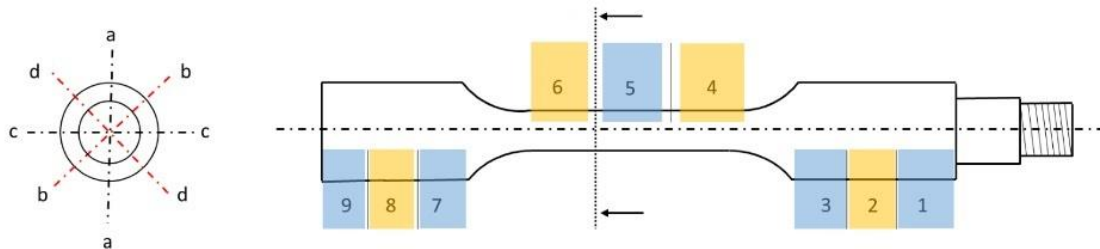
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C3 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 2 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 3 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.892 | 14.957 | 14.993 | 9.015 | 9.018 | 9.027 | 14.899 | 14.892 | 14.852 |
| B | 14.913 | 14.922 | 14.905 | 8.945 | 8.952 | 8.949 | 15.077 | 14.974 | 15.022 |
| C | 14.895 | 14.919 | 14.901 | 8.956 | 8.998 | 8.994 | 15.051 | 15.028 | 15.013 |
| D | 14.977 | 14.888 | 14.857 | 8.898 | 8.908 | 8.973 | 14.986 | 14.921 | 14.771 |
| Media | 14.919 | 14.922 | 14.914 | 8.954 | 8.969 | 8.986 | 15.003 | 14.954 | 14.915 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 14.205 |
| Ciclos | 163379 | Tiempo rotura (min) | 90.77 |
| L-x rotura (mm) | 69.16 | Tipo de rotura | Completa |

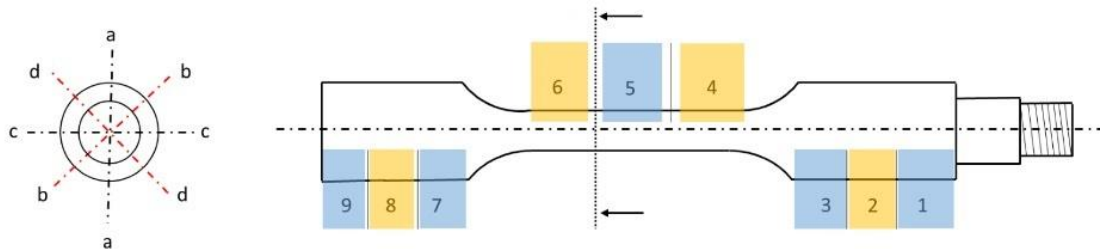
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C3 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 3 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 3 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.931 | 14.973 | 14.975 | 9.033 | 9.036 | 9.036 | 14.961 | 14.946 | 14.895 |
| B | 14.873 | 14.875 | 14.912 | 9.044 | 9.059 | 9.086 | 14.887 | 14.999 | 15.002 |
| C | 14.874 | 14.884 | 14.972 | 8.941 | 8.913 | 8.946 | 14.895 | 14.971 | 14.893 |
| D | 14.997 | 15.084 | 14.901 | 8.862 | 8.887 | 8.832 | 15.093 | 14.997 | 14.928 |
| Media | 14.919 | 14.954 | 14.940 | 8.970 | 8.974 | 8.975 | 14.959 | 14.978 | 14.930 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.883 |
| Ciclos | 143520 | Tiempo rotura (min) | 79.73 |
| L-x rotura (mm) | 67.59 | Tipo de rotura | Completa |

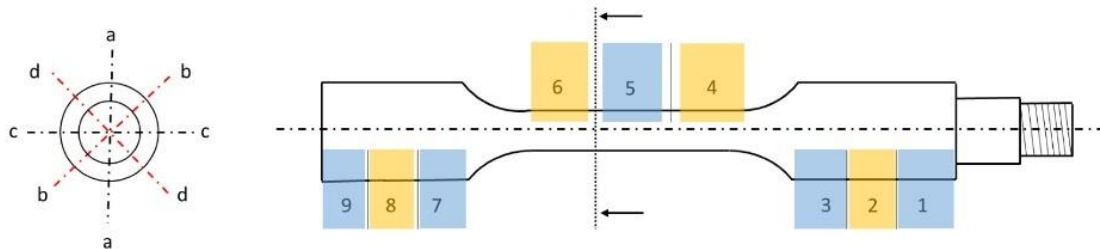
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C3 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 4 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 3 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.974 | 14.982 | 14.988 | 9.003 | 8.997 | 9.000 | 14.886 | 14.860 | 14.816 |
| B | 14.931 | 14.934 | 14.985 | 8.979 | 8.966 | 8.944 | 15.009 | 14.994 | 14.965 |
| C | 14.933 | 14.985 | 14.912 | 8.973 | 8.920 | 8.924 | 14.935 | 14.895 | 14.925 |
| D | 14.858 | 14.875 | 14.842 | 8.964 | 8.817 | 8.818 | 14.975 | 14.886 | 14.804 |
| Media | 14.924 | 14.944 | 14.932 | 8.980 | 8.925 | 8.922 | 14.951 | 14.909 | 14.878 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.784 |
| Ciclos | 207871 | Tiempo rotura (min) | 115.48 |
| L-x rotura (mm) | 67.11 | Tipo de rotura | Completa |

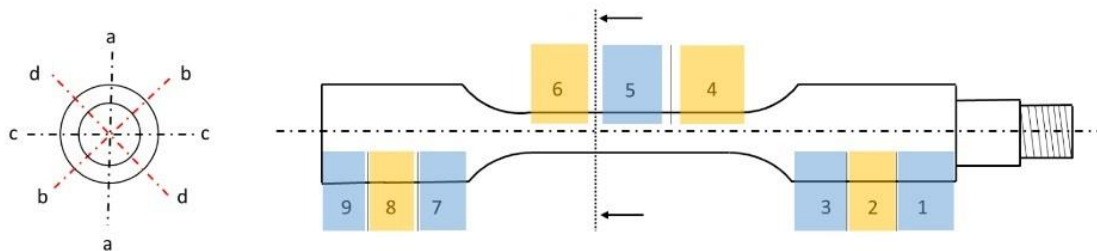
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.2_C3 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 5 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.2 | |
| Nº carcasas | 3 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.922 | 14.936 | 14.972 | 8.996 | 8.977 | 8.975 | 14.942 | 14.893 | 14.868 |
| B | 14.919 | 14.944 | 14.948 | 8.949 | 8.964 | 8.959 | 14.858 | 14.845 | 14.837 |
| C | 14.884 | 14.843 | 14.716 | 8.917 | 8.942 | 8.888 | 14.952 | 14.869 | 14.864 |
| D | 14.859 | 14.821 | 14.792 | 8.906 | 8.853 | 8.857 | 14.844 | 14.817 | 14.704 |
| Media | 14.896 | 14.886 | 14.857 | 8.942 | 8.934 | 8.920 | 14.899 | 14.856 | 14.818 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.388 |
| Ciclos | 264695 | Tiempo rotura (min) | 147.05 |
| L-x rotura (mm) | 65.18 | Tipo de rotura | Completa |

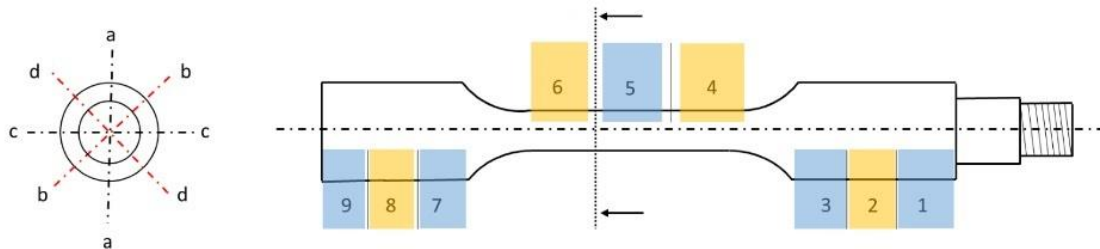
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_CO |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 1 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 0 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.214 | 15.234 | 15.229 | 9.297 | 9.261 | 9.268 | 15.268 | 15.228 | 15.151 |
| B | 15.231 | 15.204 | 15.241 | 9.142 | 9.136 | 9.137 | 15.178 | 15.189 | 15.198 |
| C | 15.276 | 15.279 | 15.226 | 9.275 | 9.258 | 9.271 | 15.297 | 15.299 | 15.264 |
| D | 15.199 | 15.177 | 15.183 | 9.262 | 9.229 | 9.195 | 15.137 | 15.208 | 15.169 |
| Media | 15.230 | 15.224 | 15.220 | 9.244 | 9.221 | 9.218 | 15.220 | 15.231 | 15.196 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.749 |
| Ciclos | 16632 | Tiempo rotura (min) | 9.24 |
| L-x rotura (mm) | 66.94 | Tipo de rotura | Completa |

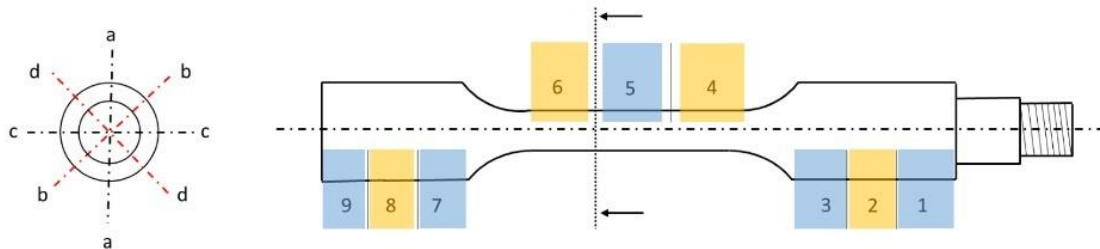
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_CO |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 2 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 0 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.218 | 15.246 | 15.226 | 9.326 | 9.325 | 9.333 | 15.233 | 15.218 | 15.187 |
| B | 15.185 | 15.147 | 15.175 | 9.203 | 9.191 | 9.218 | 15.175 | 15.177 | 15.165 |
| C | 15.242 | 15.232 | 15.197 | 9.294 | 9.291 | 9.292 | 15.241 | 15.255 | 15.222 |
| D | 15.224 | 15.246 | 15.280 | 9.296 | 9.295 | 9.308 | 15.216 | 15.290 | 15.171 |
| Media | 15.217 | 15.218 | 15.220 | 9.280 | 9.276 | 9.288 | 15.216 | 15.235 | 15.186 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.694 |
| Ciclos | 28016 | Tiempo rotura (min) | 15.56 |
| L-x rotura (mm) | 66.67 | Tipo de rotura | Completa |

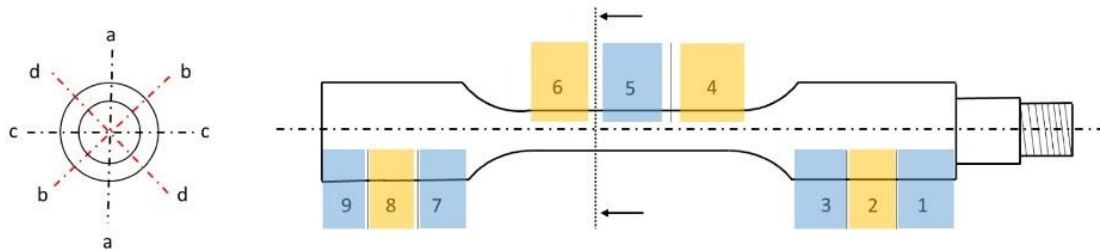
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_CO |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 3 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 0 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.251 | 15.295 | 15.271 | 9.258 | 9.288 | 9.264 | 15.223 | 15.182 | 15.151 |
| B | 15.201 | 15.226 | 15.219 | 9.156 | 9.186 | 9.142 | 15.238 | 15.275 | 15.275 |
| C | 15.183 | 15.213 | 15.183 | 9.251 | 9.274 | 9.235 | 15.202 | 15.239 | 15.283 |
| D | 15.256 | 15.277 | 15.225 | 9.244 | 9.245 | 9.255 | 15.115 | 15.104 | 15.142 |
| Media | 15.223 | 15.253 | 15.225 | 9.227 | 9.248 | 9.224 | 15.195 | 15.200 | 15.213 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.714 |
| Ciclos | 23977 | Tiempo rotura (min) | 13.32 |
| L-x rotura (mm) | 66.77 | Tipo de rotura | Completa |

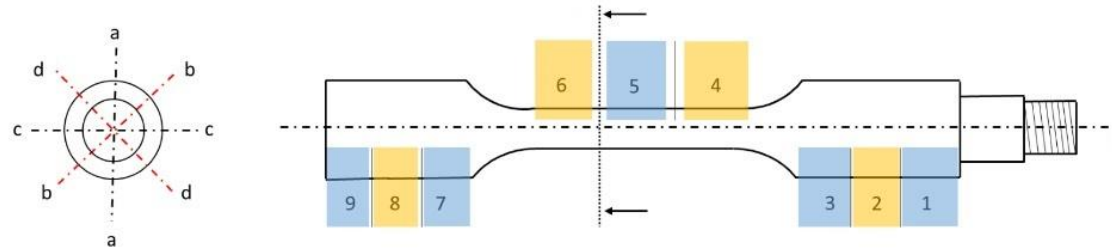
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_CO |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 4 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 0 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.285 | 15.272 | 15.279 | 9.302 | 9.296 | 9.281 | 15.198 | 15.195 | 15.196 |
| B | 15.175 | 15.203 | 15.191 | 9.147 | 9.145 | 9.160 | 15.139 | 15.142 | 15.126 |
| C | 15.156 | 15.166 | 15.181 | 9.291 | 9.299 | 9.301 | 15.078 | 15.092 | 15.080 |
| D | 15.245 | 15.282 | 15.237 | 9.288 | 9.266 | 9.274 | 15.165 | 15.157 | 15.134 |
| Media | 15.215 | 15.231 | 15.222 | 9.257 | 9.252 | 9.254 | 15.145 | 15.147 | 15.134 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.673 |
| Ciclos | 30405 | Tiempo rotura (min) | 16.89 |
| L-x rotura (mm) | 66.57 | Tipo de rotura | Completa |

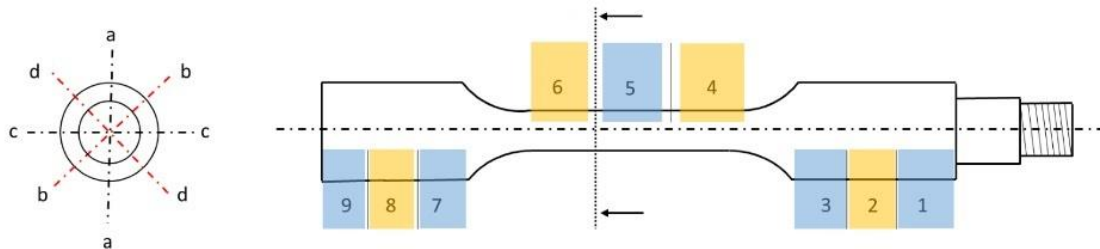
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B1_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_CO |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 5 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 0 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.239 | 15.262 | 15.239 | 9.274 | 9.263 | 9.282 | 15.241 | 15.189 | 15.134 |
| B | 15.188 | 15.210 | 15.196 | 9.212 | 9.165 | 9.181 | 15.134 | 15.141 | 15.126 |
| C | 15.231 | 15.285 | 15.217 | 9.326 | 9.347 | 9.284 | 15.182 | 15.213 | 15.179 |
| D | 15.243 | 15.236 | 15.266 | 9.307 | 9.335 | 9.318 | 15.176 | 15.195 | 15.203 |
| Media | 15.225 | 15.248 | 15.230 | 9.280 | 9.278 | 9.266 | 15.183 | 15.185 | 15.161 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 14.090 |
| Ciclos | 25800 | Tiempo rotura (min) | 14.33 |
| L-x rotura (mm) | 68.60 | Tipo de rotura | Completa |

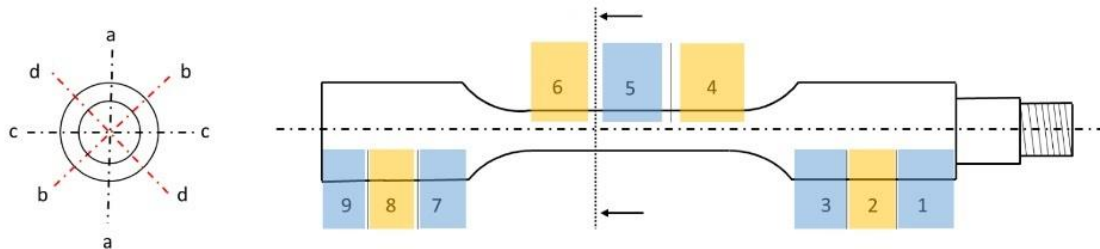
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C1 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 1 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 1 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.021 | 15.113 | 15.068 | 9.096 | 9.125 | 9.106 | 15.029 | 15.026 | 14.969 |
| B | 15.010 | 15.047 | 15.035 | 9.031 | 9.073 | 9.055 | 14.998 | 15.006 | 14.959 |
| C | 14.984 | 14.991 | 14.992 | 9.011 | 9.008 | 8.998 | 14.982 | 15.016 | 15.001 |
| D | 14.981 | 14.975 | 14.927 | 9.063 | 9.043 | 9.066 | 15.095 | 15.071 | 14.921 |
| Media | 14.999 | 15.032 | 15.006 | 9.050 | 9.062 | 9.056 | 15.026 | 15.030 | 14.963 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.632 |
| Ciclos | 60846 | Tiempo rotura (min) | 33.80 |
| L-x rotura (mm) | 66.37 | Tipo de rotura | Completa |

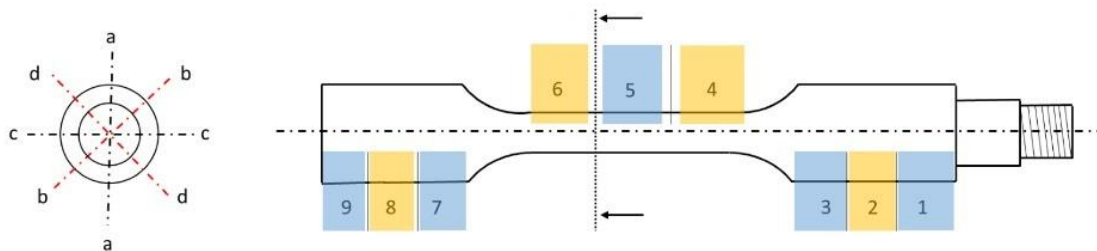
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C1 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 2 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 1 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.030 | 15.037 | 15.038 | 9.032 | 9.028 | 9.029 | 15.032 | 15.024 | 14.992 |
| B | 15.077 | 15.076 | 15.061 | 9.021 | 9.027 | 9.042 | 14.999 | 14.997 | 15.059 |
| C | 14.987 | 15.008 | 15.002 | 9.067 | 9.081 | 9.069 | 15.007 | 15.013 | 14.953 |
| D | 15.042 | 15.043 | 15.065 | 9.045 | 9.063 | 9.047 | 15.025 | 15.029 | 14.991 |
| Media | 15.034 | 15.041 | 15.042 | 9.041 | 9.050 | 9.047 | 15.016 | 15.016 | 14.999 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.301 |
| Ciclos | 76568 | Tiempo rotura (min) | 42.54 |
| L-x rotura (mm) | 64.76 | Tipo de rotura | Completa |

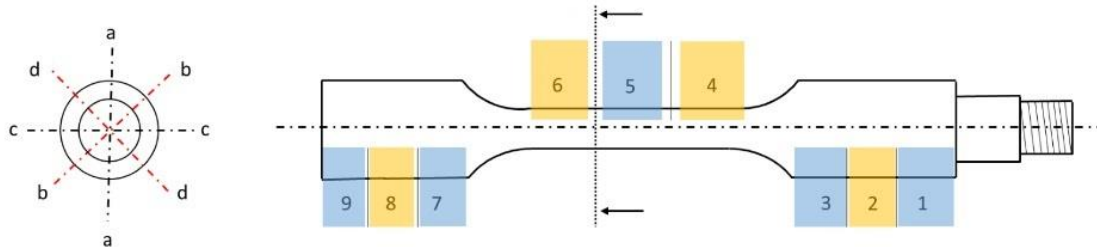
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C1 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 3 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 1 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.039 | 15.053 | 15.054 | 9.042 | 9.049 | 9.046 | 15.021 | 15.057 | 15.074 |
| B | 15.040 | 15.044 | 15.079 | 9.036 | 9.035 | 9.045 | 15.034 | 15.057 | 15.060 |
| C | 14.958 | 14.960 | 14.989 | 9.067 | 9.047 | 9.058 | 15.004 | 15.001 | 15.005 |
| D | 14.984 | 14.928 | 14.927 | 9.084 | 9.046 | 9.042 | 14.991 | 14.966 | 14.945 |
| Media | 15.005 | 14.996 | 15.012 | 9.057 | 9.044 | 9.048 | 15.013 | 15.020 | 15.021 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.724 |
| Ciclos | 92777 | Tiempo rotura (min) | 51.54 |
| L-x rotura (mm) | 66.82 | Tipo de rotura | Completa |

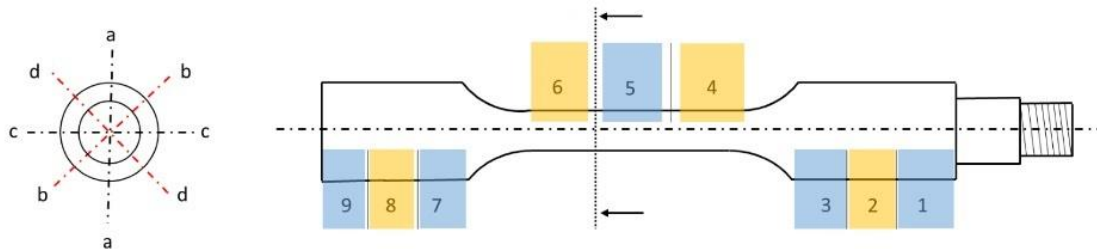
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C1 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 4 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 1 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.966 | 15.017 | 15.023 | 9.050 | 9.039 | 9.033 | 14.991 | 15.021 | 14.987 |
| B | 15.008 | 14.964 | 15.003 | 9.009 | 9.008 | 9.009 | 14.965 | 14.966 | 14.982 |
| C | 15.004 | 15.013 | 14.992 | 8.992 | 8.973 | 8.956 | 14.989 | 14.987 | 14.944 |
| D | 14.946 | 14.948 | 14.922 | 8.981 | 8.959 | 8.964 | 15.054 | 15.029 | 14.949 |
| Media | 14.981 | 14.986 | 14.985 | 9.008 | 8.995 | 8.991 | 15.000 | 15.001 | 14.966 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.727 |
| Ciclos | 122412 | Tiempo rotura (min) | 68.01 |
| L-x rotura (mm) | 66.83 | Tipo de rotura | Completa |

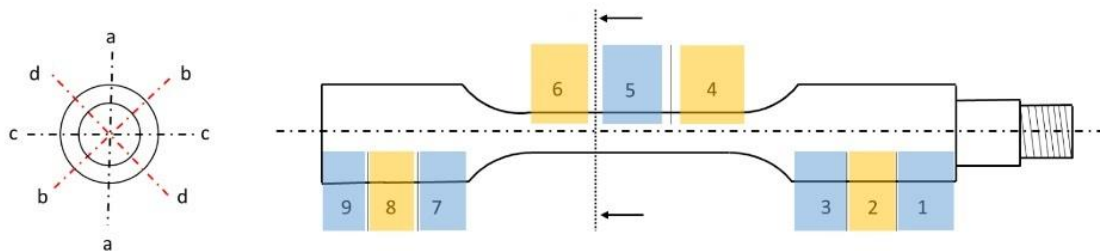
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C1 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 5 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 1 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.986 | 15.004 | 14.985 | 9.051 | 9.058 | 9.053 | 15.009 | 15.004 | 14.976 |
| B | 14.998 | 15.035 | 14.998 | 9.007 | 9.008 | 9.011 | 14.983 | 14.962 | 14.968 |
| C | 15.007 | 15.036 | 15.007 | 9.005 | 9.004 | 9.015 | 15.015 | 14.998 | 14.943 |
| D | 15.012 | 15.011 | 14.992 | 9.000 | 8.995 | 8.984 | 15.027 | 15.032 | 14.931 |
| Media | 15.001 | 15.022 | 14.996 | 9.016 | 9.016 | 9.016 | 15.009 | 14.999 | 14.955 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.903 |
| Ciclos | 90902 | Tiempo rotura (min) | 50.50 |
| L-x rotura (mm) | 67.69 | Tipo de rotura | Completa |

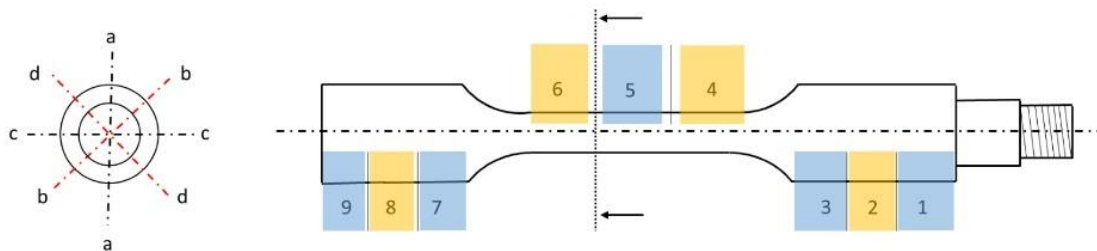
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C2 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 1 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 2 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.944 | 14.995 | 15.033 | 9.053 | 9.055 | 9.042 | 14.882 | 14.982 | 15.013 |
| B | 14.903 | 14.912 | 14.918 | 8.963 | 8.948 | 8.991 | 14.941 | 14.958 | 14.918 |
| C | 14.962 | 14.953 | 14.945 | 8.947 | 8.927 | 8.939 | 14.897 | 14.893 | 14.890 |
| D | 14.923 | 14.924 | 14.940 | 8.945 | 8.931 | 8.959 | 14.988 | 14.937 | 14.930 |
| Media | 14.933 | 14.946 | 14.959 | 8.977 | 8.965 | 8.983 | 14.927 | 14.943 | 14.938 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.987 |
| Ciclos | 108447 | Tiempo rotura (min) | 60.25 |
| L-x rotura (mm) | 68.10 | Tipo de rotura | Completa |

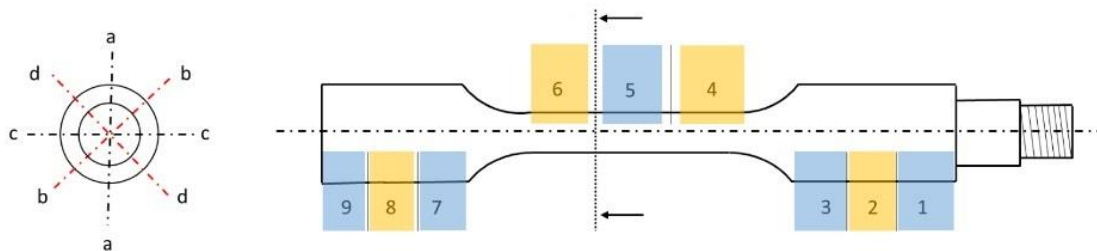
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C2 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 2 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 2 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.895 | 14.971 | 14.976 | 9.011 | 9.001 | 9.007 | 14.941 | 14.975 | 14.953 |
| B | 14.900 | 14.923 | 14.915 | 8.957 | 8.975 | 8.973 | 14.921 | 14.939 | 14.914 |
| C | 14.916 | 14.928 | 14.928 | 9.002 | 8.999 | 8.996 | 14.912 | 14.937 | 14.915 |
| D | 14.937 | 14.958 | 14.943 | 8.973 | 8.945 | 8.962 | 14.937 | 14.946 | 14.907 |
| Media | 14.912 | 14.945 | 14.941 | 8.986 | 8.980 | 8.985 | 14.928 | 14.949 | 14.922 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.961 |
| Ciclos | 66151 | Tiempo rotura (min) | 36.75 |
| L-x rotura (mm) | 67.97 | Tipo de rotura | Completa |

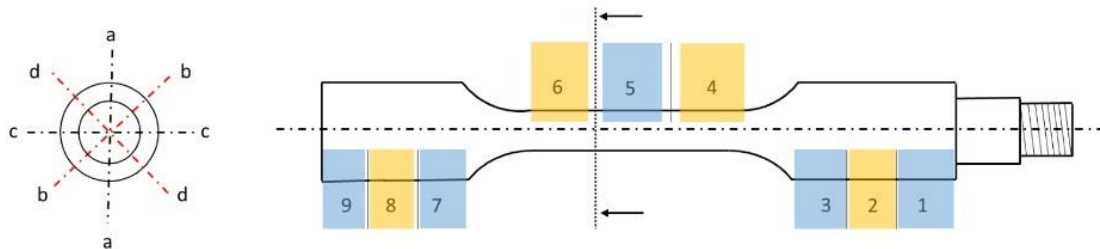
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C2 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 3 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 2 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.029 | 14.943 | 14.931 | 8.964 | 8.962 | 8.961 | 14.951 | 14.953 | 14.936 |
| B | 14.899 | 14.909 | 14.902 | 8.935 | 8.956 | 8.956 | 14.901 | 14.912 | 14.900 |
| C | 14.925 | 14.937 | 14.935 | 9.003 | 8.995 | 8.947 | 14.908 | 14.909 | 14.901 |
| D | 14.977 | 14.979 | 14.978 | 8.926 | 8.929 | 8.939 | 14.954 | 14.953 | 14.931 |
| Media | 14.958 | 14.942 | 14.937 | 8.957 | 8.961 | 8.951 | 14.929 | 14.932 | 14.917 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 14.002 |
| Ciclos | 158347 | Tiempo rotura (min) | 87.97 |
| L-x rotura (mm) | 68.17 | Tipo de rotura | Completa |

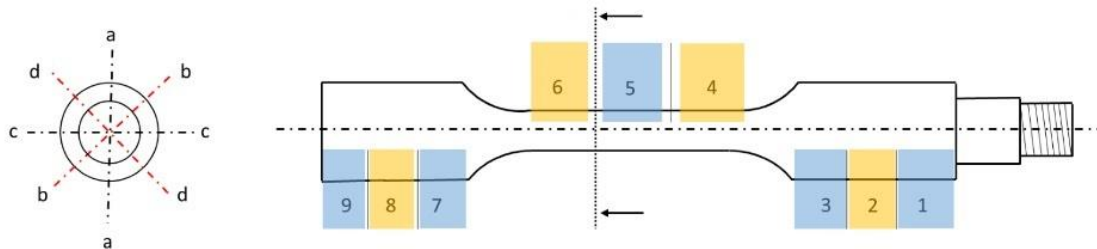
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C2 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 4 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 2 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.952 | 14.951 | 14.969 | 8.948 | 8.971 | 8.957 | 14.959 | 14.963 | 14.936 |
| B | 14.953 | 14.959 | 14.975 | 8.958 | 8.962 | 8.961 | 14.906 | 14.907 | 14.877 |
| C | 14.932 | 14.931 | 14.911 | 8.932 | 8.918 | 8.922 | 14.891 | 14.892 | 14.865 |
| D | 14.945 | 14.916 | 14.960 | 8.929 | 8.922 | 8.922 | 14.913 | 14.909 | 14.888 |
| Media | 14.946 | 14.939 | 14.954 | 8.942 | 8.943 | 8.941 | 14.917 | 14.918 | 14.892 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 14.012 |
| Ciclos | 136328 | Tiempo rotura (min) | 75.74 |
| L-x rotura (mm) | 68.22 | Tipo de rotura | Completa |

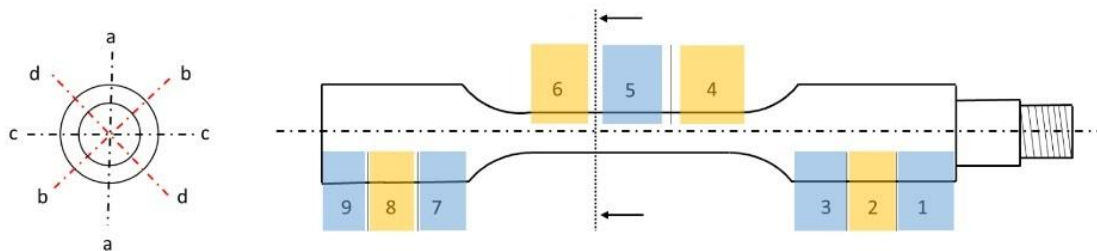
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C2 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 5 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 2 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.927 | 14.947 | 14.981 | 8.948 | 8.955 | 8.952 | 14.968 | 14.975 | 14.953 |
| B | 14.934 | 14.934 | 14.951 | 8.966 | 8.951 | 8.957 | 14.903 | 14.898 | 14.902 |
| C | 14.898 | 14.917 | 14.900 | 8.942 | 8.997 | 8.989 | 14.904 | 14.896 | 14.893 |
| D | 14.953 | 14.946 | 14.946 | 8.937 | 8.927 | 8.928 | 14.924 | 14.908 | 14.871 |
| Media | 14.928 | 14.936 | 14.945 | 8.948 | 8.958 | 8.957 | 14.925 | 14.919 | 14.905 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 14.008 |
| Ciclos | 131081 | Tiempo rotura (min) | 72.82 |
| L-x rotura (mm) | 68.20 | Tipo de rotura | Completa |

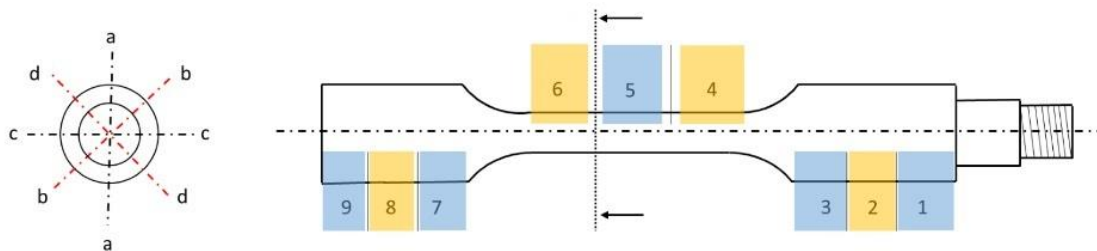
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C3 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 1 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcacas | 3 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.928 | 14.923 | 14.926 | 8.967 | 8.961 | 8.971 | 14.951 | 14.941 | 14.884 |
| B | 14.909 | 14.920 | 14.918 | 8.995 | 8.996 | 8.975 | 14.911 | 14.916 | 14.905 |
| C | 14.862 | 14.889 | 14.931 | 8.931 | 8.939 | 9.002 | 14.853 | 14.847 | 14.811 |
| D | 15.002 | 14.953 | 14.908 | 9.012 | 8.999 | 8.998 | 14.958 | 14.892 | 14.904 |
| Media | 14.925 | 14.921 | 14.921 | 8.976 | 8.974 | 8.987 | 14.918 | 14.899 | 14.876 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.959 |
| Ciclos | 90854 | Tiempo rotura (min) | 50.47 |
| L-x rotura (mm) | 67.96 | Tipo de rotura | Completa |

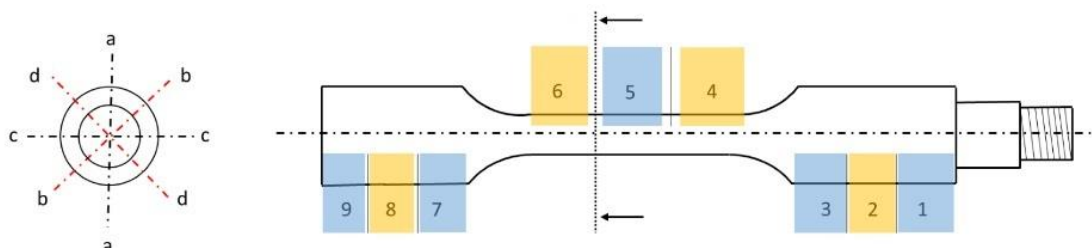
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C3 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 2 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 3 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.971 | 15.063 | 15.034 | 9.044 | 9.031 | 9.042 | 14.927 | 14.965 | 14.992 |
| B | 14.952 | 14.954 | 14.918 | 8.934 | 8.943 | 8.952 | 14.916 | 14.914 | 14.856 |
| C | 14.931 | 14.915 | 14.954 | 8.997 | 8.965 | 8.981 | 14.898 | 14.912 | 14.977 |
| D | 15.008 | 15.007 | 14.995 | 8.984 | 8.972 | 8.990 | 15.038 | 14.988 | 14.904 |
| Media | 14.966 | 14.985 | 14.975 | 8.990 | 8.978 | 8.991 | 14.945 | 14.945 | 14.932 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 13.913 |
| Ciclos | 105957 | Tiempo rotura (min) | 58.87 |
| L-x rotura (mm) | 67.74 | Tipo de rotura | Completa |

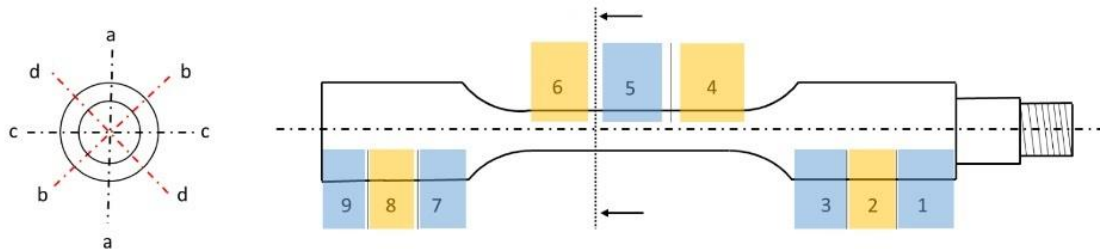
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C3 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 3 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 3 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.017 | 15.075 | 15.094 | 9.000 | 9.003 | 9.006 | 15.026 | 15.062 | 15.042 |
| B | 14.993 | 14.936 | 14.927 | 8.967 | 8.976 | 8.992 | 14.992 | 14.974 | 14.920 |
| C | 14.896 | 14.903 | 14.914 | 8.998 | 8.995 | 8.985 | 14.927 | 14.919 | 14.909 |
| D | 14.906 | 14.866 | 14.876 | 8.992 | 8.982 | 8.993 | 14.939 | 14.927 | 14.883 |
| Media | 14.953 | 14.945 | 14.953 | 8.989 | 8.989 | 8.994 | 14.971 | 14.971 | 14.939 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 14.415 |
| Ciclos | 239379 | Tiempo rotura (min) | 132.99 |
| L-x rotura (mm) | 70.18 | Tipo de rotura | Completa |

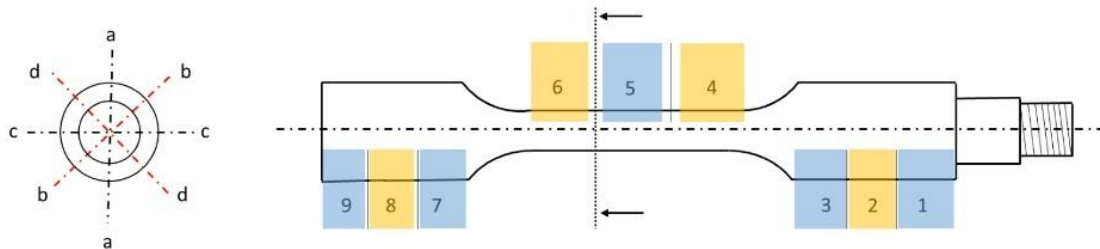
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C3 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 4 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 3 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 15.051 | 15.045 | 15.022 | 9.048 | 9.022 | 9.021 | 14.999 | 15.052 | 15.038 |
| B | 14.922 | 14.941 | 14.930 | 8.957 | 8.982 | 8.958 | 14.959 | 14.956 | 14.953 |
| C | 14.934 | 14.953 | 14.955 | 8.967 | 8.976 | 8.971 | 14.934 | 14.931 | 14.928 |
| D | 14.887 | 14.884 | 14.931 | 8.999 | 8.995 | 8.986 | 14.944 | 14.954 | 14.911 |
| Media | 14.949 | 14.956 | 14.960 | 8.993 | 8.994 | 8.984 | 14.959 | 14.973 | 14.958 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 14.020 |
| Ciclos | 155409 | Tiempo rotura (min) | 86.34 |
| L-x rotura (mm) | 68.26 | Tipo de rotura | Completa |

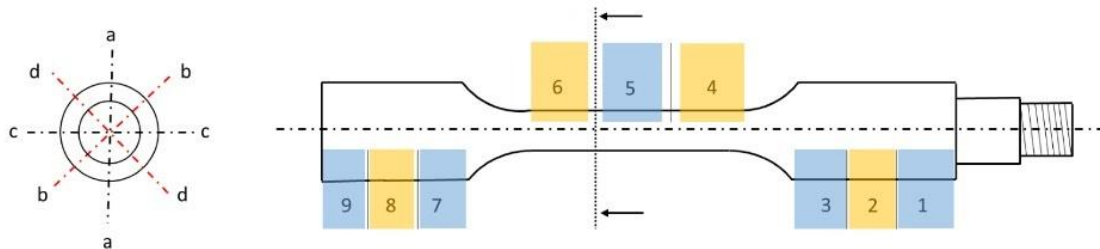
HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

| | |
|-----------------|-----|
| MATERIAL | PLA |
|-----------------|-----|

| | |
|-------------------|--|
| ID. ENSAYO | B2_Fatiga_PLA_T60_R100_V40_TE215_E0.3_C3 |
|-------------------|--|

| DATOS DEL PROCESO | | OBSERVACIONES |
|--------------------|-----|---------------|
| Tª extrusión (°C) | 215 | Probeta 5 |
| v impresión (mm/s) | 40 | |
| e capa (mm) | 0.3 | |
| Nº carcasas | 3 | |
| Tª cama (°C) | 60 | |
| Relleno (%) | 100 | |

CONTROL DIMENSIONAL



| | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| A | 14.945 | 15.024 | 14.996 | 8.991 | 9.000 | 8.992 | 14.983 | 15.008 | 14.957 |
| B | 14.943 | 14.913 | 14.908 | 8.952 | 8.954 | 8.959 | 14.925 | 14.938 | 14.926 |
| C | 14.965 | 14.945 | 14.923 | 8.976 | 8.997 | 9.001 | 14.917 | 14.911 | 14.904 |
| D | 14.937 | 14.937 | 14.926 | 8.993 | 8.955 | 8.971 | 14.939 | 14.929 | 14.935 |
| Media | 14.948 | 14.955 | 14.938 | 8.978 | 8.977 | 8.981 | 14.941 | 14.947 | 14.931 |

ENSAYO DE FATIGA

| | | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|----------|
| Carga (kg) | 1.5 | Fuerza (N) | 14.7 |
| Revoluciones (rpm) | 1800 | Tensión (MPa) | 14.022 |
| Ciclos | 119158 | Tiempo rotura (min) | 66.20 |
| L-x rotura (mm) | 68.27 | Tipo de rotura | Completa |