



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## **ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación**  
**Área de Conocimiento de Ingeniería de Procesos de Fabricación**

# **TRABAJO FIN DE GRADO**

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE PROBETAS DE PLA CON REFUERZO DE FIBRAS NATURALES IMPRESAS MEDIANTE FDM**

Grado en **INGENIERÍA MECÁNICA**

Autor: **JESÚS RUEDA SÁNCHEZ**

Tutor: **ERNESTO MARTÍN FERNÁNDEZ**

Cotutor: **CAROLINA BERMUDO GAMBOA**

MÁLAGA, noviembre de 2.023



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL  
COMPORTAMIENTO A FATIGA DE PROBETAS  
DE PLA CON REFUERZO DE FIBRAS NATURALES  
IMPRESAS MEDIANTE FDM





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL  
COMPORTAMIENTO A FATIGA DE PROBETAS  
DE PLA CON REFUERZO DE FIBRAS NATURALES  
IMPRESAS MEDIANTE FDM





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL  
COMPORTAMIENTO A FATIGA DE PROBETAS  
DE PLA CON REFUERZO DE FIBRAS NATURALES  
IMPRESAS MEDIANTE FDM





## RESUMEN

En el desarrollo de la producción industrial y de la fabricación aditiva, aún se busca conocer lo máximo posible acerca de los materiales de los que disponemos, así como sus correspondientes propiedades mecánicas.

En este estudio, se realizan ensayos experimentales de respuesta a fatiga por flexión rotativa a probetas fabricadas mediante impresión 3D, empleando como material ácido poliláctico (PLA) con aditivo de fibras naturales (partículas de celulosa) y PLA HR-3D870, sometiendo estas a diferentes cargas, obteniendo sus curvas S-N.

Previo a los ensayos se realizan mediciones dimensionales de las probetas y, posteriormente a estos, evaluar, analizar y comparar los resultados y observación fractográfica.

## PALABRAS CLAVE

Fabricación aditiva, extrusión de material, material compuesto, ácido poliláctico, PLA, fibra vegetal, fatiga a flexión rotativa.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL  
COMPORTAMIENTO A FATIGA DE PROBETAS  
DE PLA CON REFUERZO DE FIBRAS NATURALES  
IMPRESAS MEDIANTE FDM





## **ABSTRACT**

In the development of industrial production and additive manufacturing, we still seek to know as much as possible about the materials we dispose, as well as their mechanical properties.

In this study, fatigue behavior by rotary bending experimental tests are carried out on specimens manufactured by 3D printing, using polylactic acid (PLA) as material with an additive of natural fibers (cellulose particles) and PLA HR-3D870, subjecting these to different loads, obtaining their S-N curves.

Prior to the tests, dimensional measurements of the specimens are carried out, and after these, results and fractographic observation are evaluated, analyzed and compared.

## **KEYWORDS**

Additive manufacturing, material extrusion, composite material, polylactic acid, PLA, vegetable fibre, rotating vending fatigue.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL  
COMPORTAMIENTO A FATIGA DE PROBETAS  
DE PLA CON REFUERZO DE FIBRAS NATURALES  
IMPRESAS MEDIANTE FDM





## ÍNDICE DE CONTENIDO

1	Introducción .....	17
2	Objetivos .....	18
3	Marco teórico .....	18
3.1	Procesos de fabricación .....	18
3.2	Fabricación aditiva .....	19
3.3	Fabricación por Filamento Fundido .....	22
3.4	Metrología dimensional .....	28
3.5	Ensayo de fatiga .....	30
4	Estado del arte .....	33
5	Metodología .....	34
5.1	Elección del material .....	34
5.2	Elección de los parámetros de impresión .....	36
5.3	Diseño de probetas .....	36
5.4	Impresión de probetas .....	39
5.5	Control macrogeométrico .....	43
5.6	Ensayo de fatiga a flexión rotativa .....	44
6	Análisis del control dimensional .....	49
7	Análisis de los resultados de los ensayos a fatiga .....	51
8	Fractografía .....	56
9	Conclusiones .....	68
10	Líneas futuras de investigación .....	69
11	Bibliografía .....	70
	Anexo I: Hojas de datos .....	73



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL  
COMPORTAMIENTO A FATIGA DE PROBETAS  
DE PLA CON REFUERZO DE FIBRAS NATURALES  
IMPRESAS MEDIANTE FDM





## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Procesos de fabricación aditiva. [2].....	17
<b>Figura 2.</b> Ahorro en costes y velocidad de producción por FA: hechos y previsiones. [4].....	20
<b>Figura 3.</b> Prótesis mediante impresión 3D. [5].....	21
<b>Figura 4.</b> Turbina producida con FA. [6].....	22
<b>Figura 5.</b> FA en arquitectura: Maqueta impresa (a) [7], y muros de vivienda mediante FA (b) [8].	22
<b>Figura 6.</b> Modelado 3D en Solidworks. [9].....	23
<b>Figura 7.</b> Interfaz del Slicer3D de IdeaMaker. [10].....	23
<b>Figura 8.</b> Impresión 3D (FFF) de una pieza. [11].....	24
<b>Figura 9.</b> Eliminación manual de soportes de impresión. [12].....	24
<b>Figura 10.</b> Impresora Raise3D Pro2. ....	25
<b>Figura 11.</b> Partes de importancia de la impresora 3D: extrusor (a), plataforma y ejes (b), pantalla de control (c). ....	26
<b>Figura 12.</b> Densidad de relleno: 10% (a), 25% (b) y 50% (c). [14].....	28
<b>Figura 13.</b> Patrones de relleno. [14].....	28
<b>Figura 14.</b> Control dimensional: diámetros mediante micrómetro de exteriores (a), longitudes mediante pie de rey (b).....	29
<b>Figura 15.</b> Fases de la rotura por fatiga: estado inicial (a), generación de la grieta (b), propagación de la grieta (c), rotura (d). [18].....	30
<b>Figura 16.</b> Principios geométricos del ensayo a fatiga por flexión rotativa. [19].....	31
<b>Figura 17.</b> Curva S-N o Curva Wöhler por ensayo a fatiga. [25].....	32
<b>Figura 18.</b> Curva S-N de PLA+Fibra de carbono según espesor de capa. [32].....	33
<b>Figura 19.</b> PLA Textura (Celulosa): aspecto bobina (a) y ejemplo de acabado (b) [33]. ....	34
<b>Figura 20.</b> Bobina PLA HR-3D870.....	35
<b>Figura 21.</b> Modelado 3D de probeta en SolidWorks: croquizado (a) y revolución (b). ....	37
<b>Figura 22.</b> Importación del modelo en IdeaMaker. ....	38
<b>Figura 23.</b> Laminado en IdeaMaker, estimación de costos.....	38
<b>Figura 24.</b> Vista previa impresión en IdeaMaker: primera mitad de pieza (a), y aspecto final (b). .	39
<b>Figura 25.</b> Impresora Raise3D Pro2. [36].....	39
<b>Figura 26.</b> Interfaz de la pantalla táctil de Impresora Raise3D Pro2. [37].....	40
<b>Figura 27.</b> Impresión de prueba probeta individual: vista superior (a), y vista frontal (b). ....	40



<b>Figura 28.</b> Proceso impresión 5 probetas: pantalla de control (a), balsa (b), primeras capas y soportes (c), y vista general (d). .....	41
<b>Figura 29.</b> Obtención impresión 5 probetas: PLA HR-3D870 (a) y PLA Textura (Celulosa) (b). .....	42
<b>Figura 30.</b> Postprocesado de probetas: numeración (a), separación de balsa (b), resultado final (c). .....	42
<b>Figura 31.</b> Deformación térmica en las primeras capas de impresión en PLA HR-3D870. ....	43
<b>Figura 32.</b> Control dimensional de diámetros, con micrómetro milesimal de exteriores. ....	43
<b>Figura 33.</b> Metodología de medición de diámetros. ....	44
<b>Figura 34.</b> Máquina de ensayos de fatiga mediante flexión rotativa: vista general (a) y principio de funcionamiento (b). ....	44
<b>Figura 35.</b> Selección de velocidad de rotación del eje a 1.800 rpm. ....	45
<b>Figura 36.</b> Configuración de las cargas de ensayo: 0,8 kg (a); 1,0 kg (b); 1,1 kg (c); 1,3 kg (d). ....	46
<b>Figura 37.</b> Roscado M10 en probeta de PLA Textura (Celulosa). ....	46
<b>Figura 38.</b> Colocación probeta a ensayar: fijación en plato de garras (a) y módulo de carga (b). ...	47
<b>Figura 39.</b> Final del ensayo: rotura de probeta (a) y contador de ciclos en el panel de control (b). ..	48
<b>Figura 40.</b> Ejemplos de roturas de probetas. ....	48
<b>Figura 41.</b> Medida longitud punto de carga-rotura. ....	48
<b>Figura 42.</b> Variación nominal en micras por cada punto de medición, PLA Textura (Celulosa). .....	49
<b>Figura 43.</b> Variación nominal en micras por cada punto de medición, PLA HR-3D870. ....	50
<b>Figura 44.</b> Resultados ciclos PLA Textura (Celulosa): 0,80 kg (a); 1,00 kg (b); 1,10 kg (c); 1,30 kg (d). .....	51
<b>Figura 45.</b> Resultados ciclos PLA HR-3D870: 0,80 kg (a); 1,00 kg (b); 1,10 kg (c); 1,30 kg (d). .....	52
<b>Figura 46.</b> Comparación ciclos medios PLA Textura (Celulosa) y PLA HR-3D870. ....	53
<b>Figura 47.</b> Gráfica S-N para PLA Textura (Celulosa). .....	54
<b>Figura 48.</b> Gráfica S-N para PLA HR-3D870. ....	54
<b>Figura 49.</b> Gráfica S-N: PLA Textura (Celulosa) vs PLA HR-3D870. ....	55
<b>Figura 50.</b> Microscopio Zeiss con AxioCam 208 color. ....	56
<b>Figura 51.</b> Acabado superficial (x20): PLA Tectura (a) y PLA HR-3D870 (b). ....	57
<b>Figura 52.</b> Fractografía tipo (x8): PLA con celulosa (a) y PLA HR-3D870 (b). .....	58
<b>Figura 53.</b> Fractografía perfil tipo (x8): PLA con celulosa (a) y PLA HR-3D870 (b). .....	59
<b>Figura 54.</b> Fractografía PLA Celulosa (x8): P12 [168.292 ciclos] (a) y P13 [742.489 ciclos] (b). ....	60
<b>Figura 55.</b> Fractografía PLA Celulosa (x20): P12 [168.292 ciclos] (a) y P13 [742.489 ciclos] (b). ....	61
<b>Figura 56.</b> Rotura incompleta P1 PLA Celulosa (x8): Capas externas (a) y Capas internas (b). ....	62



<b>Figura 57.</b> Rotura incompleta P9 PLA Celulosa (x8): Capas externas (a) y Capas internas (b).....	63
<b>Figura 58.</b> PLA con celulosa: Huecos internos x40 (a) y partículas de celulosa x30 (b). .....	64
<b>Figura 59.</b> Fractografía PLA HR-3D870 (x8): P1 [690.613 ciclos] (a) y P5 [244.177 ciclos] (b). .....	65
<b>Figura 60.</b> Fractografía PLA HR-3D870 (x8): P7 [360.608 ciclos] (a) y P9 [197.030 ciclos] (b). .....	66
<b>Figura 61.</b> Fractografía PLA HR-3D870 (x40): zona frágil (a) y zona dúctil (b).....	67



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL  
COMPORTAMIENTO A FATIGA DE PROBETAS  
DE PLA CON REFUERZO DE FIBRAS NATURALES  
IMPRESAS MEDIANTE FDM





## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Resumen de materiales de impresión 3D más utilizados. [13] .....	27
<b>Tabla 2.</b> Clasificación metrología dimensional. ....	29
<b>Tabla 3.</b> Tipos de ensayos a fatiga. ....	31
<b>Tabla 4.</b> Datos del control dimensional en probetas de PLA Textura (Celulosa).....	49
<b>Tabla 5.</b> Datos control dimensional de probetas PLA HR-3D870. ....	50
<b>Tabla 6.</b> Resumen ciclos medios en probetas de PLA Textura (Celulosa). ....	53
<b>Tabla 7.</b> Resumen ciclos medios en probetas de PLA HR-3D870. ....	53
<b>Tabla 8.</b> Distancia media entre punto de carga y punto de rotura. ....	55



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL  
COMPORTAMIENTO A FATIGA DE PROBETAS  
DE PLA CON REFUERZO DE FIBRAS NATURALES  
IMPRESAS MEDIANTE FDM

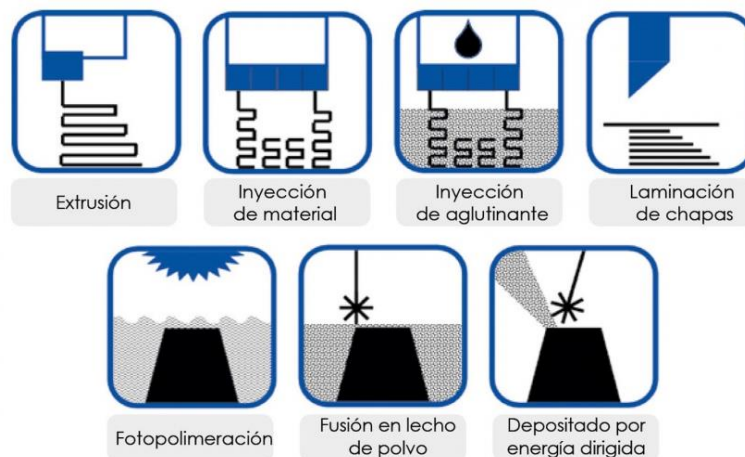


## 1 Introducción

El crecimiento de la fabricación aditiva está impulsando el avance tecnológico en el ámbito de la fabricación y la producción, siendo una forma alternativa para la hasta este momento fabricación tradicional.

La fabricación aditiva (FA), más conocida como impresión 3D, refiere el proceso de fabricación que agrega material de forma incremental, mediante capas sucesivas. Los materiales de fabricación pueden ser variados: cerámica, metal, plástico, siendo este último el más extendido, y objeto de este estudio. Su popularidad se debe también a la posibilidad de creación de formas complejas, incluso imposibles en fabricación sustractiva. Esta versatilidad ha propiciado su uso en amplios campos, desde ocio hasta medicina o aeroespacial.

Se diferencian hasta siete tipos de FA en función del estado de la materia prima, método de generación de capas y forma de fusonado, según norma UNE-EN ISO/ASTM 52900:2022 [1] (Figura 1). Este estudio se centra en la Extrusión, concretamente en Fabricación por Filamento Fundido (FFF), previamente conocido como Modelado por Deposición Fundida (FDM).



**Figura 1.** Procesos de fabricación aditiva. [2]

La FA cuenta con grandes ventajas respecto a la fabricación sustractiva tradicional, como el torneado o el fresado. Entre ellas, la ya comentada versatilidad de materiales, y posibilidad de fabricación de formas complejas. Por otro lado, al aportar material capa a capa a partir de un modelo digital, la FA reduce al mínimo la generación de residuo en el proceso de fabricación, logrando por tanto alta eficiencia y sostenibilidad.

Sin embargo, también presenta desventajas, como mayor tiempo de fabricación, menor calidad superficial y menor precisión dimensional. En general presentan peores propiedades mecánicas, debidas en general al ciclo de calentamiento y enfriamiento del material resultando en contracciones extremas que deforman la pieza final (warping). No obstante, estas desventajas pueden ser mitigadas complementando la FA con otros tratamientos, como superficiales o térmicos.



## 2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el estudio experimental del comportamiento a fatiga por flexión rotativa de probetas fabricadas mediante FFF empleando como material PLA (ácido poliláctico) con partículas de celulosa, y PLA 3D870, ensayadas a distintas cuantías de carga.

Para tal objetivo se establecen otros objetivos complementarios:

- Realizar un control dimensional de las probetas impresas.
- Estudiar el inicio y desarrollo de la rotura mediante fotografías microscópicas de los casos más destacables.
- Analizar y comparar los resultados de forma estadística.
- Cuantificar el comportamiento a fatiga de los materiales estudiados.

## 3 Marco teórico

En primer lugar, se debe poner en contexto el tema central de este Proyecto, la fabricación aditiva (FA) o impresión 3D. Siendo un método de fabricación en desarrollo, se encuentran diferentes ventajas respecto a otros procesos de fabricación, como las mencionadas anteriormente, y se continúa trabajando en la mejora de las desventajas encontradas.

Dada la aún falta de madurez plena en este método de fabricación, los estudios por aclarar las propiedades de los distintos materiales a emplear, así como su variación debido a ajustes de parámetros de impresión u otros tratamientos complementarios están siendo muy numerosos.

Esta memoria presenta el análisis de la respuesta a fatiga de distintos materiales, para las mismas condiciones de impresión. El material principal, y el más extendido en FA, es el ácido poliláctico (PLA). En este caso, se trabaja con PLA con partículas de celulosa, y PLA HR-3D870, basado en material desarrollado por NatureWorks Ingeo. El PLA es conocido y elegido por sus propiedades biodegradables y su interacción con el medio ambiente. Al utilizar fibras naturales como refuerzo, las ventajas de este material sobre el medio ambiente se mantienen.

### 3.1 PROCESOS DE FABRICACIÓN

Se define *Proceso de fabricación* como la secuencia ordenada de pasos y operaciones técnicas que transforman materias primas o componentes en productos finales, siguiendo metodología específica para obtener el resultado. El resultado debe cumplir los requisitos correspondientes de forma, color, funcionalidad.

Según norma UNE-EN ISO / ASTM 52900:2022 [1], 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 que el proceso transforma el material:



- Conformado: obtención del producto final por medio de aplicar presión sobre un cuerpo de materia prima. Forjado, estampado, laminado, extrusión, embutido, moldeo por inyección son procesos por conformado.
- Formación sustractiva: obtención del producto final mediante extracción selectiva de material. Torneado, fresado, taladrado.
- Formación aditiva: obtención del producto mediante adición sucesiva de material.

### 3.2 FABRICACIÓN ADITIVA

Definimos Fabricación Aditiva (FA) según norma UNE-EN ISO / ASTM 52900:2022 [1], como aquellas tecnologías que crean objetos físicos mediante adición sucesiva de material para crear objetos físicos según lo especificado por los datos de un modelo 3D.

#### 3.2.1 Categorías de procesos de fabricación aditiva

Como se detalla en la norma UNE-EN ISO 17296:2017 [3], se diferencian 7 grupos de FA, según la maquinaria, material y tipo de deposición empleado. Estos son los siguientes:

- Fotopolimeración en tanque o cuba
- Proyección de material
- Proyección de aglutinante
- Fusión de lecho de polvo
- Extrusión de material
- Deposición de energía focalizada
- Laminado de hojas

Este estudio se centra en FA mediante extrusión de material, denominado como FFF.

#### 3.2.2 Ventajas de la fabricación aditiva

Algunas de las ventajas encontradas en la FA, recogidas en el artículo de Mohsen Attaran [4], son las siguientes:

- **Eficiencia industrial**

Posibilidad de fabricación extensa, por ejemplo, de recambios de piezas previamente adquiridas, necesitando únicamente el diseño 3D de la misma y la impresora 3D, además con generación mínima de residuos.

- **Personalización masiva**

Fácil personalización a menor tiempo de fabricación y producción que los métodos tradicionales.

- **Fabricación a la carta y descentralizada**

Permite producir una pieza en cualquier momento y en cualquier lugar, in situ y bajo demanda, contando con el material y la impresora. Los costes logísticos disminuyen drásticamente, así como el impacto ambiental.

- **Fabricación de componentes**

Admite fabricación personalizada de componentes en cantidades bajas a mínimo coste, manteniendo las especificaciones.

- **Impresión de sistemas completos**

Permite producir sistemas completos, combinando dos o más materiales simultáneamente, y geometrías complejas e incluso imposibles por fabricación tradicional.

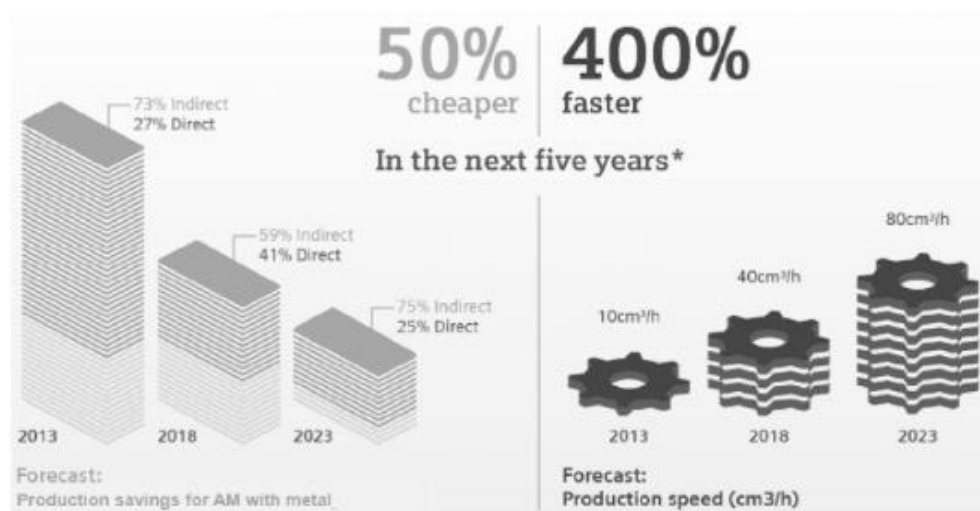
- **Mejora de la calidad**

Admite tolerancias y calidades precisas, según material y parámetros de impresión.

- **Versatilidad**

Posiblemente una de las ventajas más significativas es la versatilidad de productos a obtener, distintos materiales, propiedades y usos, desde ámbitos comunes hasta especializados como medicina o aeroespacial.

Se recuerda que sigue siendo una forma de fabricación en desarrollo, sobre el cuál se siguen encontrando ventajas y optimizando los mayores potenciales encontrados.



**Figura 2.** Ahorro en costes y velocidad de producción por FA: hechos y previsiones. [4]

### 3.2.3 Desventajas de la fabricación aditiva

En contraposición, se citan otras desventajas para la FA, por ejemplo:

- **Restricciones de tamaño**

Como se explicará en el punto 3.3.2., las impresoras 3D se componen de ciertos componentes, como la boquilla, por la que fluye el material, y la estructura y la cama caliente, sobre la que se situará la pieza, encontrando limitaciones de flujo de material a aportar y tamaño de trabajo, tanto en horizontal como en vertical.

- **Tiempo de producción**

En especial para productos a grandes cantidades, o condiciones de gran tamaño, relleno o geometría complejas, los tiempos de producción pueden ser bastante elevados.

- **Coste**

El costo del equipo de impresión puede ser una inversión inicial elevada, aunque en proceso de mejora para hacer más accesible.

- **Regulación**

Dada la reciente aparición y estudio, no se encuentra completamente regulado en cuanto a normativas, por ejemplo, para su despliegue en sector construcción, que garanticen estándares y seguridad.

### 3.2.4 Aplicaciones de la fabricación aditiva

Los ámbitos de aplicación de la FA son muy extensos. Uno de los más notables es el de la **industria médica**, donde ha revolucionado la producción de prótesis y dispositivos médicos personalizados (Figura 3). Ha permitido la creación de implantes y prótesis a medida, mejorando la eficacia y comodidad para los tratamientos de salud.



**Figura 3.** Prótesis mediante impresión 3D. [5]

Otro campo de aplicación es la **industria aeroespacial**. La posibilidad de fabricar componentes más ligeros, eficientes y resistentes, como turbinas (Figura 4), se traduce en aeronaves más avanzadas y económicas. La creación de geometrías más complejas permite otras mejoras de funcionamiento como rendimiento, con menor consumo de combustible y emisiones reducidas.

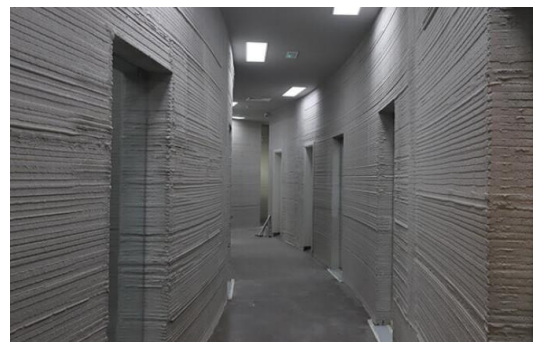


**Figura 4.** Turbina producida con FA. [6]

En el ámbito de la **arquitectura y construcción** también se está trabajando con FA, ya sea para realizar maquetas con mayor detalle y facilidad, como las primeras construcciones reales fabricadas con extrusión de hormigón (Figura 5).



(a)



(b)

**Figura 5.** FA en arquitectura: Maqueta impresa (a)[7], y muros de vivienda mediante FA (b)[8].

También se extiende a sectores como el **diseño y la moda**, con creación de prendas únicas, detalles a pequeña escala. En **ámbito gastronómico**, para nuevas presentaciones, diseños y texturas antes imposibles. Además, un sinfín de usos personales como objetos de decoración, juguetes, pequeñas máquinas o utensilios...

### 3.3 FABRICACIÓN POR FILAMENTO FUNDIDO

La Fabricación por Filamento Fundido (FFF), como se ha mencionado anteriormente, es un tipo de FA, de tipo Extrusión de material. Consiste en el modelado por deposición fundida (FDM) de material, en capas sucesivas.

En el proceso de fabricación se emplean bobinas de material, denominadas filamento, de material metálico o plástico. El material es expulsado a través de una boquilla, que se mantiene a temperatura superior al punto de fusión del material para permitir su flujo semilíquido.

A continuación, se detalla la producción por FFF, características y componentes principales de una impresora 3D, materiales comunes y bases de este estudio, así como parámetros de impresión.

### 3.3.1 Proceso de FFF

Este proceso de fabricación consta de las siguientes etapas:

1. Generación de un modelo 3D

Para la creación del modelo 3D existen diversos softwares de modelado CAD, como Autocad, Catia, Rhinoceros 3D, Solidworks (Figura 6). Así, especificamos con gran precisión la geometría deseada en el diseño.

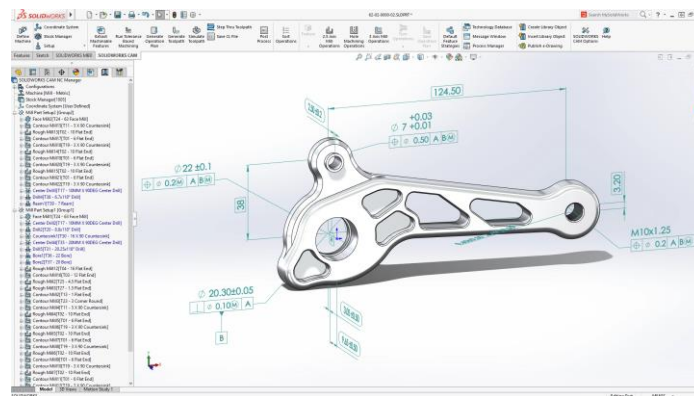


Figura 6. Modelado 3D en Solidworks. [9]

2. Laminado del modelo 3D

Los laminadores o slicers son el paso intermedio entre el modelado y la impresión. También hay variedad de softwares como Cura, 3DPrintersOS, Slic3r, IdeaMaker (Figura 7). A su vez, son compatibles con diferentes extensiones de archivos (.obj, .x3d, .stl).

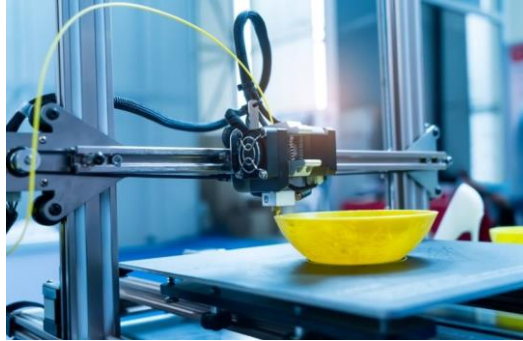
Este software genera el código G de la pieza por capas para la extrusión. Define movimientos, temperaturas, relleno, velocidad. Estos están condicionados también por el tipo de material e impresora 3D a utilizar.



Figura 7. Interfaz del Slicer3D de IdeaMaker. [10]

### 3. Impresión de la pieza

A continuación, la impresora procesa el código G generado por el laminador e inicia la fabricación (Figura 8). La duración será función de la geometría inicial y los parámetros de laminación.



**Figura 8.** Impresión 3D (FFF) de una pieza. [11]

### 4. Extracción de la pieza y postprocesado

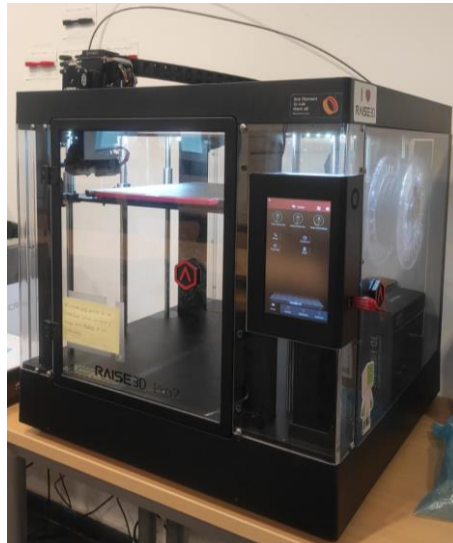
Tras la impresión se retira la pieza del equipo. En caso de uso de soportes de impresión, rebabas, defectos a ser lijados o tratados, se realiza el postprocesado correspondiente para alcanzar el objetivo de diseño (Figura 9).



**Figura 9.** Eliminación manual de soportes de impresión. [12]

#### 3.3.2 Equipo de impresión

Como equipo imprescindible para la FFF es una impresora 3D. En el mercado existe una amplia gama de estas, teniendo precios que varían desde unos 200€, según características y prestaciones de uso, hasta los 3 millones de euros de una impresora industrial destinada a construcciones de hormigón, que mantienen los mismos principios fundamentales de funcionamiento. En este Estudio se ha trabajado con la impresora marca Raise3D modelo Pro 2, con un precio de 3.500€ (Figura 10).



**Figura 10.** Impresora Raise3D Pro2.

Los componentes principales de una impresora 3D son los siguientes:

- Estructura

Es la base física de la impresora. Sustenta el resto de elementos, dando soporte y estabilidad a todo el sistema. Suele ser de aluminio, para una excelente estabilidad a un peso reducido.

- Extrusor o cabezal de impresión

Es el componente responsable de fundir el material de impresión y depositarlo capa a capa según el modelo 3D.

- Material de impresión

El filamento, material en forma de bobina, va pasando al extrusor según necesidad. La calidad y el estado del filamento afectará a las propiedades del objeto final obtenido.

- Plataforma y superficie de adhesión

La plataforma de impresión o cama es la superficie horizontal donde se deposita el material por capas. Su nivelado y calibración espacial es fundamental. Se pueden utilizar camas calentadas y/o con superficies especiales, según las necesidades de la impresión, evitando deformaciones negativas del material o problemas de adhesión a la cama o entre capas.

- Sistema de ejes y movimiento

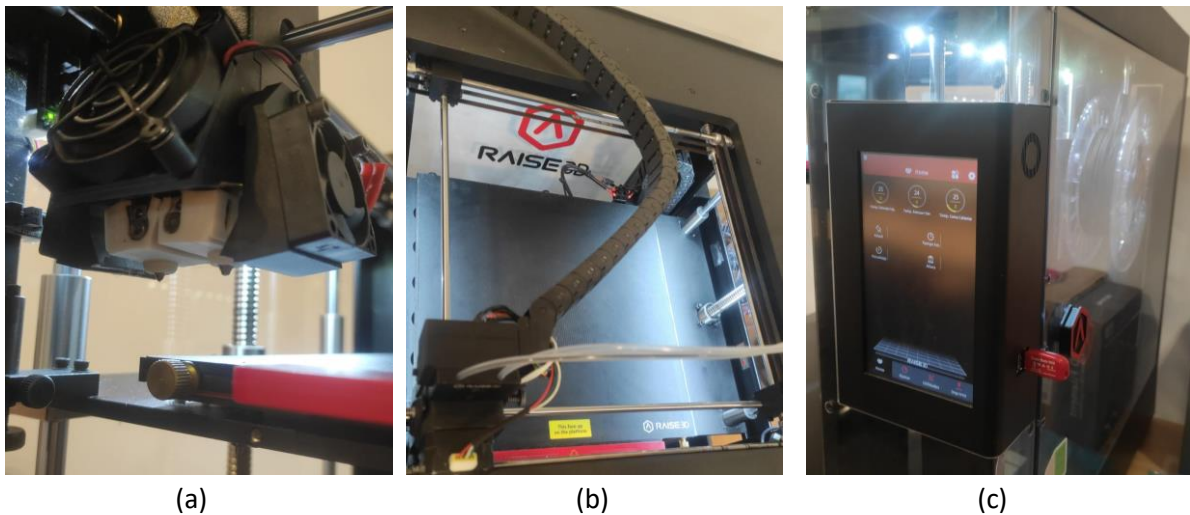
Los movimientos del extrusor y/o la plataforma son controlados por motores y rieles para los ejes X, Y y Z, con una correcta calibración y precisión.

- Electrónica y controladores

Los componentes electrónicos interpretan el código G del laminador, siendo estos la fuente de alimentación, placa base y el panel de control. Gestionan parámetros como las temperaturas de cama y extrusor, velocidades de impresión y movimientos, y cualquier otro aspecto del proceso.

- Sensores

La presencia de sensores para monitorizar los parámetros de impresión o nivel de material restante pueden ajustar automáticamente la configuración para evitar errores de impresión, y dar una correcta notificación instantánea al usuario.



**Figura 11.** Partes de importancia de la impresora 3D: extrusor (a), plataforma y ejes (b), pantalla de control (c).

### 3.3.3 Materiales

Actualmente se dispone una gran variedad de materiales para tecnología de FFF, cada uno con unas características específicas, haciéndolos más o menos adecuados para ciertas aplicaciones. A continuación, se muestra un resumen con los más utilizados actualmente (Tabla 1).

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	APLICACIONES
PLA (ácido poliláctico)	Fácil de imprimir. Rígido, fuerte, pero frágil. Menos resistente al calor y productos químicos. Biodegradable. Inodoro.	Prototipos estéticos. Modelos conceptuales.
ABS (acrilonitrilo butadieno estireno)	Tenaz y duradero. Resistente al calor. Requiere plataforma caliente y ventilación.	Prototipos funcionales.
PETG (tereftalato de polietileno glicolizado)	Apto a menores temperaturas para velocidades altas. Resistente a la humedad y productos químicos. Alta transparencia. Apto para la alimentación.	Aplicaciones impermeables. Componentes de fijación mediante presillas.



Nylon	Resistente, duradero y ligero. Duro y parcialmente flexible. Resistente al calor y a los impactos. Muy difícil de imprimir con FFF.	Prototipos funcionales. Piezas resistentes al desgaste.
TPU (poliuretano termoplástico)	Flexible y estirable. Resistente a impactos. Excelente amortiguación de vibraciones.	Prototipos flexibles.
PVA (alcohol polivinílico)	Soluble en agua.	Soportes.
HIPS (poliestireno de alto impacto)	Soluble en limoneno químico.	Soportes (a menudo en ABS).
Compuestos (fibra de carbono, kevlar, fibra de vidrio)	Rígidos, extremadamente resistentes. Compatibilidad limitada a algunas impresoras 3D FDM industriales caras.	Prototipos funcionales. Guías, fijaciones y herramientas

**Tabla 1.** Resumen de materiales de impresión 3D más utilizados. [13]

Este estudio se centra en la fabricación con ácido poliláctico (PLA). Es un plástico biodegradable obtenido a partir de recursos naturales: almidón de maíz, remolacha y trigo. Resulta uno de los materiales más usados en FFF debido a que no desprende gases nocivos, no requiere impresora con cama caliente y es fácil de imprimir, con poco efecto warping.

### 3.3.4 Parámetros de impresión

Los parámetros de impresión resultan determinantes en el proceso de fabricación y su resultado final, según su infinidad de combinaciones posibles. A continuación, se exponen los más importantes:

- Velocidad de impresión

Refiere la velocidad de desplazamiento del extrusor. Se ve estrictamente limitado por la capacidad de los motores. Al aumentar puede reducir el tiempo de impresión, pero puede empeorar la precisión y calidad de la pieza.

- Diámetro del extrusor

Determina el grosor de las líneas depositadas de material en cada capa. Un menor diámetro puede aumentar la capacidad de detalle, pero también aumentar tiempo de impresión o provocar atascos de material.

- Altura de capa

Limitada por el diámetro del extrusor, es el grosor de cada capa impresa. Menor altura de capa aporta mayor detalle, pero incrementa el tiempo de impresión.

- Temperatura del extrusor

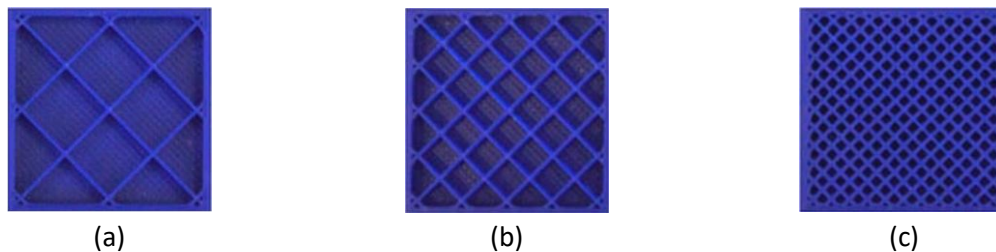
Controla la viscosidad su fluidez del material. Es importante ajustarla correctamente al material de trabajo, ya que demasiado alta o baja provocará demasiada fluidez y deslizamiento entre capas, y a problemas de atascos o adhesión entre capas.

- Temperatura de la cama

Afecta a la adhesión de la pieza a la superficie de impresión. Una correcta temperatura de cama previene el desprendimiento.

- Densidad de relleno

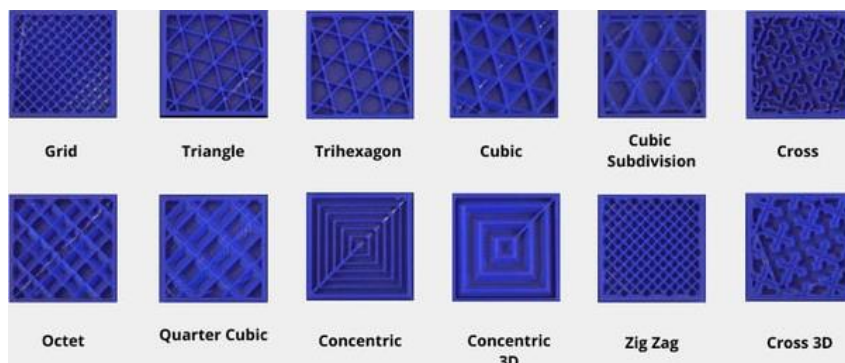
Determina qué porcentaje del interior de la pieza está rellena de material, siendo 0% una pieza hueca, y 100% una maciza (Figura 12). Un mayor porcentaje aporta mayor resistencia, pero también aumenta considerablemente el tiempo de impresión y consumo de material.



**Figura 12.** Densidad de relleno: 10% (a), 25% (b) y 50% (c). [14]

- Patrón de relleno

Define la distribución del relleno, pudiendo afectar a la resistencia y eficiencia del material (Figura 13).



**Figura 13.** Patrones de relleno. [14]

### 3.4 METROLOGÍA DIMENSIONAL

La metrología dimensional es la rama de la ciencia que estudia las técnicas de medición, con un grado de precisión adecuado, enfocada a la cuantificación y análisis de las dimensiones físicas del objeto a medir. Mediante los adecuados instrumentos de medición, la metrología busca establecer estándares y tolerancias que garanticen la calidad de los productos, asegurando cumplan especificaciones de diseño.

La metrología dimensional puede dividirse de la siguiente forma (Tabla 2):

<b>Macrogeometría</b>	Dimensional	Longitudes
		Ángulos
	Geométrica	Forma
		Orientación
		Localización
Alabeo		
<b>Microgeometría</b>	Acabado superficial	

**Tabla 2.** Clasificación metrología dimensional.

En este Proyecto, únicamente se revisará la macrogeometría dimensional de las probetas, controlando las desviaciones dimensionales correspondientes a los diámetros, así como la longitud de las probetas ensayadas (Figura 14).



(a)



(b)

**Figura 14.** Control dimensional: diámetros mediante micrómetro de exteriores (a), longitudes mediante pie de rey (b).

Las desviaciones dimensionales hacen referencia a las variaciones entre las medidas tomadas sobre una pieza y los valores teóricos o nominales. Analizando estas variaciones se puede asegurar la calidad y tolerancia de fabricación del producto final. Para esta metrología dimensional se emplean los instrumentos más comúnmente usados para tal tarea, el pie de rey o calibre Vernier, y el micrómetro centesimal de exteriores.

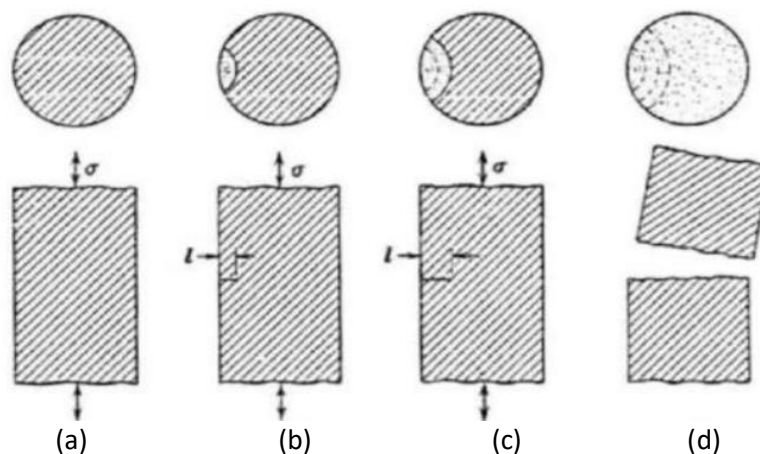
### 3.5 ENSAYO DE FATIGA

El comportamiento a fatiga es una de las propiedades mecánicas más interesantes en el estudio de materiales estructurales y de fabricación.

La rotura 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” [15]. El análisis de fatiga permite validar un diseño en durabilidad bajo condiciones de carga simples o complejas repetitivas conocidas como cargas de servicio [16]. Esto es, que el material puede alcanzar la rotura con un valor de tensión menor al límite elástico, tensión de Von Mises o esfuerzo máximo de tensión (UTS). Por ello, los componentes de los aviones por ejemplo se diseñan a vida infinita a fatiga. Estas cargas pueden darse por tracción, compresión, flexión, vibración, expansión térmica y contracción u otros esfuerzos [17].

El fallo por fatiga se divide en tres etapas (Figura 15):

1. Generación de una o más grietas, generalmente desde la superficie aprovechando un defecto superficial, en una concentración máxima de tensiones.
2. Crecimiento y propagación de la grieta por el material a medida que se repite la carga.
3. Fractura del material, cuando la sección no resiste la carga aplicada.



**Figura 15.** Fases de la rotura por fatiga: estado inicial (a), generación de la grieta (b), propagación de la grieta (c), rotura (d). [18]

En el caso de los materiales poliméricos, como trata este Proyecto, a medida que se repiten los esfuerzos, puede ocurrir un calentamiento cerca de la grieta, afectando este mecanismo de termofluencia al comportamiento final.

### 3.5.1 Tipos de ensayos a fatiga

Para el estudio del comportamiento a fatiga de un material, existen distintos tipos de ensayos (Tabla 3). Aunque estos están normalizados para materiales metálicos, nos sirven de base para este Estudio en polímeros.

Método de ensayo	Norma
Rotating bar bending (Flexión rotativa)	ISO 1143:2021 [19]
Axial strain controlled (Tensión axial regulada)	ISO 12106:2017 [20]
Fatigue crack growth (Crecimiento de grietas de fatiga)	ISO 12108:2018 [21]
Axial force-controlled (Fuerza axial regulada)	ISO 1099:2017 [22]
Torque controlled (Torsión regulada)	ISO 1352:2021 [23]

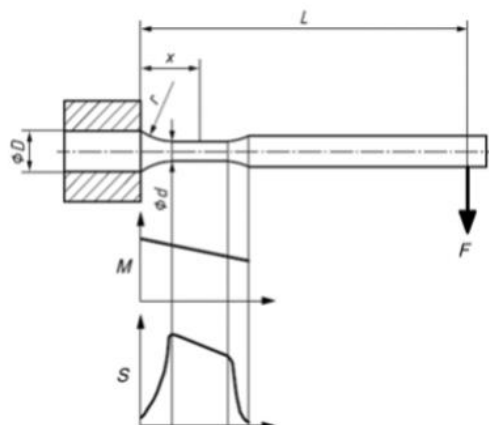
**Tabla 3.** Tipos de ensayos a fatiga.

En este Proyecto seguiremos la metodología de ensayo a fatiga por flexión rotativa, utilizando una máquina de ensayo diseñada para ello por la Universidad de Málaga.

### 3.5.2 Ensayo a fatiga por flexión rotativa

Este tipo de ensayo se basa en la fijación de una probeta como viga rotatoria en voladizo (Figura 16). El extremo izquierdo permanece sujeto a un motor giratorio, mientras el extremo derecho soporta una carga suspendida.

Inicialmente, la probeta soporta una fuerza de tensión en la cara superior, mientras la inferior una de compresión. Al rotar la pieza, la cara previa a tensión pasará a soportar compresión, y la cara a compresión pasará a soportar tensión. Por tanto, conforme se ejecutan las revoluciones del motor, la probeta sufre una carga cíclica senoidal de tensión máxima a compresión máxima.



**Figura 16.** Principios geométricos del ensayo a fatiga por flexión rotativa. [19]

El esfuerzo máximo que actúa sobre la probeta viene dado por:

$$\pm \sigma = 32 \cdot M / \pi \cdot d^3 \quad [24]$$

Siendo  $d$  el diámetro y  $M$  el momento a flexión en la sección transversal [ $M=F \cdot (L-x)$ ], donde:

F: Carga aplicada a la probeta (N)

L: Distancia entre la carga y el plato de garras (mm)

x: Distancia de la rotura al plato de garras (mm)

De esta forma, el resultado de un ensayo a fatiga bajo varias cargas se puede representar como una curva S-N, también conocida como Curva de Wöhler, siendo S el esfuerzo y N el número de ciclos hasta el fallo (Figura 17).

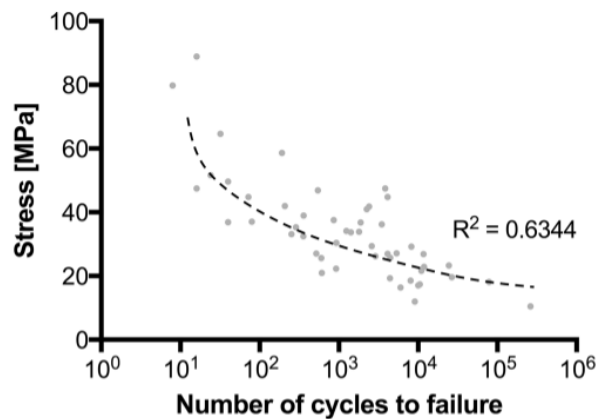


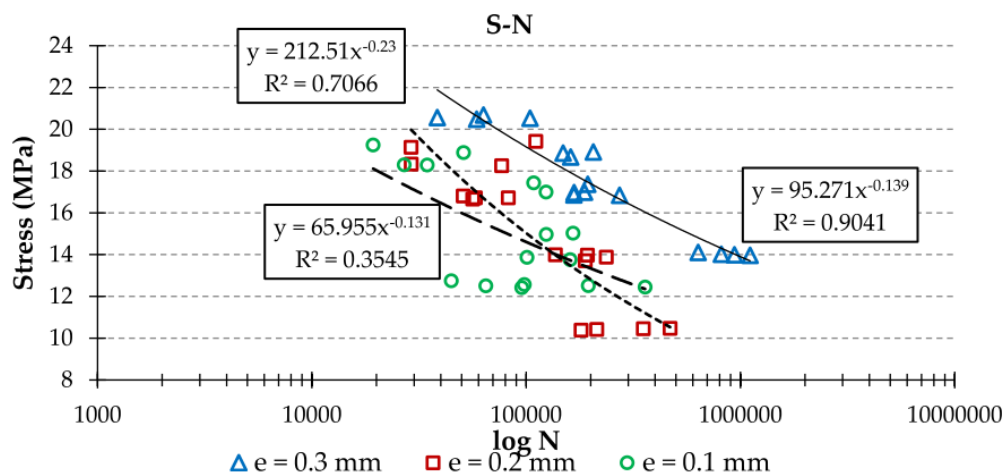
Figura 17. Curva S-N o Curva Wöhler por ensayo a fatiga. [25]

## 4 Estado del arte

Siguiendo lo comentado previamente, la FA es un método aún reciente, en estudio y desarrollo, con grandes proyecciones futuras por mejorar y alcanzar. En esa línea, se realizan numerosos estudios de materiales y propiedades de las impresiones.

La mayoría de ensayos mecánicos que se realizan son de tracción y compresión, y en pocas ocasiones de flexión, siendo los Estudios de este Área de Conocimiento de la Universidad de Málaga de los primeros en estudiar el comportamiento a fatiga por flexión rotativa en FA, para variedad de materiales y parámetros de impresión. [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32]

Sin embargo, no se encuentran estudios a fatiga para PLA Celulosa o PLA 870. En cuanto a la obtención de curvas S-N para otros materiales en FA, se encuentra Estudio en PLA+Fibra de carbono, analizando influencia de espesor de capa (Figura 18: a), y estudios en PLA+Grafeno (Figura 18: b).



**Figura 18.** Curva S-N de PLA+Fibra de carbono según espesor de capa. [32]

Uno de los principales motivos de la dificultad de encontrar otros artículos sobre comportamiento a fatiga con impresión 3D es la variabilidad de resultados a obtener, debido en primer lugar por el proceso de fabricación, así como la variabilidad intrínseca en un ensayo a fatiga.

Esta falta de información sobre el tema es la motivación de realizar este estudio.

## 5 Metodología

Para comenzar con este Proyecto, planteamos distintos pasos a seguir para cumplir los objetivos, los cuales corresponden a los siguientes apartados:

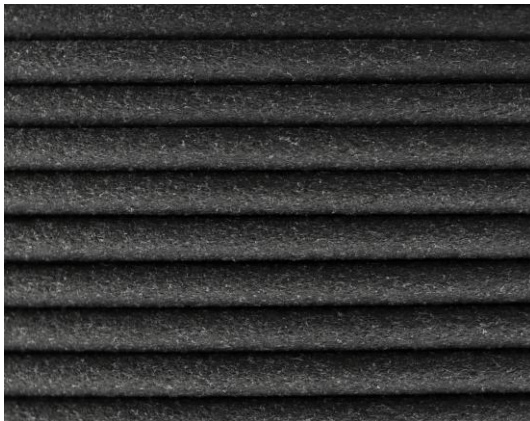
### 5.1 ELECCIÓN DEL MATERIAL

Con la elección de materiales a estudiar, se pretende continuar las series de análisis de comportamiento a fatiga de distintas variaciones de PLA, como son:

- PLA con aditivos naturales, como restos de posos de café.
- PLA Basic.
- PLA con otros aditivos, como fibra de carbono.

#### 5.1.1 PLA Textura (con refuerzo fibra natural, celulosa)

Primeramente elegimos como material a estudiar ácido poliláctico (PLA) con aditivo de partículas de celulosa, en concreto se usará una bobina de filamento marca “Addnorth” denominado “PLA Textura” (en adelante PLA Celulosa), en color Negro (Figura 19), de 1.75mm de diámetro.



(a)



(b)

**Figura 19.** PLA Textura (Celulosa): aspecto bobina (a) y ejemplo de acabado (b) [33].

El aporte de estas partículas de celulosa dota al material de un acabado mate muy llamativo. Además, consigue un buen acabado superficial a nivel macroscópico, con distinción de capa apenas apreciable (Figura 18: b). Por ello, puede ser muy útil para imitar ciertos acabados como yeso o pizarra en aplicaciones de maquetas de arquitectura, o en modelos de piezas artísticas, contando a su vez con fáciles postprocesados como el pintado. En cuanto a propiedades mecánicas se le atribuye un ligero mejor comportamiento a tracción que el PLA convencional, y una peor respuesta a flexión, a expensas de estudiarlo a fatiga. [34]

### 5.1.2 PLA HR-3D870

Seguidamente elegimos como material a estudiar ácido poliláctico (PLA) fabricado a partir de la resina PLA Ingeo 3D870, sin aditivo de fibras. Se usará una bobina de filamento desarrollada por “NatureWorks” denominado “PLA HR-3D870” (en adelante PLA 870), en color Natural (Figura 20), de 1.75mm de diámetro.



**Figura 20.** Bobina PLA HR-3D870.

Este material presenta características generales altas, comparables o incluso superiores al ABS, manteniendo la facilidad de impresión del PLA Estándar. Además, en contraposición a otros materiales plásticos, permite ser templado, mejorando sus propiedades mecánicas al reordenar su estructura molecular de amorfa a cristalina. Tras el templado, puede alcanzar una resistencia al impacto doble respecto al estado amorfo, y unas 5 veces mayor al ABS. Otra particularidad es la alta resistencia a la pérdida de color ante exposición a rayos UV, la cual es mínima en PLA Estándar. [35]



## 5.2 ELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

En este tipo de fabricación, los parámetros de impresión resultan determinantes. Dado el objetivo de este Proyecto de analizar el comportamiento a fatiga de dos materiales variando la carga aplicada, los parámetros de impresión permanecerán constantes para todas las impresiones.

Así, y en línea con otras investigaciones de FFF desarrolladas por el Grupo de Investigación de Ingeniería de Fabricación, TEP933, formado por investigadores pertenecientes al Área de Conocimiento y Unidad Docente de Ingeniería de los Procesos de Fabricación, del Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación de la Universidad de Málaga, se establecen los valores siguientes:

- Orientación de la probeta: horizontal (con balsa y soportes automáticos necesarios).
- Temperatura de impresión: 215 °C
- Temperatura de cama: 60 °C
- Ancho de extrusor: 0.4 mm
- Espesor de capa: 0.2 mm
- Velocidad de impresión: 40 mm/s
- Patrón de relleno: cuadrícula (Grid).
- Densidad de relleno: 100%
- Número de carcasas: 2

Se imprime un total de 20 probetas para cada material a ensayar, disponiendo 5 probetas en 4 tandas de impresión, una tanda por carga a estudiar.

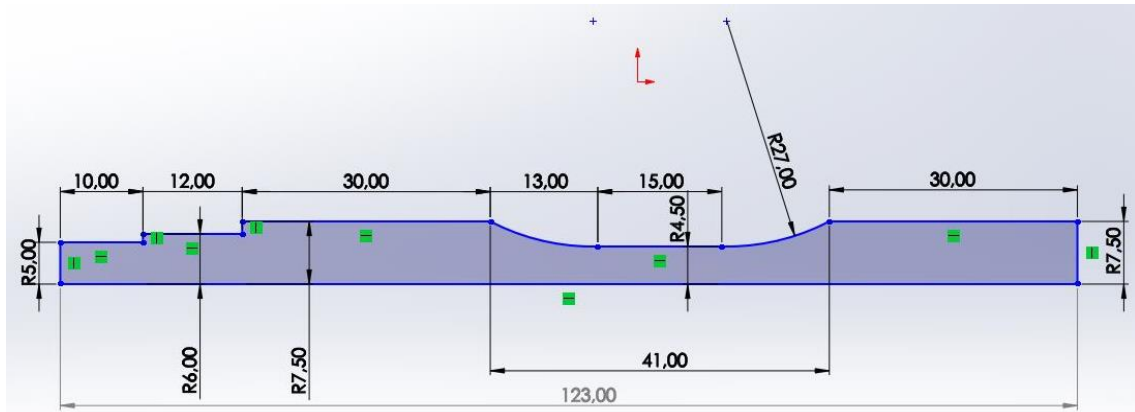
## 5.3 DISEÑO DE PROBETAS

Siguiendo el procedimiento planteado en el apartado 3.3.1, se exponen los primeros pasos: generación y laminado del modelo 3D.

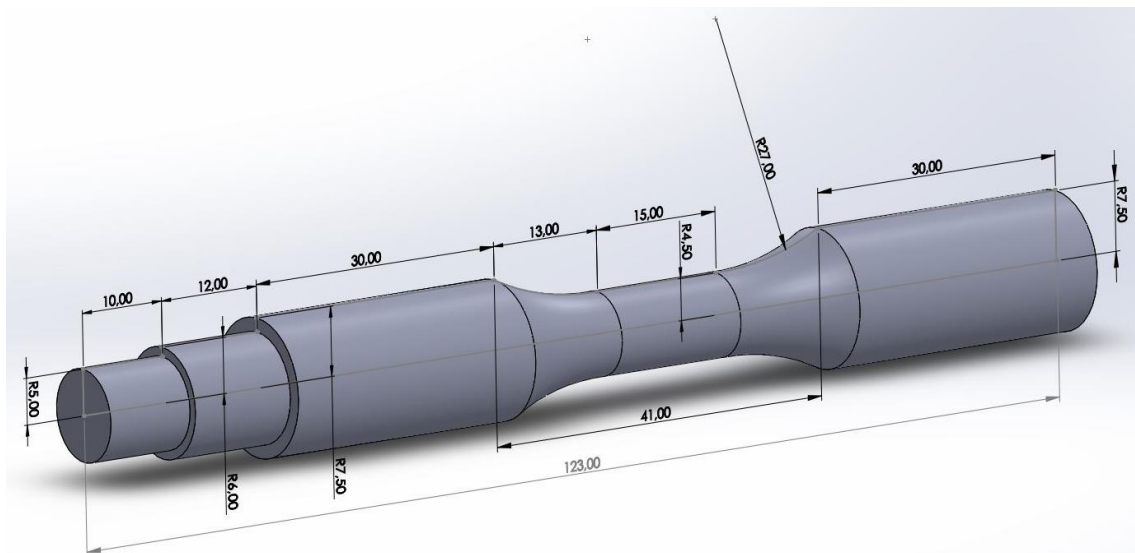
### 5.3.1 Generación modelo 3D en SolidWorks

El diseño de la geometría de las probetas se realiza de igual forma según investigaciones previas de esta área de Conocimiento, para seguir una estandarización y permitir un análisis entre todas ellas.

Dentro del software CAD SolidWorks, partimos del contorno croquis (Figura 21: a), para su posterior revolución (Figura 21: b).



(a)



(b)

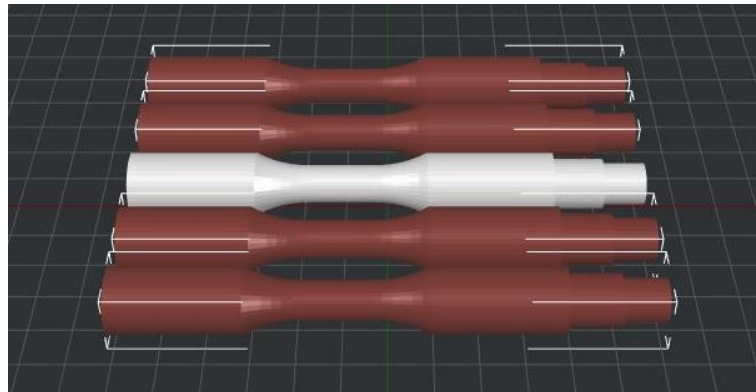
**Figura 21.** Modelado 3D de probeta en SolidWorks: croquizado (a) y revolución (b).

Una vez modelado, guardamos la pieza en extensión .STL, la cual permite el tratamiento en 3D para el siguiente laminado.

### 5.3.2 Laminado en IdeaMaker

El proceso de laminado se realiza mediante el software IdeaMaker, diseñado por Raise3D, fabricante a su vez de la impresora que utilizaremos a continuación, por lo que aseguramos compatibilidad de archivos.

Primeramente importamos el archivo .stl de nuestra probeta al entorno IdeaMaker. Para realizar la tanda de impresión de 5 probetas, usamos la herramienta Duplicar, completando el modelado (Figura 22).



**Figura 22.** Importación del modelo en IdeaMaker.

Seguidamente, se crea una plantilla de laminado, registrando los parámetros de impresión seleccionados anteriormente para aplicar sobre el modelo para su laminación. Así, el software nos muestra a su vez la estimación de tiempo, peso de material y coste de la impresión (Figura 23).

**Resultado de impresión estimado** ✕

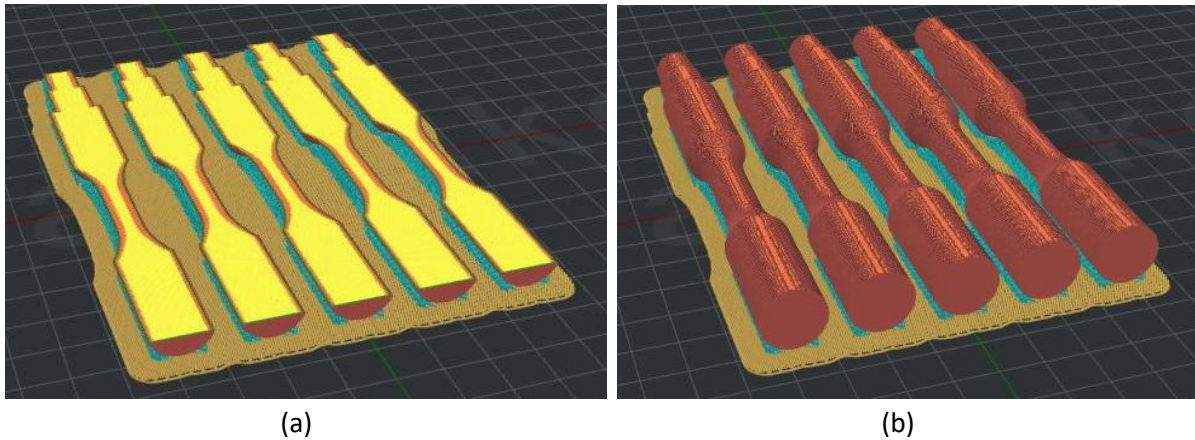
Archivo de impresión preparado:	Probeta.gcode
Tiempo de impresión estimado:	14 horas, 3 minutos, 53 segundos
Cantidad estimada:	114.0 g / 38.23 m
Precio estimado:	€ 3.42

Nota: El resultado anterior es solo de referencia.

**Figura 23.** Laminado en IdeaMaker, estimación de costos.

Tras estos ajustes, el laminador genera el código G, el cual interpretará la impresora para la ejecución de la pieza.

El software permite previsualizar una simulación de impresión, donde se puede observar los movimientos capa a capa que realizará la impresora hasta completar la fabricación (Figura 24).



**Figura 24.** Vista previa impresión en IdeaMaker: primera mitad de pieza (a), y aspecto final (b).

El último paso del laminado será la exportación de los archivos de impresión a disco local (USB) para llevarlo a la impresora.

#### 5.4 IMPRESIÓN DE PROBETAS

Continuamos los pasos del apartado 3.3.1., pasando a la impresión de las piezas o probetas y su extracción, además del postprocesado necesario.

##### 5.4.1 Impresora Raise3D Pro2

Se emplea para la impresión el equipo de Raise3D, modelo Pro2 (Figura 25).



**Figura 25.** Impresora Raise3D Pro2. [36]

Este se caracteriza por su sistema de extrusión dual con cabezales retráctiles, evitando choques del extrusor inactivo con la capa de impresión. Permite por tanto la combinación de dos variaciones de impresión simultánea, ya sea en materiales, colores, diámetros de extrusión, u otros parámetros de impresión.

Cuenta con una superficie de impresión de 305 x 305 x 300mm, y permite impresiones desde altura de capa 0,01mm y temperaturas de hasta 300°C.

Por otra parte, el acceso a su interfaz de control mediante pantalla táctil permite un fácil y cómodo acceso a sus ajustes, además de incluir otros útiles como cámara y conexión wifi (Figura 26).

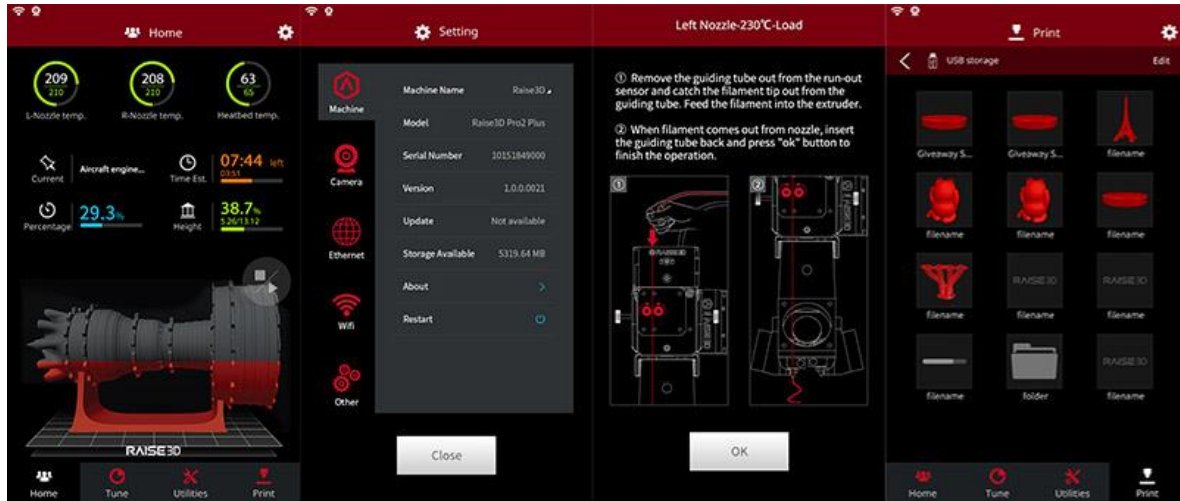
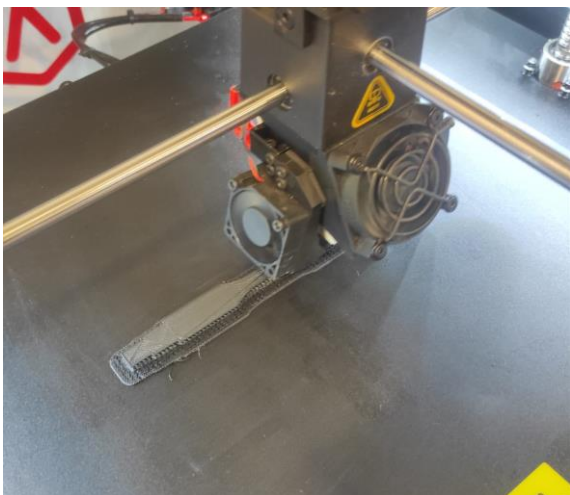


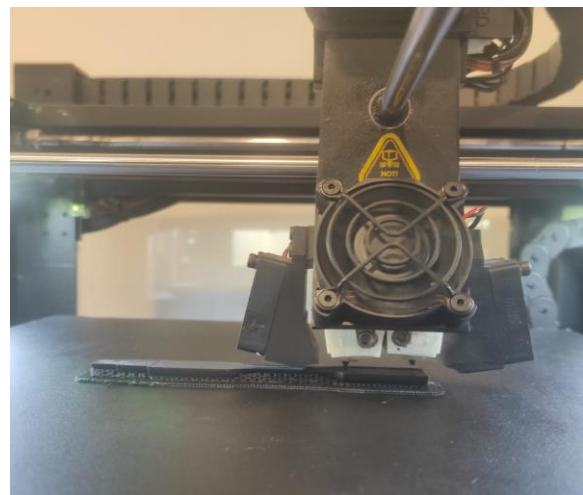
Figura 26. Interfaz de la pantalla táctil de Impresora Raise3D Pro2. [37]

#### 5.4.2 Proceso de impresión

Para el proceso de impresión, se carga el material correspondiente en el extrusor a utilizar de la impresora, y accedemos al archivo **.gcode** de la unidad de almacenamiento, para iniciar la impresión con los parámetros elegidos. Para confirmar la correcta impresión con los parámetros seleccionados, se realiza una impresión de prueba de una sola probeta (Figura 27).



(a)



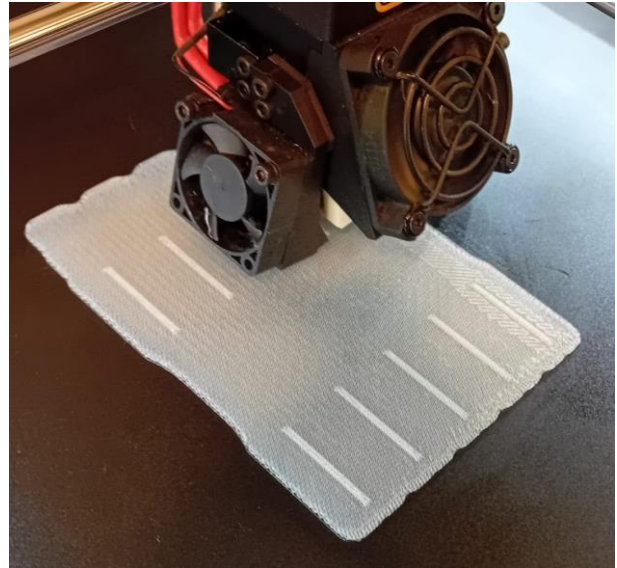
(b)

Figura 27. Impresión de prueba probeta individual: vista superior (a), y vista frontal (b).

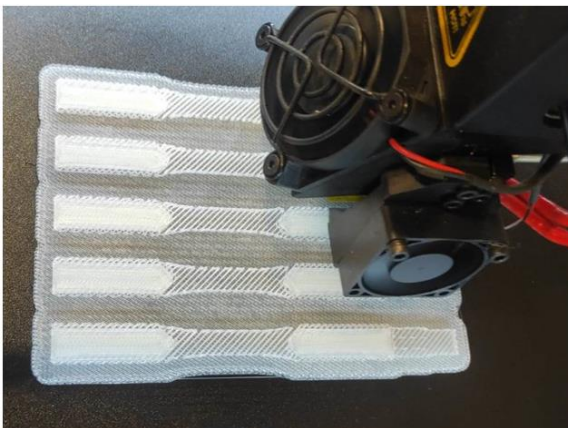
Seguidamente, se realizan las impresiones de las probetas, en tandas de 5 unidades (Figura 28).



(a)



(b)



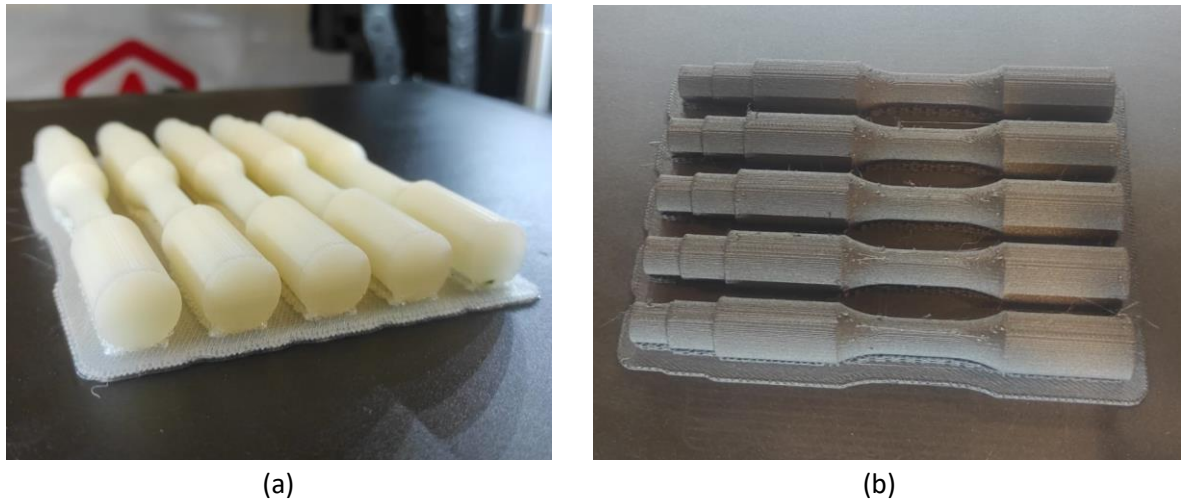
(c)



(d)

**Figura 28.** Proceso impresión 5 probetas: pantalla de control (a), balsa (b), primeras capas y soportes (c), y vista general (d).

Todas las impresiones se completaron correctamente sin fallos de impresión.

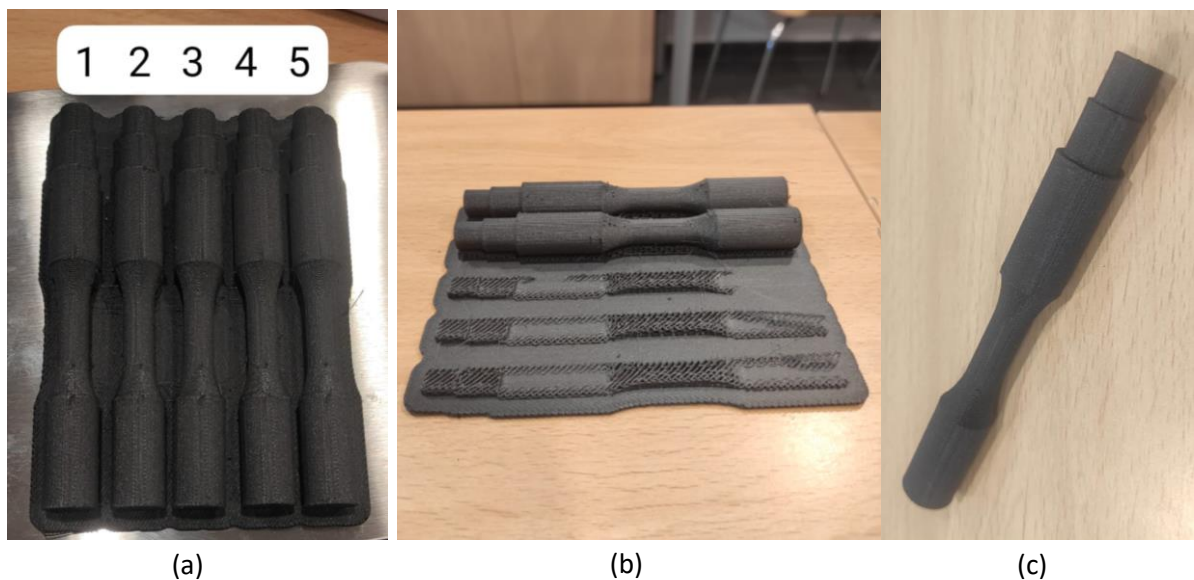


**Figura 29.** Obtención impresión 5 probetas: PLA HR-3D870 (a) y PLA Textura (Celulosa) (b).

#### 5.4.3 Extracción y postprocesado de las probetas

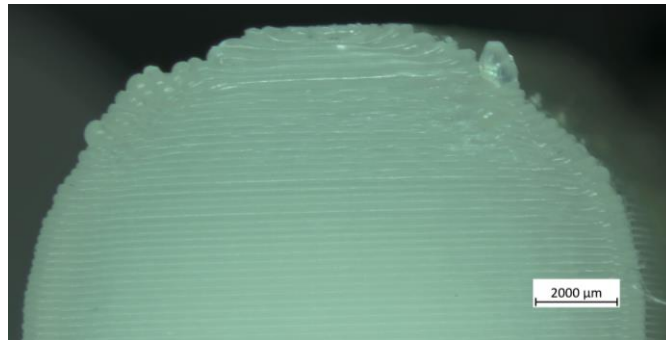
Completada la impresión, se retira la tanda de probetas junto con la balsa base creada de la superficie de la impresora.

Seguidamente, se numeran para su posterior control geométrico y seguimiento de resultados de los ensayos experimentales, y se separan las probetas de la balsa y los soportes (Figura 30).



**Figura 30.** Postprocesado de probetas: numeración (a), separación de balsa (b), resultado final (c).

En las impresiones con PLA 870 se observa mayor adherencia de las probetas a los soportes, y cierta deformación de la sección de la pieza en las primeras capas (Figura 31), seguramente debido a una excesiva temperatura de la cama o entorno de impresión.



**Figura 31.** Deformación térmica en las primeras capas de impresión en PLA HR-3D870.

Esta deformación no se considera un problema, ya que puede afectar al control dimensional de los extremos, pero no a la sección principal que entra en juego en el estudio de la fatiga mediante el ensayo.

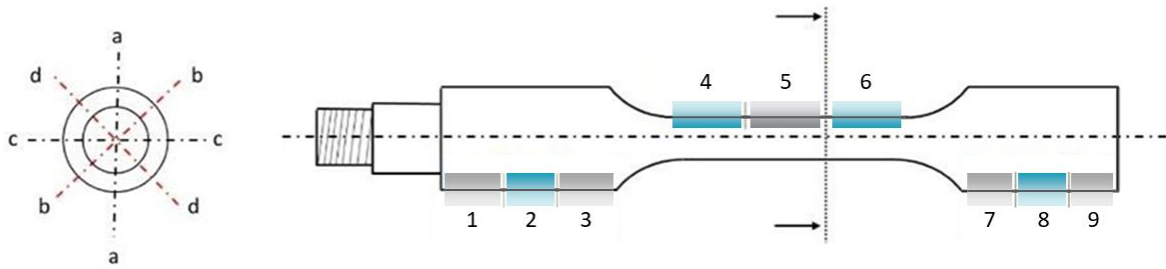
### 5.5 CONTROL MACROGEOMÉTRICO

Como control dimensional de las probetas, se realizan distintas mediciones de los diámetros de las mismas (Figura 32), siendo de mayor interés los diámetros de la parte central de la probeta, la sección de fallo de la misma al ser la menor del conjunto. Para ello se emplea un micrómetro digital de exteriores, de la marca Mitutoyo. Su rango de medición es de 0 a 25mm, y su precisión de 0.001mm.



**Figura 32.** Control dimensional de diámetros, con micrómetro milesimal de exteriores.

Las mediciones se realizan en 9 secciones (1-9) de la probeta, tomando 4 diámetros (a, b, c, d) para cada sección (Figura 33).



**Figura 33.** Metodología de medición de diámetros.

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

### 5.6 ENSAYO DE FATIGA A FLEXIÓN ROTATIVA

Una vez realizadas las impresiones de las probetas y su control dimensional según los apartados anteriores, se procede a su ensayo experimental de fatiga a flexión rotativa. Para los ensayos se utiliza una máquina diseñada y fabricada por la Universidad de Málaga.

La máquina se trata de, resumidamente, un motor rotacional situado en una bancada estructural, el cual sujetará la probeta en un extremo mediante el plato de garras, haciéndola girar, mientras del otro extremo libre de la probeta, se coloca un rodamiento bajo el que se suspende la carga en cuestión del ensayo (Figura 34).



(a)



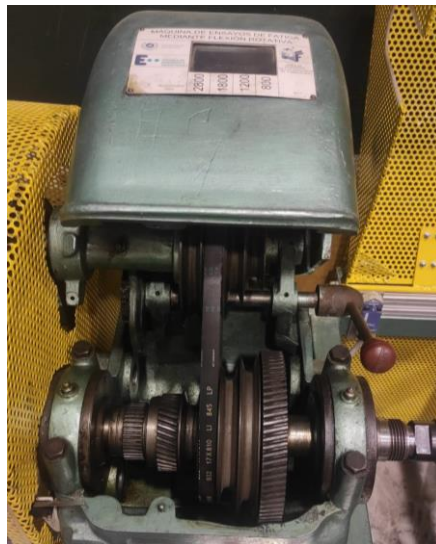
(b)

**Figura 34.** Máquina de ensayos de fatiga mediante flexión rotativa: vista general (a) y principio de funcionamiento (b).

Gracias al rodamiento, aunque la probeta se encuentre girando, la carga permanecerá perpendicular al eje de giro, actuando a flexión sobre la probeta. Esta combinación de flexión-rotación resulta una carga cíclica de amplitud constante, permitiendo evaluar el comportamiento a fatiga de la probeta colocada.

La máquina dispone de un contador de ciclos mediante sensor inductivo, así como un sistema de detención cuando la carga cae debido al fallo de la probeta, determinando la vida a fatiga de la misma.

Además, la velocidad de giro del motor puede ser regulada a 4 valores preestablecidos, entre 800 y 2.800 rpm, según las necesidades del ensayo. En este caso, se fija la máquina a 1.800 rpm para todos los ensayos del Estudio (Figura 35).



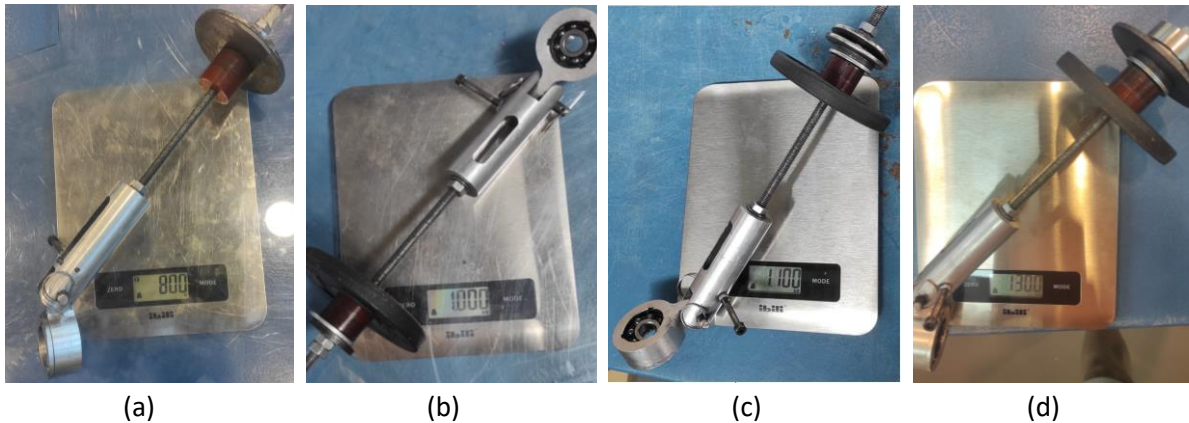
**Figura 35.** Selección de velocidad de rotación del eje a 1.800 rpm.

### 5.6.1 Realización de los ensayos

Una vez fabricadas las probetas, 20 unidades para cada material, se procede a su colocación en la máquina y puesta en funcionamiento de la misma.

Para la representación de las curvas S-N del comportamiento a fatiga de los materiales, nos servimos de 4 cargas a aplicar sobre las probetas. Se toman como cargas 0,8; 1,0; 1,1 y 1,3 kg.

La configuración de estas se logra añadiendo o eliminando elementos del módulo de carga del rodamiento, sean discos de hierro, arandelas y tuercas (Figura 36).



**Figura 36.** Configuración de las cargas de ensayo: 0,8 kg (a); 1,0 kg (b); 1,1 kg (c); 1,3 kg (d).

Una vez configurada la carga adecuada, la puesta en marcha del equipo de ensayo requiere colocar la probeta en el rodamiento por el extremo de menor diámetro. El rodamiento queda en la segunda sección menor de la pieza, de 12mm de diámetro. Sobre la sección menor, de 10mm de diámetro, se realiza una operación de roscado mediante una terraja de M10, para la colocación de una tuerca como sistema de seguridad para evitar que el rodamiento pueda escapar de la probeta (Figura 37).



**Figura 37.** Roscado M10 en probeta de PLA Textura (Celulosa).

Seguidamente, se fija el otro extremo de la probeta al plato de garras del eje rotativo, ajustando correctamente el apriete (Figura 38: a).



(a)



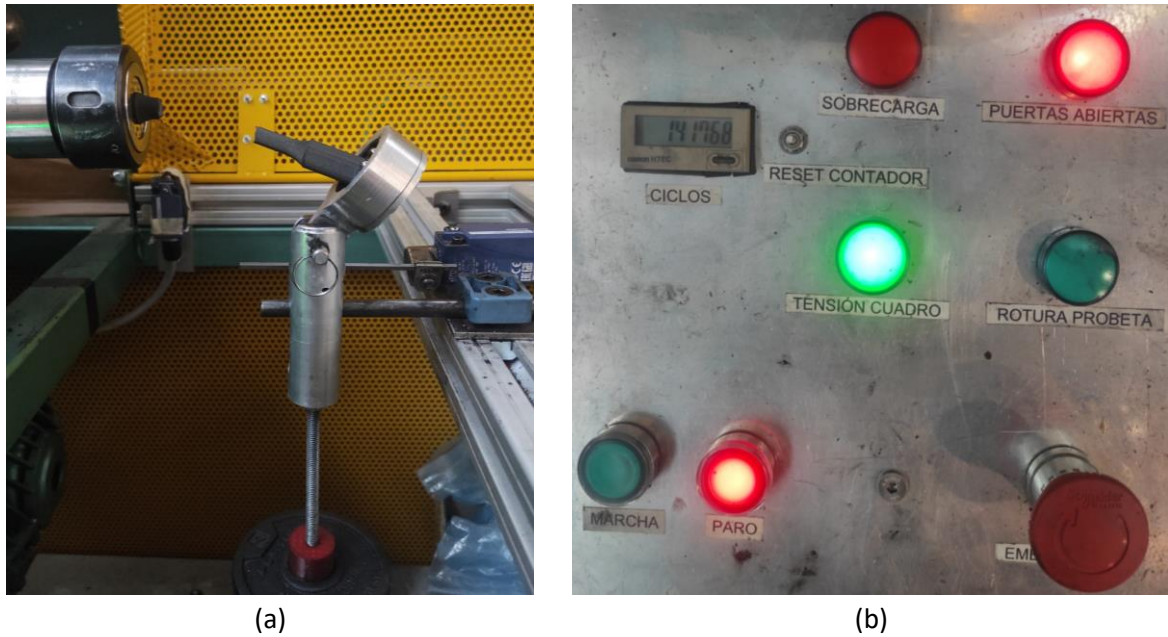
(b)

**Figura 38.** Colocación probeta a ensayar: fijación en plato de garras (a) y módulo de carga (b).

En la figura 38: b, se observan las fijaciones mencionadas de ambos extremos de la probeta, y el módulo de carga vertical. Su diseño y colocación permiten el accionamiento del final de carrera para detener la máquina en el momento de la rotura.

A partir de este momento, la probeta comienza a soportar carga a flexión, por lo que, una vez encendida la máquina y reseteado del contador de ciclos, se pone en funcionamiento.

En el momento de la rotura de la probeta, el módulo de carga cae, la máquina se detiene gracias al sistema de interruptor de parada, y se puede visualizar el número de ciclos alcanzado en el ensayo en el contador (Figura 39).



**Figura 39.** Final del ensayo: rotura de probeta (a) y contador de ciclos en el panel de control (b).

El número asignado a la probeta, la carga del ensayo y el número de ciclos hasta la rotura se registran en las Hojas de datos (Anexo I). Una vez anotado, se retira la probeta de la máquina.



**Figura 40.** Ejemplos de roturas de probetas.

Finalmente, también se mide y anota la longitud entre el punto de aplicación de la carga y el punto de rotura. Para ello se emplea un pie de rey digital, marca Mitutoyo (Figura 41).

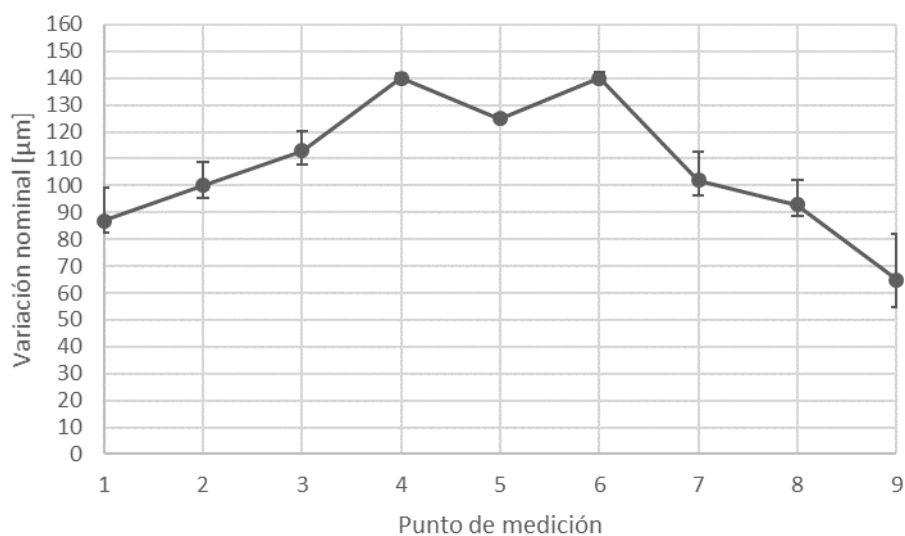


**Figura 41.** Medida longitud punto de carga-rotura.

## 6 Análisis del control dimensional

Tras la recopilación de mediciones dimensionales de los diámetros según el apartado 5.5, se procede al análisis de los datos, representándolos en gráficos y tablas.

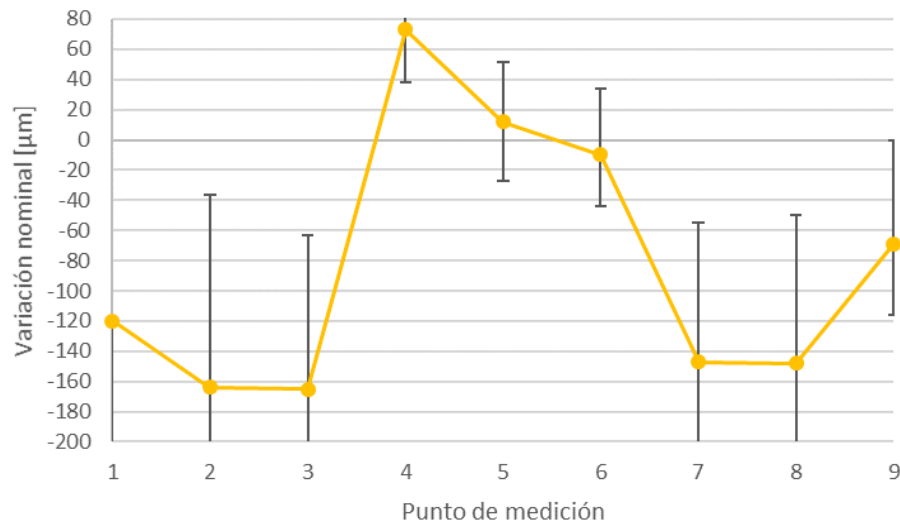
Dado que los parámetros de impresión no son modificados entre probetas, se representan las desviaciones entre el valor medio medido y el valor nominal, punto por punto, para las probetas en PLA Celulosa (Figura 42) y en PLA 870 (Figura 43).



**Figura 42.** Variación nominal en micras por cada punto de medición, PLA Textura (Celulosa).

Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Media [mm]	15,087	15,100	15,113	9,140	9,125	9,140	15,102	15,093	15,065
Desviación nominal [µm]	87	100	113	140	125	140	102	93	65
Desviación porcentual [%]	0,58	0,67	0,75	1,56	1,39	1,56	0,68	0,62	0,43

**Tabla 4.** Datos del control dimensional en probetas de PLA Textura (Celulosa).



**Figura 43.** Variación nominal en micras por cada punto de medición, PLA HR-3D870.

Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Media [mm]	14,880	14,836	14,835	9,073	9,012	8,990	14,853	14,852	14,931
Desviación nominal [μm]	-120	-164	-166	73	12	-10	-147	-148	-69
Desviación porcentual [%]	-0,80	-1,10	-1,10	0,81	0,13	-0,11	-0,98	-0,99	-0,46

**Tabla 5.** Datos control dimensional de probetas PLA HR-3D870.

En el análisis de los datos obtenidos, se realizan las siguientes observaciones:

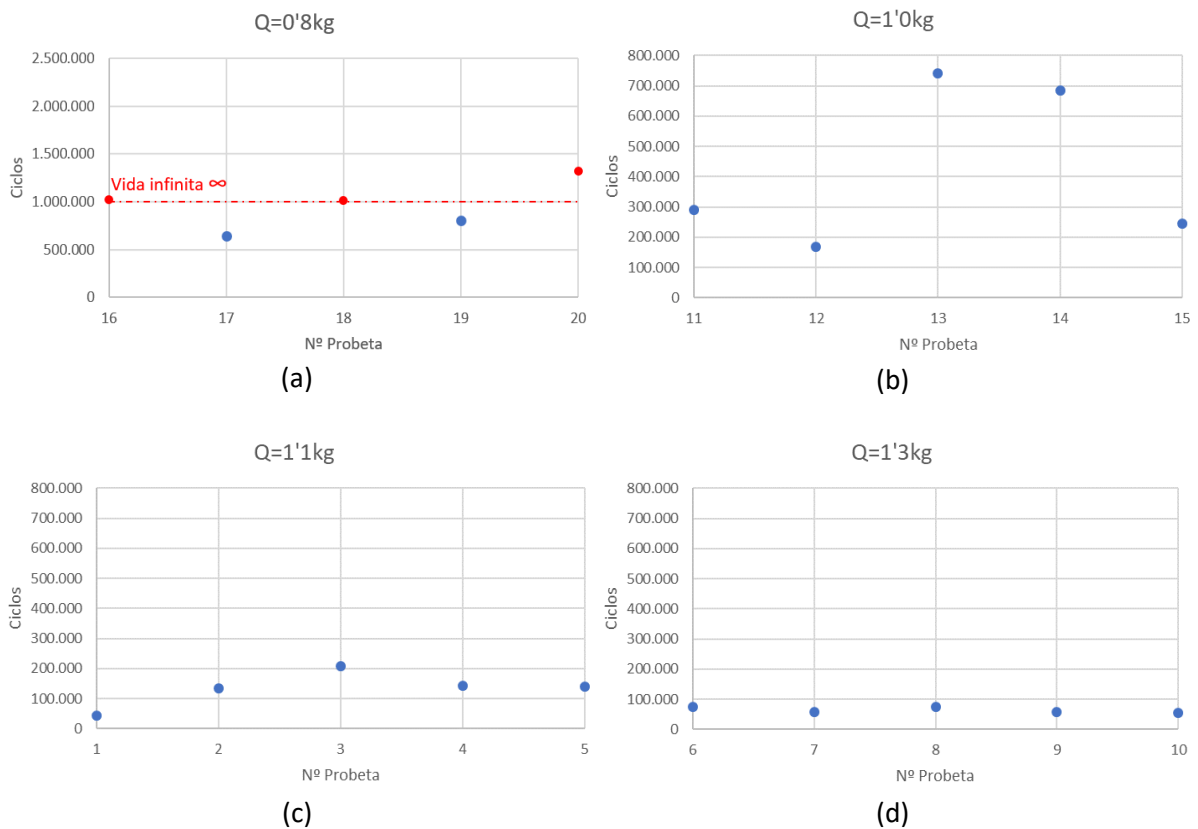
- Las desviaciones generales obtenidas son pequeñas, de entre -166 y 140 μm respecto al valor nominal modelado, correspondiendo con un -1'10% y 1'56% de desviaciones inferior y superior respectivamente.
- Para las probetas de PLA Celulosa, todas las desviaciones son superiores, y en un intervalo considerablemente estable (entre 65 y 140 μm).
- Para las probetas de PLA HR-3D870, se encuentran desviaciones inferiores en las mediciones de diámetro 15 mm (entre -69 y -166, mientras que en el diámetro 9mm combina superiores e inferior (entre -10 y 73 μm).
- El control geométrico para PLA Celulosa se observa más estable, pudiendo deberse a que la celulosa ayuda a disipar la temperatura y homogeneizar el enfriamiento, produciendo menores contracciones y deformaciones.

Por tanto, para el PLA Celulosa resumimos una desviación superior media de 107 μm, mientras que para el PLA 870 vemos una desviación inferior media de -136 μm para los diámetros de 15 mm, y de 25 μm para el de 9 mm, siendo este último el correspondiente a la zona central calibrada, donde la pieza rompe en los ensayos de fatiga.

Estas diferencias entre materiales se pueden entender por el efecto warping, la variación de dilatación y contracción térmica extrema que sufre el filamento al ser extruido, depositado, y enfriado, siendo mayor en el PLA 870.

## 7 Análisis de los resultados de los ensayos a fatiga

El ensayo de fatiga se corresponde a un tipo de ensayo con una notable variabilidad, en los que distintas afecciones a la probeta pueden modificar su vida a fatiga. Para visualizar esta variación de los resultados, se presentan gráficos Ciclos-Probeta para cada caso de carga, sean Figura 44 para PLA Celulosa, y Figura 45 para PLA 870. Estas diferencias se encuentran de forma más extendida en el Anexo I.



**Figura 44.** Resultados ciclos PLA Textura (Celulosa): 0,80 kg (a); 1,00 kg (b); 1,10 kg (c); 1,30 kg (d).

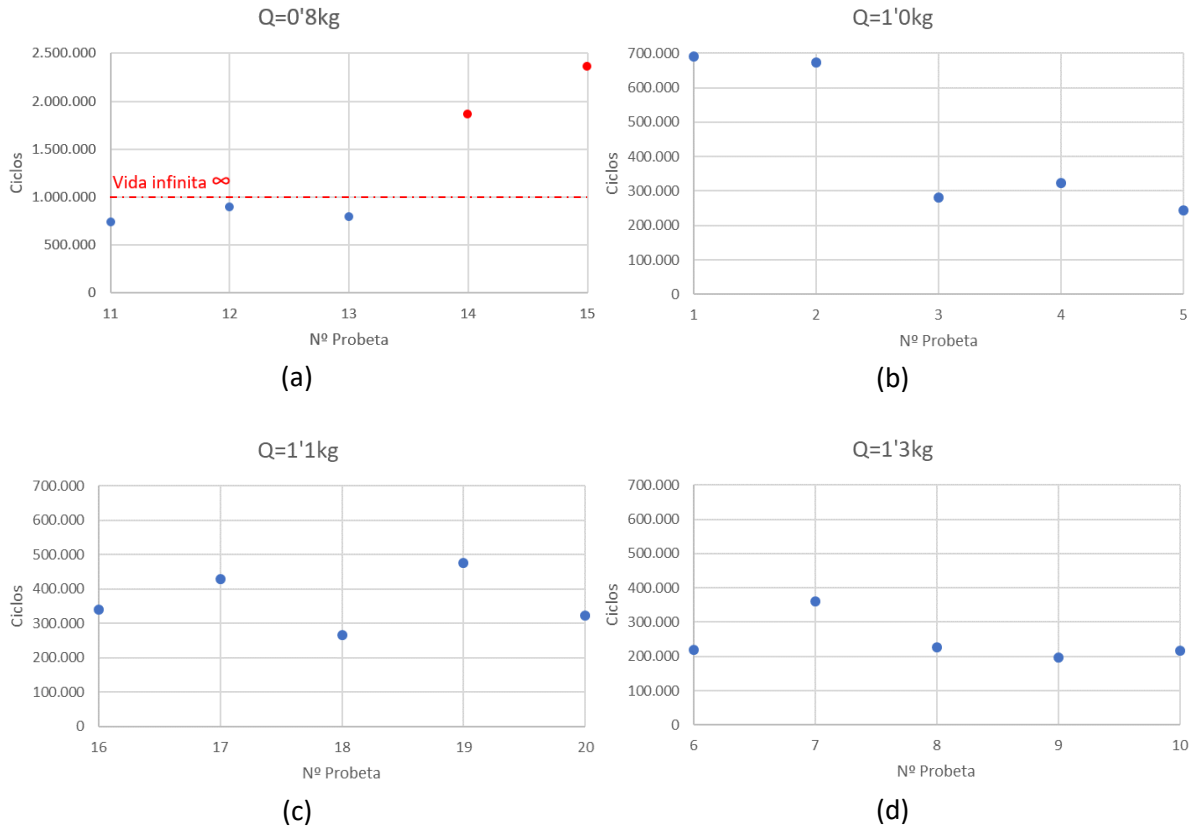


Figura 45. Resultados ciclos PLA HR-3D870: 0,80 kg (a); 1,00 kg (b); 1,10 kg (c); 1,30 kg (d).

Seguidamente, se resumen los ciclos de vida media para cada carga de ensayo estudiada, en ambos materiales (Tabla 6 y 7).

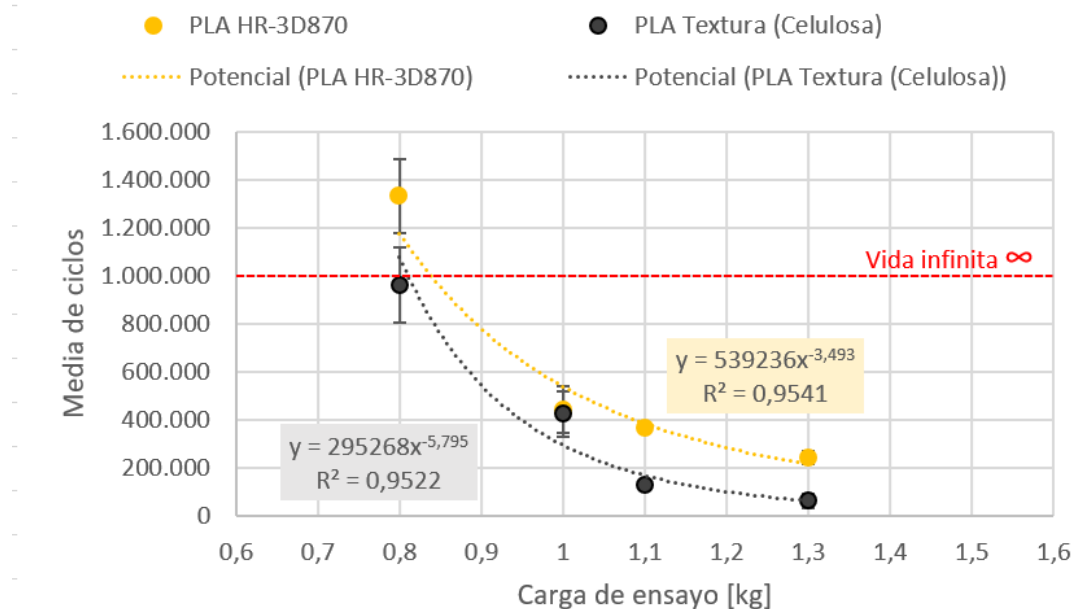
Carga de ensayo [kg]	Valor medio de ciclos
0'80	961.198
1'00	425.675
1'10	132.780
1'30	64.164

**Tabla 6.** Resumen ciclos medios en probetas de PLA Textura (Celulosa).

Carga de ensayo [kg]	Valor medio de ciclos
0'80	1.331.180
1'00	433.046
1'10	366.850
1'30	244.252

**Tabla 7.** Resumen ciclos medios en probetas de PLA HR-3D870.

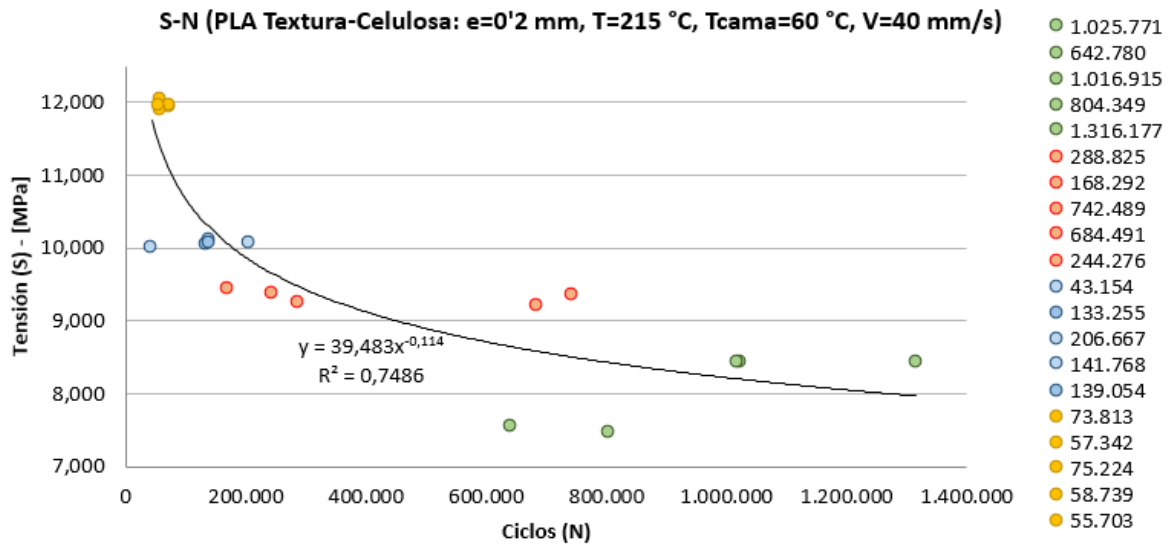
Se observa similitud de resultado para ambos materiales para 1,00 kg de carga, sin embargo, para 0,80 kg, 1,10 kg y 1,30 kg de carga, el PLA 870 se muestra claramente superior en comportamiento a fatiga, considerando una vida del triple de ciclos (Figura 46).



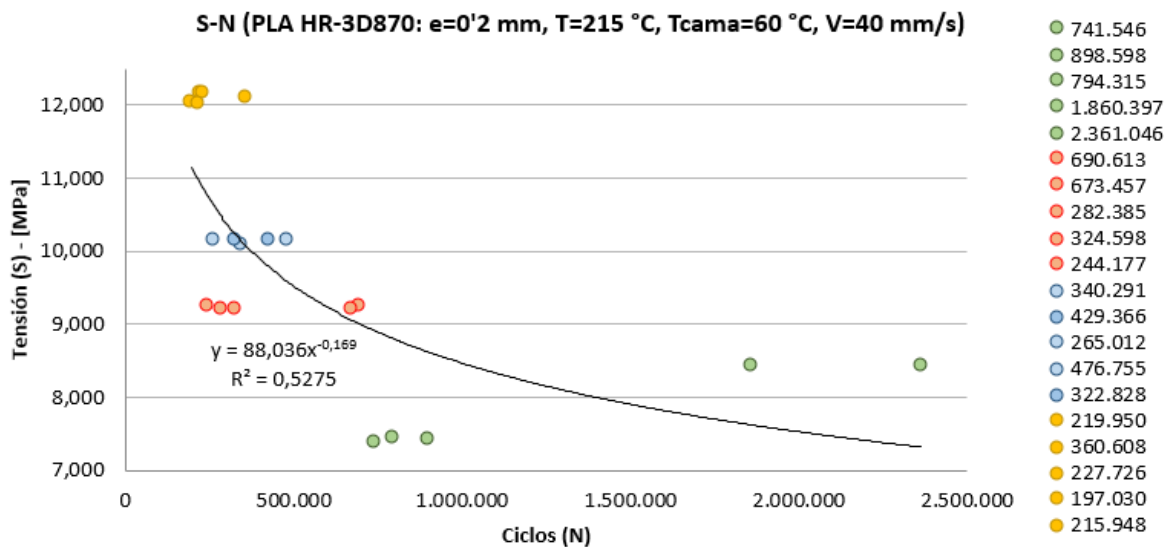
**Figura 46.** Comparación ciclos medios PLA Textura (Celulosa) y PLA HR-3D870.

Se muestran las barras de error entre los ciclos máximos y mínimos reales y su valor medio. Además de la línea de tendencia potencial, con un  $R^2$  de 0'9522 y 0'9541 para PLA Celulosa y PLA 870 respectivamente, lo cual resulta una excelente aproximación.

No obstante, ya que en las gráficas anteriores se muestran únicamente valores medios, a continuación, se representan gráficamente los resultados de S-N (Tensión-Ciclos) en su totalidad, (Figuras 47 y 48).



**Figura 47.** Gráfica S-N para PLA Textura (Celulosa).



**Figura 48.** Gráfica S-N para PLA HR-3D870.

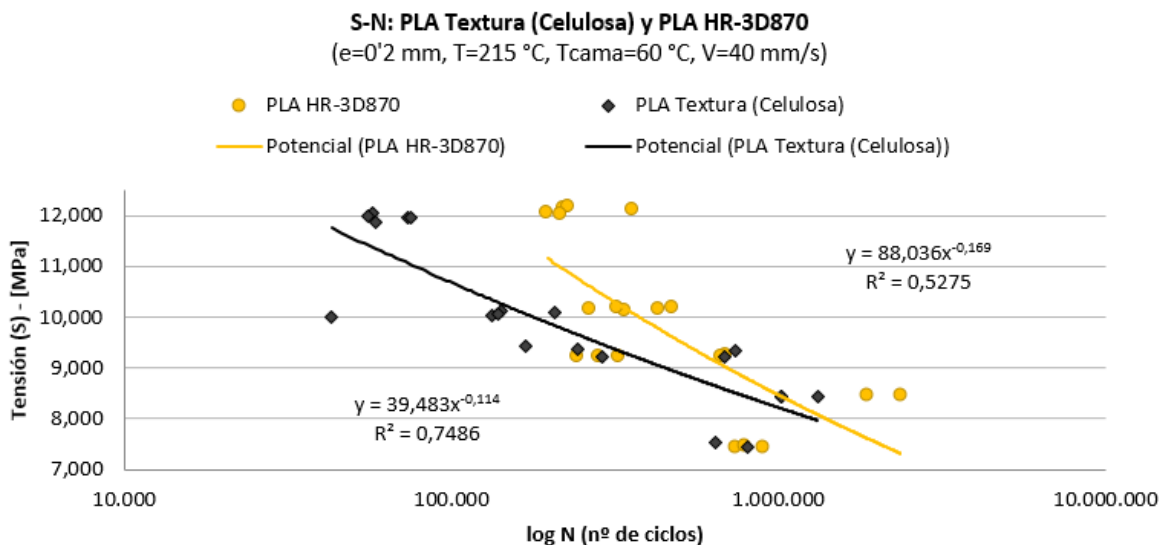
Se observa un ajuste  $R^2$  de 0,75 para PLA con celulosa, considerado un buen ajuste para resultados experimentales de fatiga, y de 0,53 para PLA 870, el cual resulta menos preciso, pero dentro del margen esperable en este tipo de estudios, teniendo en cuenta que los ensayos de fatiga generalmente arrojan una elevada dispersión, y que la variabilidad dentro de la fabricación aditiva es también elevada.

En la Tabla 8, se resume la distancia media entre el punto de carga y el punto de rotura de las probetas, para cada material y valor de carga. Se muestran longitudes muy uniformes en las probetas de PLA 870, mientras que en PLA con celulosa tiende a una mayor longitud con una menor carga.

	Carga [kg]	Distancia media Carga-Rotura (L-x) [mm]
<b>PLA Textura (Celulosa)</b>	0,80	68,38
	1,00	68,05
	1,10	66,77
	1,30	67,19
<b>PLA HR-3D870</b>	0,80	67,73
	1,00	67,41
	1,10	67,41
	1,30	67,96

**Tabla 8.** Distancia media entre punto de carga y punto de rotura.

En la Figura 49, se comparan las curvas S-N de ambos materiales, en escala logarítmica.



**Figura 49.** Gráfica S-N: PLA Textura (Celulosa) vs PLA HR-3D870.

Se observa una mejor respuesta a fatiga del PLA 870 respecto al PLA Celulosa. El comportamiento para 1,00 kg de carga es prácticamente igual en ambos materiales, y muy similar en la carga inferior. Sin embargo, para las cargas de 0,80; 1,10 y 1,30 kg, la respuesta de vida a fatiga del PLA con celulosa resulta inferior (casi 4 veces menor con la carga de 1,30 kg, y casi 3 veces menor con 1,10 kg).

## 8 Fractografía

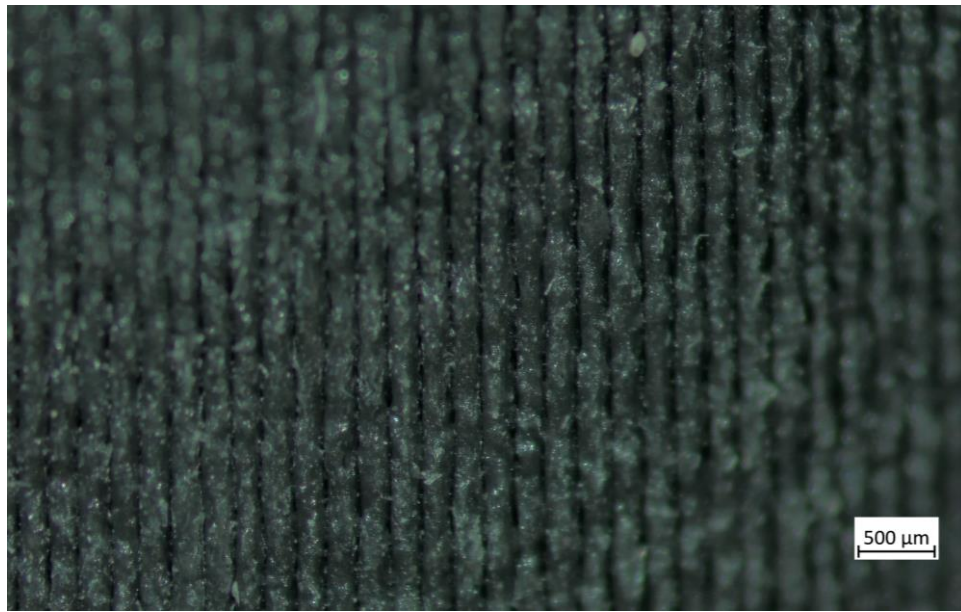
La fractografía es la rama de ciencia de los materiales que estudia las fracturas de estos, para entender cómo y por qué se rompen. Por tanto, resulta un estudio complementario a realizar tras los ensayos de fatiga, observando las secciones producidas tras los fallos.

Para llevarlo a cabo, se utiliza un microscopio marca Zeiss, equipado con una cámara Axiocam 208 color (Figura 50), permitiendo visualizar y ajustar una imagen en directo de la pieza y zona deseada, a través del software ZEN core. En general se emplea un zoom x8.



**Figura 50.** Microscopio Zeiss con Axiocam 208 color.

Una primera observación será el acabado superficial de ambos materiales (Figura 51). Con un zoom x20, llama la atención la nitidez de disposición de capas en PLA con celulosa, mientras que en el PLA 870, aunque también visibles las capas, se intuye una mayor adhesión de capas, además de una destacada coloración verde bajo el efecto de la luz y el zoom.



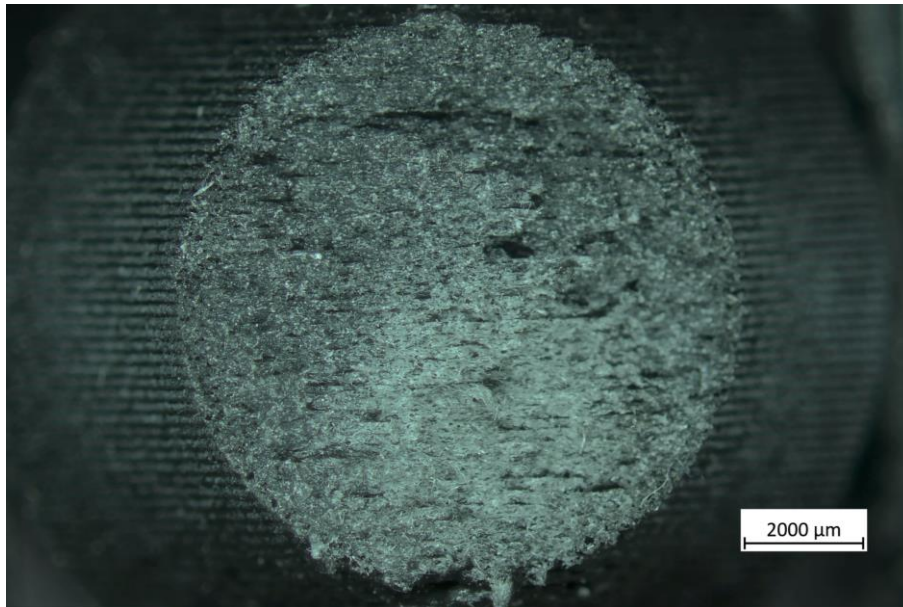
(a)



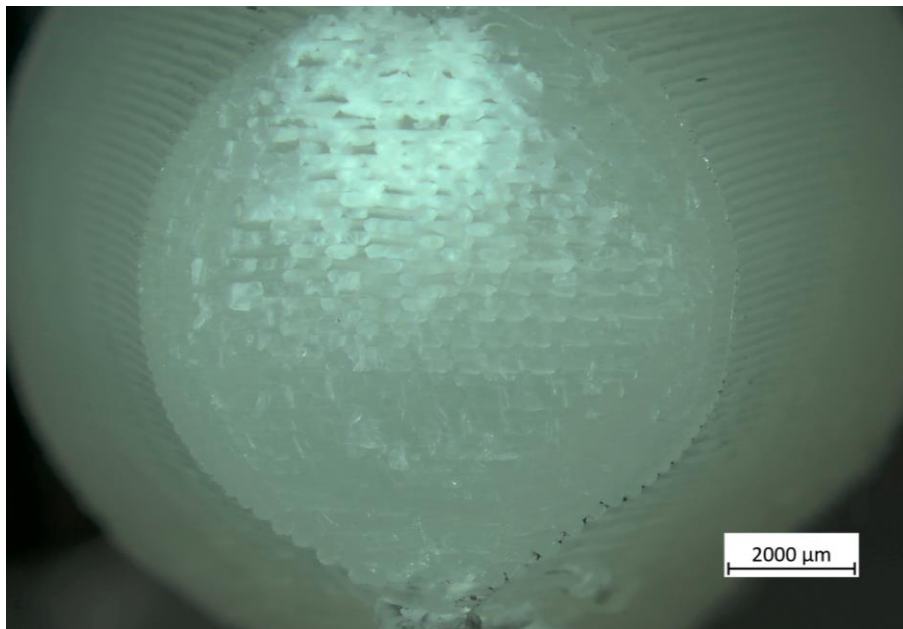
(b)

**Figura 51.** Acabado superficial (x20): PLA Tectura (a) y PLA HR-3D870 (b).

Mediante observación macroscópica, se perciben fracturas sustancialmente diferentes entre ambos materiales (Figura 52), siendo a su vez muy similares entre sí las probetas del mismo material.



(a)

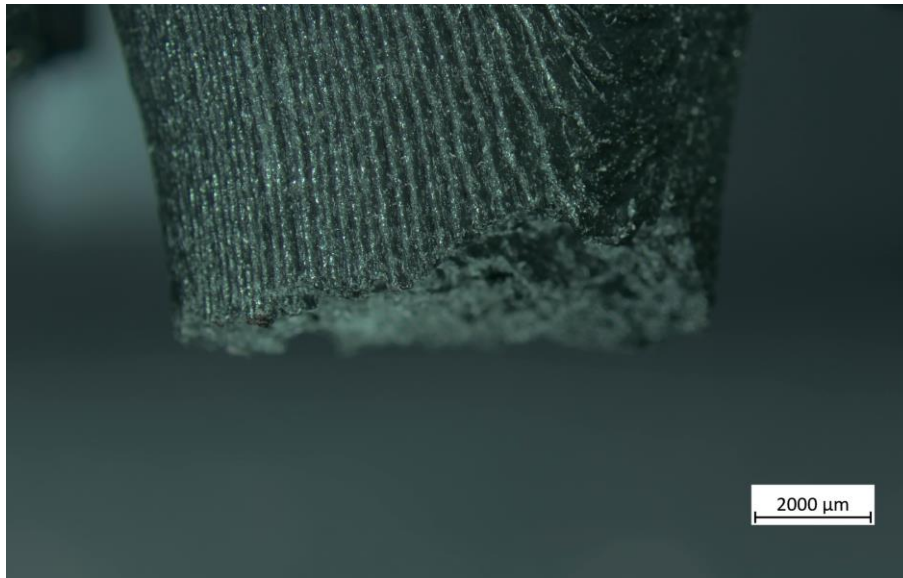


(b)

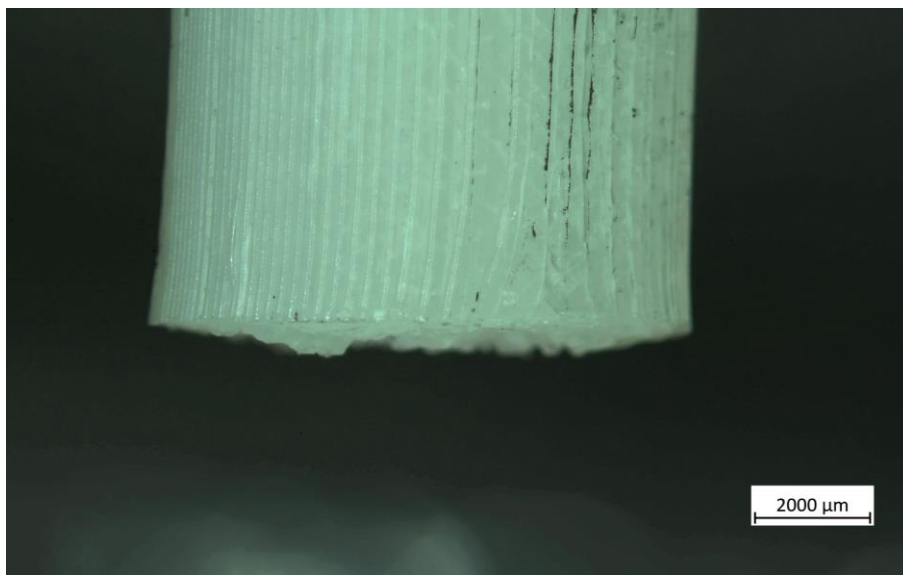
**Figura 52.** Fractografía tipo (x8): PLA con celulosa (a) y PLA HR-3D870 (b).

En ambos materiales, aunque con mayor claridad en el PLA 870 dado su color y brillo, se pueden distinguir en general dos zonas: una zona más oscura, correspondiente a una rotura de tipo más frágil, y una zona más clara, correspondiente a una rotura dúctil.

Otro aspecto a observar en las fracturas de cada material, es el perfil de la sección. Mientras en el PLA con celulosa resulta más irregular y granulada, en el PLA 870 se produce una sección prácticamente coplanaria de todas las capas, perpendicular al eje (Figura 53).



(a)

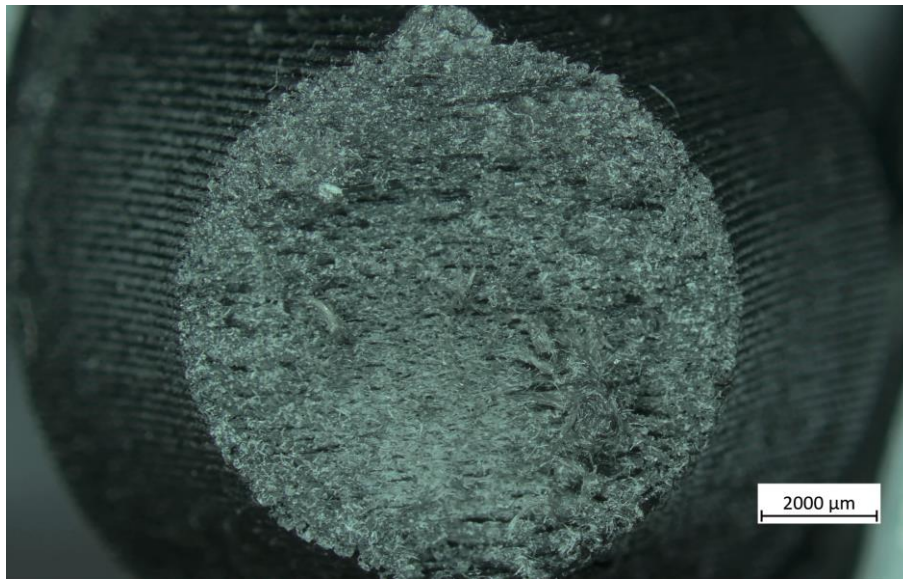


(b)

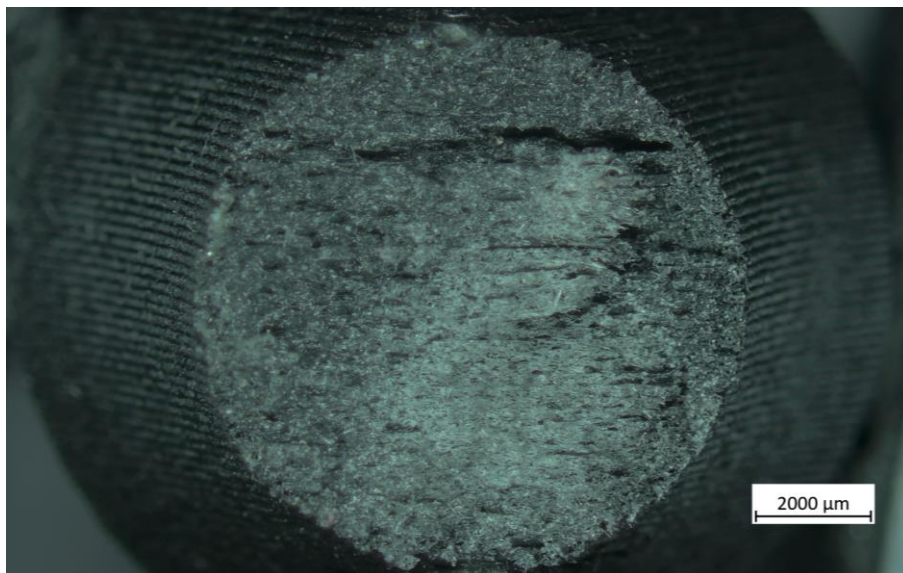
**Figura 53.** Fractografía perfil tipo (x8): PLA con celulosa (a) y PLA HR-3D870 (b).

Posteriormente, analizamos algunas roturas con especial interés, encontrando las siguientes:

En probetas de PLA con celulosa, sorprende la diferencia de vida a fatiga entre dos probetas para la misma carga, probetas 12 y 13. Observando las fractografías (Figura 54), la Probeta 12 presenta una zona dúctil más extendida, presentando además señas de torsión, mientras que la probeta 13 presenta una sección común a la mayoría, con una menor zona dúctil.



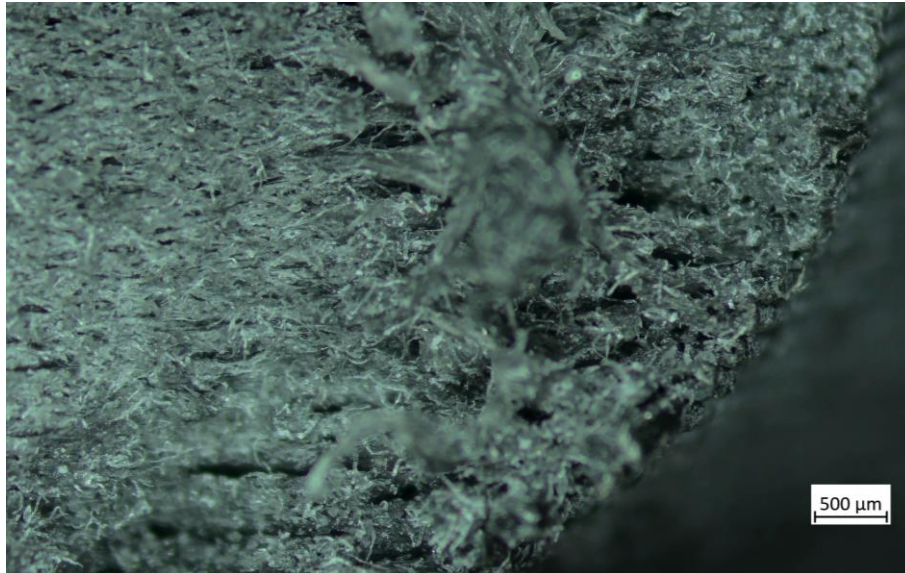
(a)



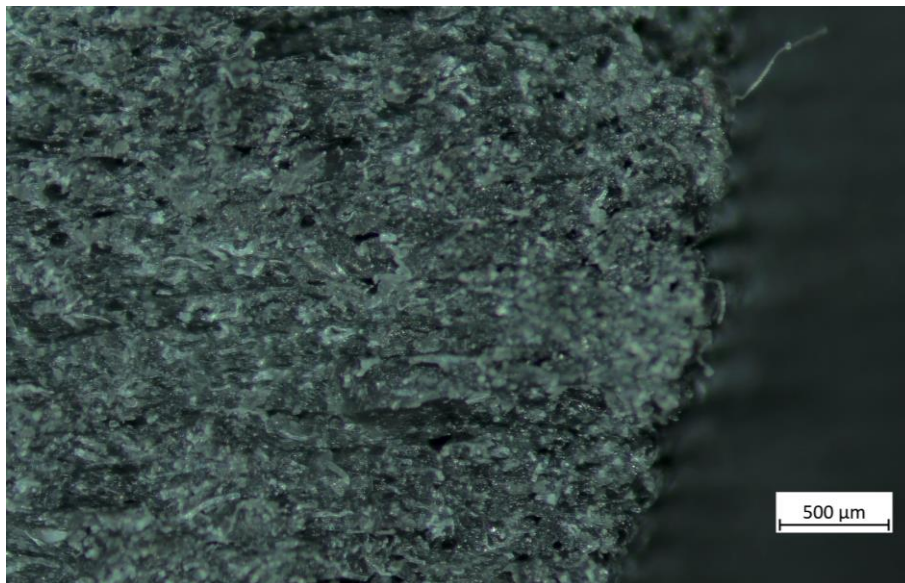
(b)

**Figura 54.** Fractografía PLA Celulosa (x8): P12 [168.292 ciclos] (a) y P13 [742.489 ciclos] (b).

Mientras que la probeta 12 (Figura 55: a) presenta color más claro (dúctil), puntos de peor adhesión entre capas, y torsión, la probeta 13 (Figura 55: b) presenta color más oscuro (frágil), y mejor adhesión de capas.



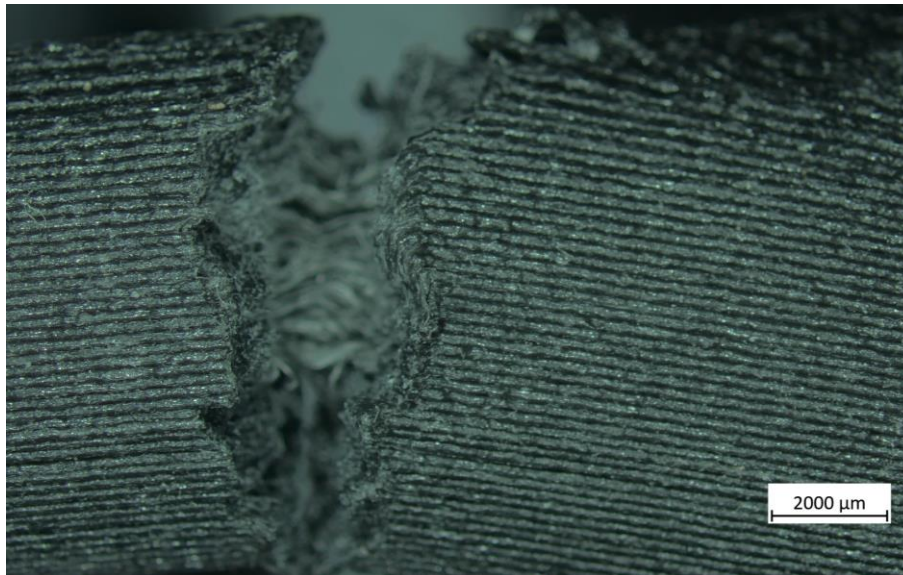
(a)



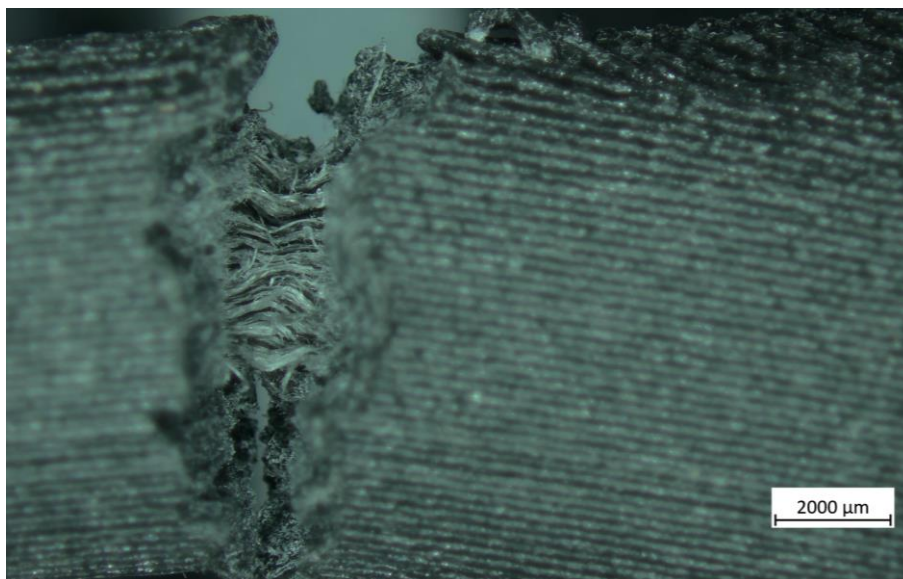
(b)

**Figura 55.** Fractografía PLA Celulosa (x20): P12 [168.292 ciclos] (a) y P13 [742.489 ciclos] (b).

Otras roturas a destacar son las probetas 1 (Figura 56) y probeta 9 (Figura 57), presentando rotura incompleta. Esto se debe a la plastificación de las fibras, experimentando finalmente el efecto de la torsión.

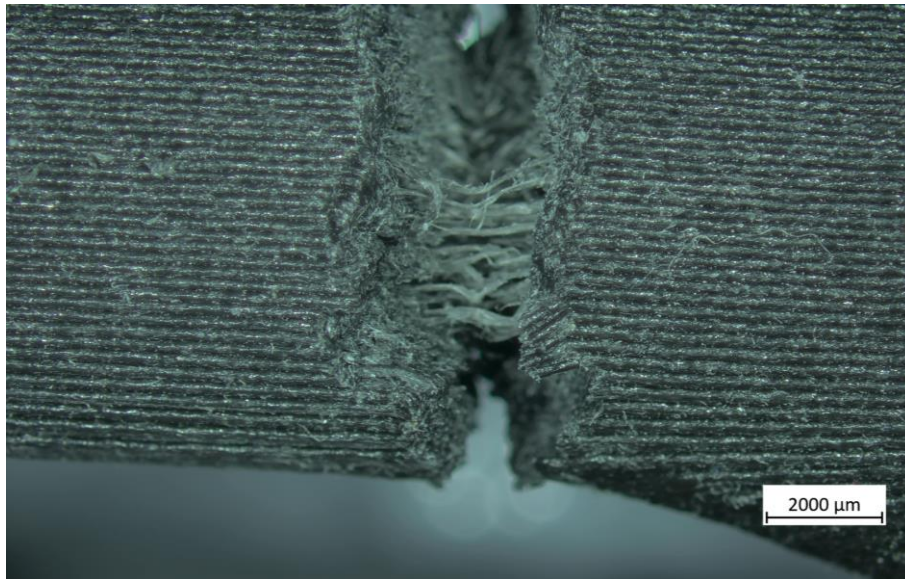


(a)

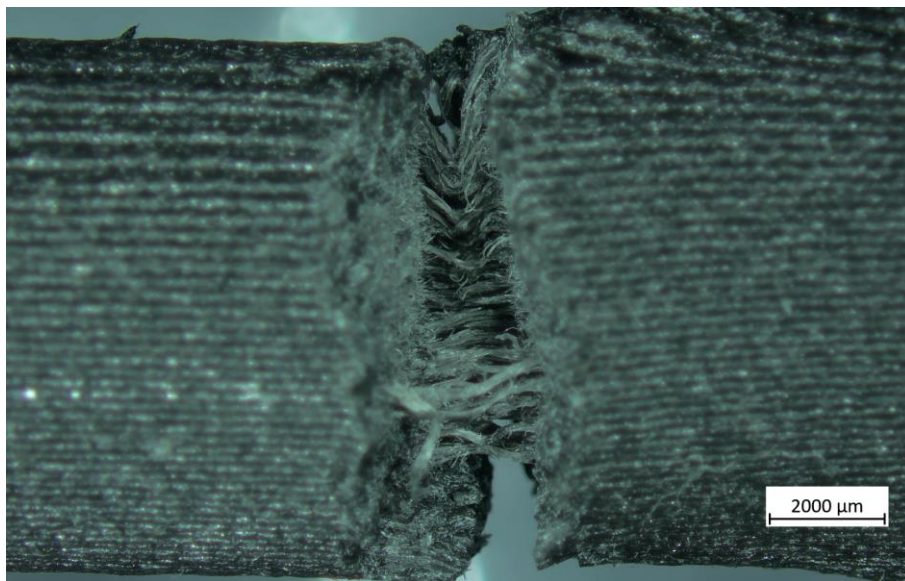


(b)

**Figura 56.** Rotura incompleta P1 PLA Celulosa (x8): Capas externas (a) y Capas internas (b).



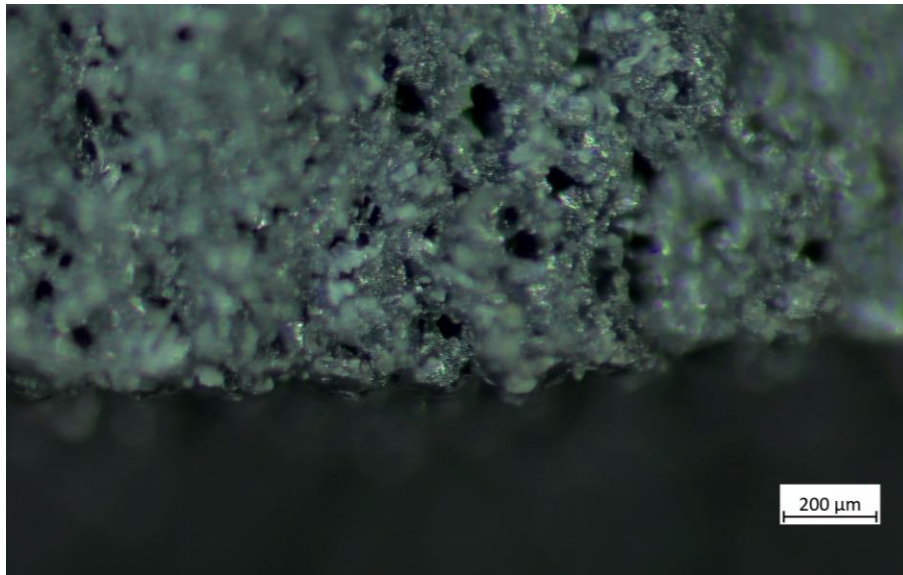
(a)



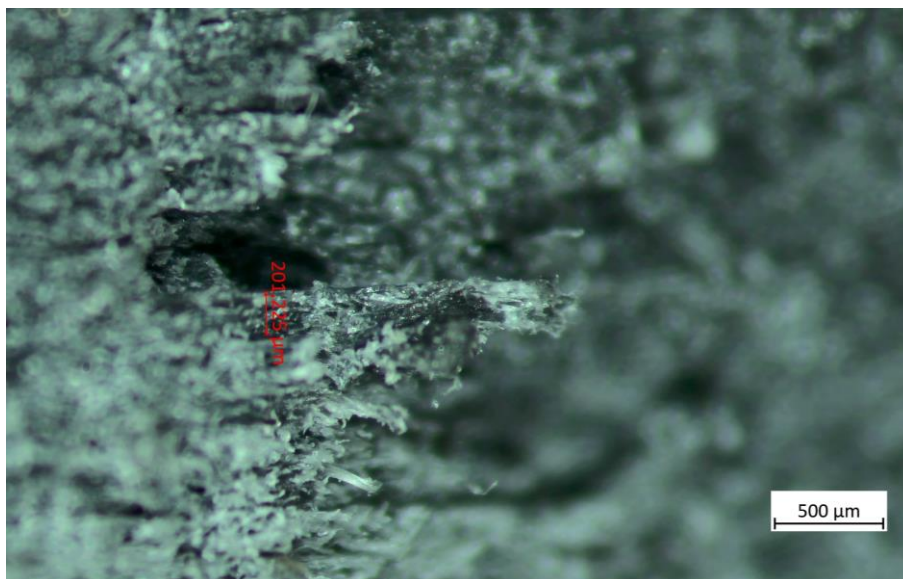
(b)

**Figura 57.** Rotura incompleta P9 PLA Celulosa (x8): Capas externas (a) y Capas internas (b).

También se observa la existencia de pequeños huecos internos en las capas depositadas, pudiendo deberse a leves atascos del extrusor, o contracciones del material depositado. Además, se hace notable la distinción de partículas de celulosa, sobre el PLA color negro (Figura 58).



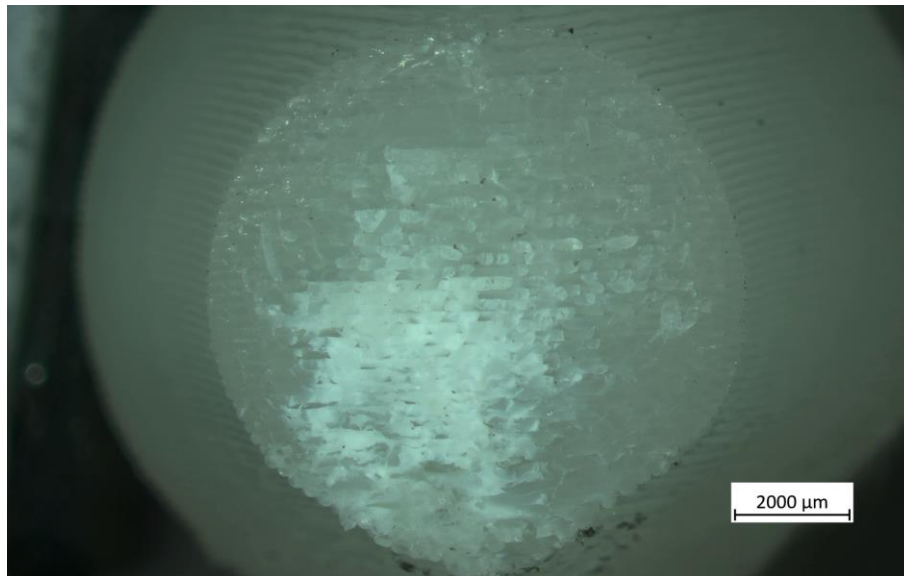
(a)



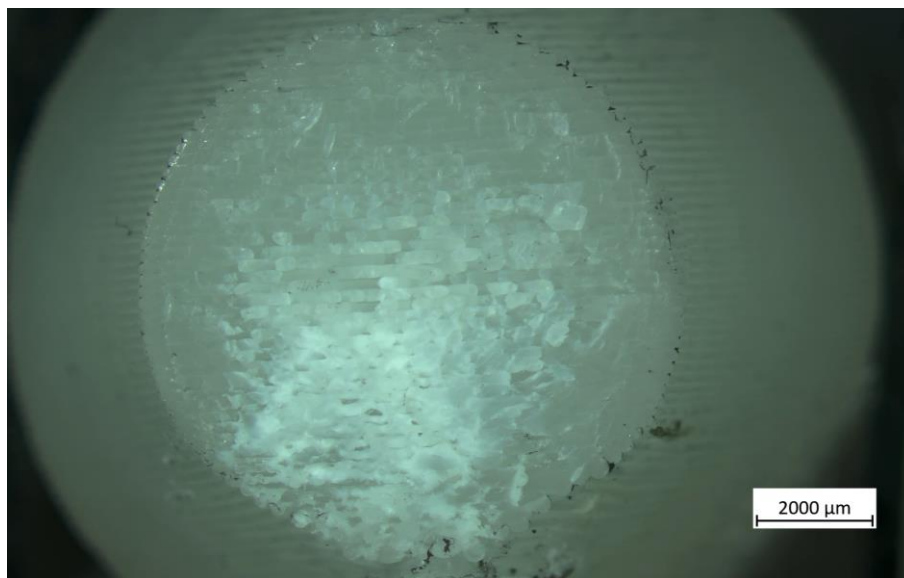
(b)

**Figura 58.** PLA con celulosa: Huecos internos x40 (a) y partículas de celulosa x30 (b).

En probetas de PLA 870, se estudia la diferencia de vida a fatiga entre dos probetas para la misma carga, probetas 1 y 5. Observando las fractografías de nuevo se aprecia mayor zona frágil y mejor adhesión de capas en la probeta con mayor vida a fatiga (Figura 59: a), y mayor parte de rotura dúctil en la de menor vida (Figura 59: b).



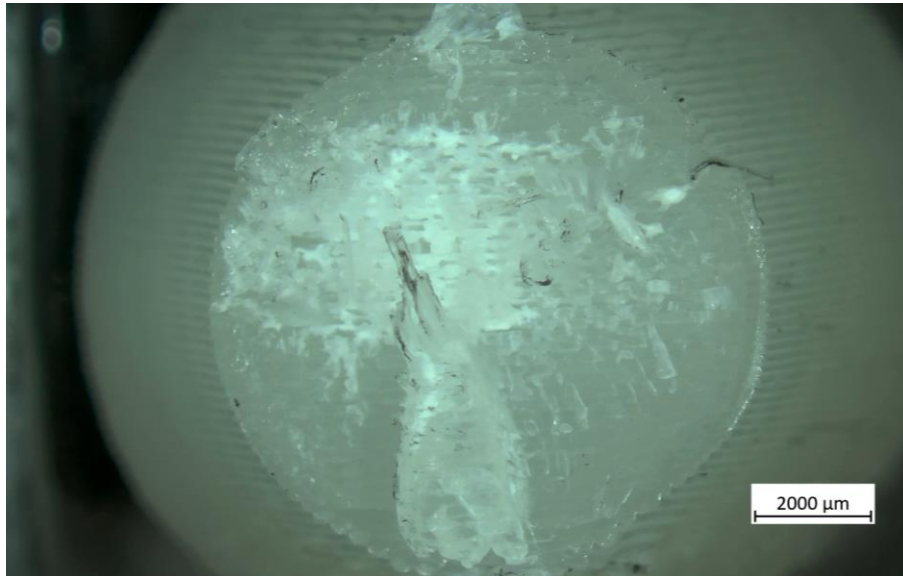
(a)



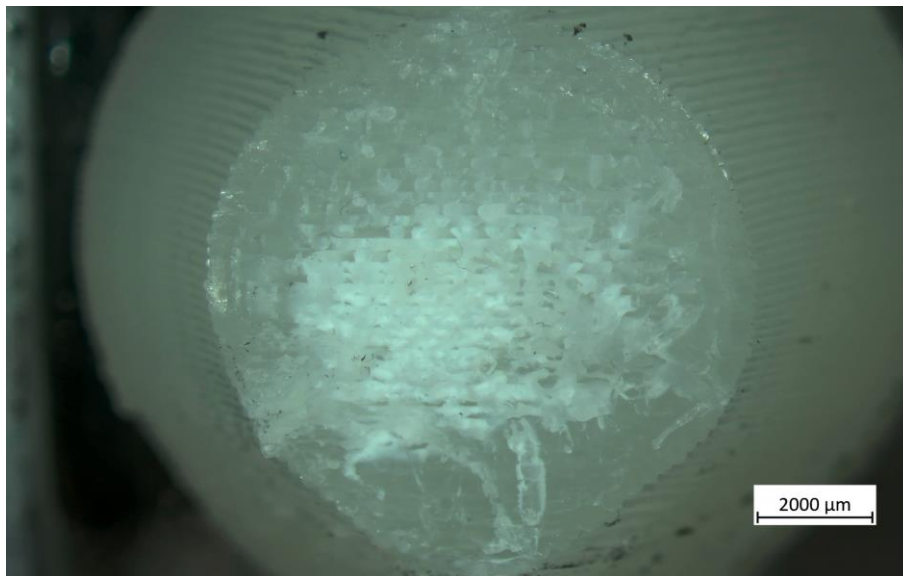
(b)

**Figura 59.** Fractografía PLA HR-3D870 (x8): P1 [690.613 ciclos] (a) y P5 [244.177 ciclos] (b).

Otra diferencia de ciclos de vida se produce en las probetas 7 (Figura 60: a) y probeta 9 (Figura 60: b). En este caso, la probeta con mayor vida (7) presenta una notable diferenciación de la zona dúctil y la frágil, fallando finalmente por flexión frágil, fracturando parte de la sección fuera del plano de máximo esfuerzo. La probeta 9 presenta una rotura más general en la línea de fractografía de este material.



(a)



(b)

**Figura 60.** Fractografía PLA HR-3D870 (x8): P7 [360.608 ciclos] (a) y P9 [197.030 ciclos] (b).

Finalmente, mediante un zoom x40, se aprecian detalles de la rotura frágil (oscura y notablemente coplanaria) y dúctil (coloración clara y mayor granulación), y visualizando además el entrelazado de capas formado por el relleno en cuadrícula (Figura 61).



(a)



(b)

**Figura 61.** Fractografía PLA HR-3D870 (x40): zona frágil (a) y zona dúctil (b).



## 9 Conclusiones

Tras el análisis de los resultados obtenidos, se pueden citar como conclusiones las siguientes:

En cuanto al **control dimensional** de las probetas:

Las variaciones nominales y porcentuales entre los diámetros de las piezas fabricadas y los de diseño se consideran pequeñas, siendo entre 0'43% y 1'56% para las probetas en PLA Textura (Celulosa), y entre -1'1% y 0'81% para las de PLA 870.

La deformación y efecto warping en las primeras capas es mayor en PLA 870, causando mayor variación dimensional debido a la fuerte adhesión a la balsa, no tanto asociado a la impresión general de este material.

En cuanto a la **resistencia a fatiga** de las probetas:

Se obtuvieron las gráficas S-N de probetas impresas mediante FA en PLA con partículas de celulosa, y en PLA HR-870, haciendo posible su valoración de cara a futuros usos de estos, así como punto de partida hacia ampliar los ensayos mecánicos en estos materiales.

Se observa mayor resistencia a fatiga en PLA 870, especialmente para mayores cargas, llegando a ser 4 veces superior al PLA Celulosa. Por tanto, para fabricación de piezas ante esfuerzos de fatiga considerables, se tenderá a emplear PLA HR-3D870 en mejoría sobre el PLA Textura (Celulosa).

En cuanto al PLA con aditivo de celulosa, no se recomienda su selección para usos a fatiga, comparando su comportamiento respecto al de PLA 870 u otros estudios con PLA mostrados en bibliografía, no siendo ventajosa la adición de celulosa. Esto puede deberse a la aparición de huecos internos en el material, comentados en la fractografía.

Para el PLA870, sí se espera un mejor comportamiento a fatiga que el PLA convencional bajo mismas condiciones, teniendo en cuenta además la posibilidad de este material de mejorar su comportamiento mediante templado previo al ensayo.



## 10 Líneas futuras de investigación

Este Estudio logra representar el comportamiento a fatiga para los dos tipos de PLA trabajados, sirviendo de base de próximas investigaciones, como la ampliación de la curva S-N en valores de carga superiores a los estudiados, así como el ensayo de otras propiedades mecánicas, como tracción, compresión, flexión e impactos.

En cuanto a la comparación entre materiales, el estudio de la curva S-N en PLA con celulosa como tipo de fibra natural añadida, abre la investigación a otros tipos de aditivos naturales, como pueden ser el PLA Oliva, con restos de huesos de aceitunas, o el PLA Oyster, con restos de ostras, y muchos más.

También pueden compararse con materiales de PLA con aditivos no naturales, como PLA con partículas de acero inoxidable.

En la línea del PLA HR-3D870, se recuerda la posibilidad de templar el material una vez impreso, por lo que sería de gran interés la comparación de estos resultados frente a lo que pueda presentar tras un templado doméstico.

Por otro lado, también son posibles nuevas investigaciones de estos materiales ante la variación de otros parámetros los cuales se han tomado como fijos en este estudio: patrones de relleno, temperatura de cama e impresión, velocidades.



## 11 Bibliografía

- [1] Organización Industrial de Estandarización, “UNE-EN ISO/ASTM 52900:2022 Fabricación aditiva. Principios generales...”
- [2] Interempresas, Metalmecánica. “La fabricación aditiva, una tecnología (hoy) exclusiva pero de potencial infinito”
- [3] Organización Industrial de Estandarización, “UNE-EN ISO 17296-2:2017 Fabricación aditiva. Principios generales...”
- [4] M. Attaran, “The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing,” *Bus. Horiz.*, vol. 60, no. 5, pp. 677–688, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.BUSHOR.2017.05.011.
- [5] Ecoinventos, “Diseñan prótesis de plástico 3D biodegradables pueden sustituir a 2,5 toneladas de yeso.”
- [6] Filament2print, “¿Qué aporta la impresión 3D a la industria aeroespacial?”
- [7] Interempresas, Fabricación aditiva, “Stratasys presenta un soporte soluble en agua para sus impresoras 3D J35 Pro y J55 Prime - Impresión 3D - Fabricación aditiva.”
- [8] Vigilancer, “La fabricación aditiva como catalizador de la industrialización del sector de la construcción.”
- [9] Silicon, “Ya está disponible SOLIDWORKS 2018, con más integración y automatización que nunca”
- [10] 3Dnatives, “ideaMaker, el slicer gratuito de Raise3D”
- [11] Control3D, “¿Qué se puede imprimir en una Impresora 3D? - Impresión 3D.”
- [12] Formlabs, suport, “Técnicas avanzadas de eliminación de soportes.”
- [13] Formlabs, “Guía de materiales de impresión 3D: Tipos, aplicaciones y propiedades”
- [14] BCN3D, suport, “Entendiendo el relleno - BCN3D Stratos.”
- [15] Iberisa, soporte, “Introducción al Análisis de Fatiga o Durabilidad.”
- [16] J. Alvarez, “FATIGA PROTOCOLO Curso de Materiales Edición 2011-2 Facultad Ingeniería Industrial Laboratorio de Producción.”
- [17] S. Martín Béjar, D. Lorenzo Sevilla Hurtado, and D. Francisco Javier Trujillo Vilches, “Análisis Paramétrico del comportamiento a fatiga de piezas torneadas en seco de la aleación UNS A97075 (Al-Zn)” 2020.
- [18] J. Medina Barrios, “Fatiga del material | PPT.”



- [19] Normas AENOR, “ISO 1143:2021”
- [20] Normas AENOR, “ISO 12106:2017”
- [21] Normas AENOR, “ISO 12108:2018”
- [22] Normas AENOR, “ISO 1099:2017”
- [23] Normas AENOR, “ISO 1352:2021”
- [24] Askeland, D., Fulay, P., Wright, W. Ciencia e ingeniería de materiales. Cengage Learning Inc., 6ta edición, 2012.
- [25] M. Scholze et al., “Utilization of 3D printing technology to facilitate and standardize soft tissue testing,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, Dec. 2018, doi: 10.1038/S41598-018-29583-4.
- [26] A. Joyanes Torres, C. Bermudo Gamboa, and S. Martín Béjar, “Análisis de la influencia de la temperatura y velocidad de deposición en la vida a fatiga de piezas impresas en PLA+Fibra de carbono,” 2022.
- [27] C. Bermudo Gamboa et al., “Fatigue behavior analysis in reinforced PLA parts manufactured by FDM”.
- [28] C. Bermudo Gamboa, S. Martín-Béjar, J. Trujillo Vilches, and L. Sevilla Hurtado, “Influence of printing parameters and short carbon fibre reinforcement on fatigue behaviour, dimensional accuracy and macrogeometrical deviations of polylactic acid in material extrusion,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 242, p. 110205, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2023.110205.
- [29] C. Bermudo Gamboa, S. Martín Béjar, F. J. Trujillo Vilches, and L. Sevilla Hurtado, “Geometrical analysis in material extrusion process with polylactic acid (PLA)+carbon fiber,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 29, no. 11, pp. 21–39, 2022, doi: 10.1108/RPJ-09-2022-0294.
- [30] C. Bermudo Gamboa et al., “Dimensional Analysis in Additive Manufacturing Processes with PLA+Carbon Fiber”, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.08.061.
- [31] N. Ramos López, E. Martín Fernández, and C. Bermudo Gamboa, “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,” 2023.
- [32] A. G. Montesinos, C. B. Gamboa, S. M. Bejar, and L. S. Hurtado, “Influence of Layer Thickness on Fatigue Life of PLA + Carbon Fiber Specimens by Additive Manufacturing,” 2023, doi: 10.1007/978-3-031-20325-1\_31.
- [33] Addnorth, “TexturaTM - Matte Black”



- [34] Filament2print, “PLA Textura”.
- [35] Filament2print, “HR-PLA 3D870”.
- [36] Raise3D, products, “Dual Extruder 3D Printer | Raise3D Pro2”
- [37] Filament2print, “Raise3D Pro2 Plus - Impresora 3D FDM”
- [38] 3dz, “¿Fabricación sustractiva o aditiva? Descubra estos procesos!”
- [39] 3DALIA, “La fabricación aditiva, descubre sus ventajas”.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL  
COMPORTAMIENTO A FATIGA DE PROBETAS  
DE PLA CON REFUERZO DE FIBRAS NATURALES  
IMPRESAS MEDIANTE FDM



## Anexo I: Hojas de datos

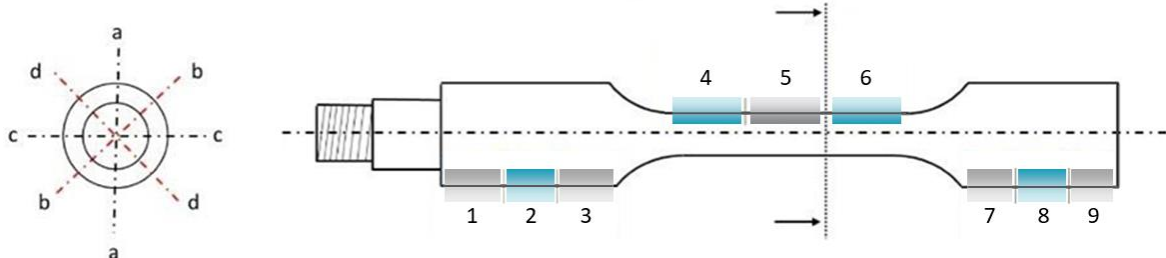
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 1

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	Rotura No completa 
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	15,095	15,059	15,171	9,231	9,199	9,252	15,152	15,076	14,987
B	15,112	15,124	15,116	9,222	9,175	9,166	15,15	15,124	15,052
C	15,144	15,160	15,166	9,243	9,194	9,186	15,162	15,157	15,163
D	15,029	14,987	14,976	9,059	9,061	9,116	15,018	15,042	15,091
<b>Media</b>	<b>15,095</b>	<b>15,082</b>	<b>15,107</b>	<b>9,188</b>	<b>9,157</b>	<b>9,180</b>	<b>15,120</b>	<b>15,100</b>	<b>15,073</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.1	Fuerza (N)	10,78
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	9.992
Ciclos	43.154	Tiempo rotura (min)	23,97
L-x rotura (mm)	66,34	Tipo de rotura	No completa

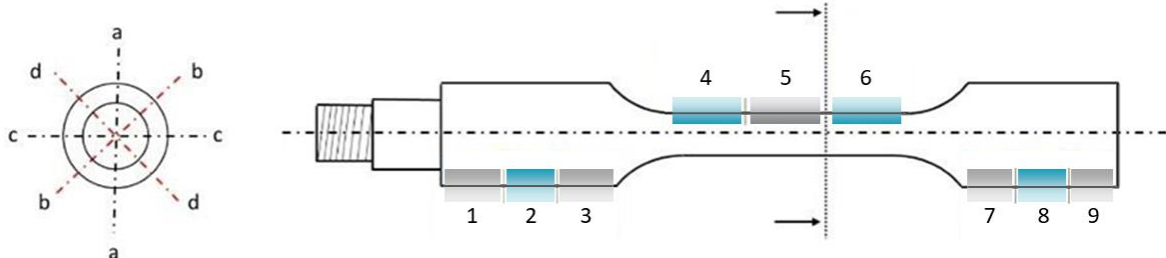
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 2

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,108	15,102	15,124	9,170	9,169	9,191	15,197	15,134	14,971
B	15,180	15,108	15,086	9,142	9,096	9,142	15,071	15,160	15,078
C	15,310	15,183	15,190	9,227	9,172	9,171	15,239	15,216	15,187
D	15,059	15,015	15,055	9,145	9,148	9,188	15,086	15,074	15,126
<b>Media</b>	<b>15,164</b>	<b>15,102</b>	<b>15,114</b>	<b>9,171</b>	<b>9,146</b>	<b>9,173</b>	<b>15,148</b>	<b>15,146</b>	<b>15,090</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.1	Fuerza (N)	10,78
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	10,044
Ciclos	133.255	Tiempo rotura (min)	74,03
L-x rotura (mm)	66,68	Tipo de rotura	Completa

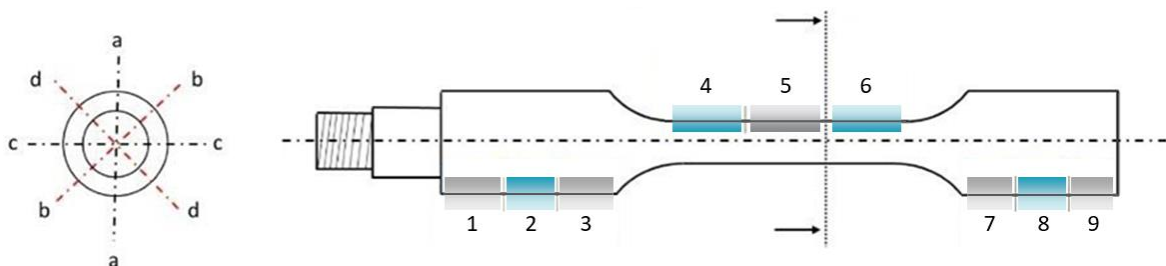
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 3

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
T <sup>a</sup> extrusión (°C)	215	
v impresión (mm/s)	40	
e capa (mm)	0.2	
Nº carcasas	2	
T <sup>a</sup> cama (°C)	60	
Relleno (%)	100	

## CONTROL DIMENSIONAL



	MEDIDA DE DIÁMETROS (mm)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	15,062	15,087	15,132	9,198	9,173	9,174	15,172	15,047	14,921
B	15,079	15,108	15,081	9,163	9,149	9,136	15,256	15,222	15,168
C	15,189	15,150	15,152	9,199	9,181	9,186	15,063	15,052	15,007
D	15,002	15,032	15,032	9,201	9,115	9,196	15,038	15,037	15,046
<b>Media</b>	<b>15,083</b>	<b>15,094</b>	<b>15,099</b>	<b>9,190</b>	<b>9,154</b>	<b>9,173</b>	<b>15,132</b>	<b>15,089</b>	<b>15,035</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.1	Fuerza (N)	10,78
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	10,083
Ciclos	206.667	Tiempo rotura (min)	114,82
L-x rotura (mm)	66,94	Tipo de rotura	Completa

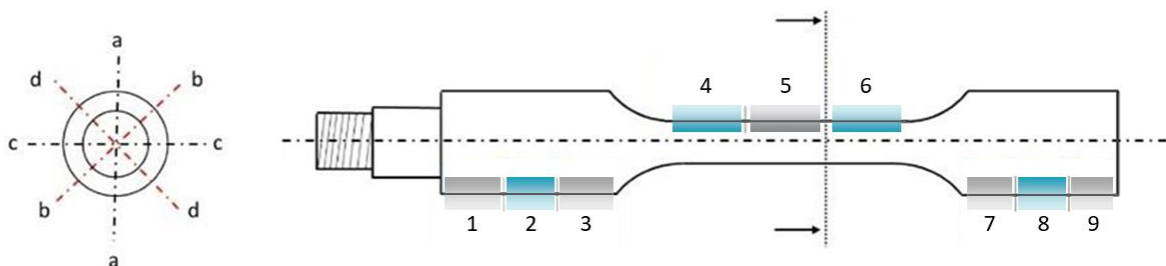
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 4

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,049	15,073	15,152	9,267	9,149	9,182	15,113	15,023	14,917
B	15,049	15,066	15,055	9,111	9,126	9,169	15,062	15,066	14,971
C	15,161	15,157	15,179	9,141	9,138	9,142	15,109	15,123	15,136
D	15,082	14,988	14,948	9,157	9,105	9,122	15,004	15,015	14,988
<b>Media</b>	<b>15,085</b>	<b>15,071</b>	<b>15,083</b>	<b>9,169</b>	<b>9,129</b>	<b>9,154</b>	<b>15,072</b>	<b>15,057</b>	<b>15,003</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.1	Fuerza (N)	10,78
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	10,110
Ciclos	141.768	Tiempo rotura (min)	78,76
L-x rotura (mm)	67,12	Tipo de rotura	Completa

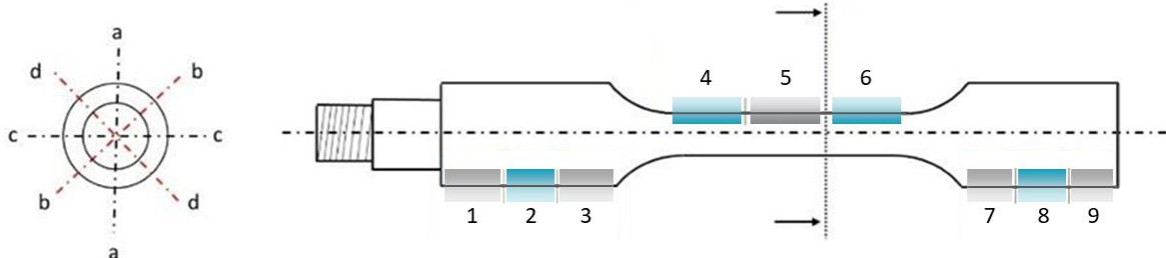
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 5

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,063	15,037	15,129	9,172	9,158	9,188	15,123	15,019	14,971
B	15,100	15,064	15,031	9,106	9,110	9,143	15,024	15,031	14,944
C	15,166	15,169	15,120	9,128	9,142	9,146	15,096	15,100	15,102
D	14,952	14,993	14,991	9,079	9,103	9,094	15,017	15,001	14,943
<b>Media</b>	<b>15,070</b>	<b>15,066</b>	<b>15,068</b>	<b>9,121</b>	<b>9,128</b>	<b>9,143</b>	<b>15,065</b>	<b>15,038</b>	<b>14,990</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.1	Fuerza (N)	10,78
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	10,060
Ciclos	139.054	Tiempo rotura (min)	77,25
L-x rotura (mm)	66,79	Tipo de rotura	Completa

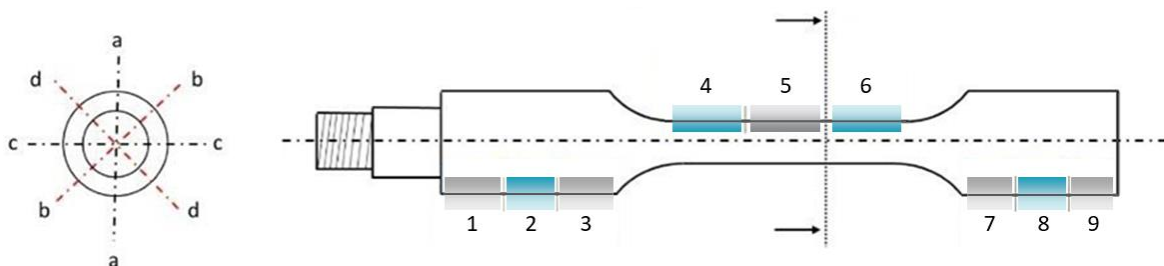
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 6

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,100	15,094	15,089	9,192	9,190	9,205	15,095	15,068	14,985
B	15,035	15,051	15,031	9,125	9,090	9,105	15,064	15,060	14,999
C	15,014	15,059	15,057	9,145	9,094	9,091	15,048	15,055	15,039
D	15,017	15,006	14,997	9,072	9,048	9,047	14,998	15,000	14,927
<b>Media</b>	<b>15,041</b>	<b>15,052</b>	<b>15,043</b>	<b>9,133</b>	<b>9,105</b>	<b>9,112</b>	<b>15,051</b>	<b>15,046</b>	<b>14,987</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.3	Fuerza (N)	12,74
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	11,943
Ciclos	73.813	Tiempo rotura (min)	41,01
L-x rotura (mm)	67,09	Tipo de rotura	Completa

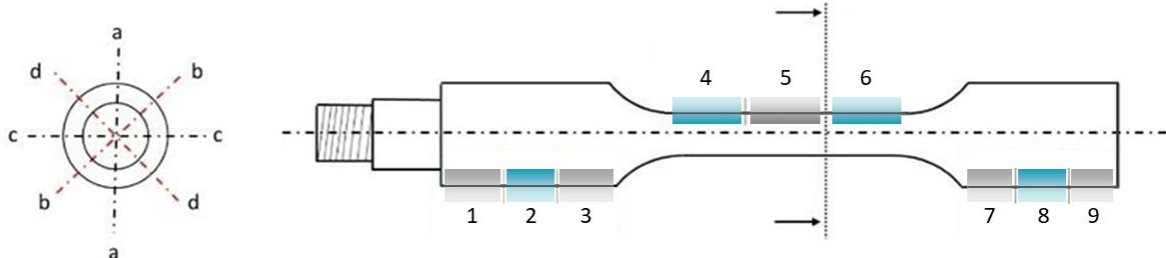
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 7

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,109	15,111	15,084	9,176	9,156	9,222	15,07	15,075	15,002
B	15,074	15,060	15,036	9,098	9,086	9,093	15,054	15,058	14,996
C	15,029	15,047	15,05	9,157	9,090	9,118	15,044	15,051	15,04
D	15,002	15,022	15,006	9,108	9,080	9,071	15,005	15,004	14,949
<b>Media</b>	<b>15,053</b>	<b>15,060</b>	<b>15,044</b>	<b>9,135</b>	<b>9,103</b>	<b>9,126</b>	<b>15,043</b>	<b>15,047</b>	<b>14,997</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.3	Fuerza (N)	12,74
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	12,048
Ciclos	57.342	Tiempo rotura (min)	31,86
L-x rotura (mm)	67,68	Tipo de rotura	Completa

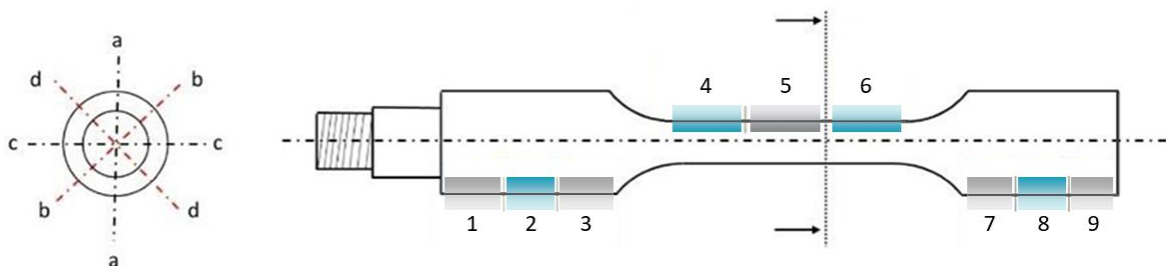
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 8

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,090	15,111	15,079	9,214	9,178	9,206	15,072	15,059	14,983
B	15,061	15,096	15,077	9,121	9,117	9,122	15,109	15,121	15,085
C	15,045	15,094	15,100	9,126	9,120	9,137	15,102	15,099	15,093
D	14,999	15,013	14,987	9,090	9,085	9,100	14,998	14,963	14,908
<b>Media</b>	<b>15,049</b>	<b>15,078</b>	<b>15,061</b>	<b>9,138</b>	<b>9,125</b>	<b>9,141</b>	<b>15,070</b>	<b>15,060</b>	<b>15,017</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.3	Fuerza (N)	12,74
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	11,968
Ciclos	75.224	Tiempo rotura (min)	41,79
L-x rotura (mm)	67,23	Tipo de rotura	Completa

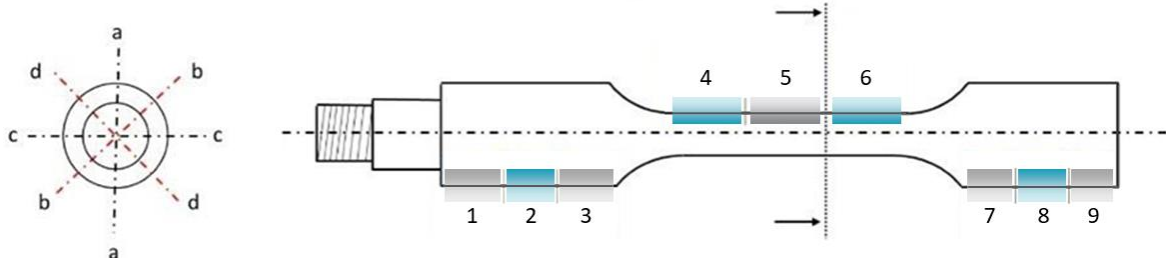
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 9

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	Rotura No completa 
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	15,016	15,112	15,108	9,199	9,187	9,208	15,071	15,107	15,01
B	15,087	15,096	15,103	9,129	9,163	9,122	15,098	15,101	15,03
C	15,064	15,090	15,104	9,170	9,126	9,116	15,093	15,101	15,107
D	14,983	14,953	14,945	9,085	9,088	9,091	14,998	15,008	14,92
<b>Media</b>	<b>15,037</b>	<b>15,063</b>	<b>15,065</b>	<b>9,146</b>	<b>9,141</b>	<b>9,134</b>	<b>15,065</b>	<b>15,079</b>	<b>15,017</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.3	Fuerza (N)	12,74
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	11,871
Ciclos	58.739	Tiempo rotura (min)	32,63
L-x rotura (mm)	66,69	Tipo de rotura	No completa

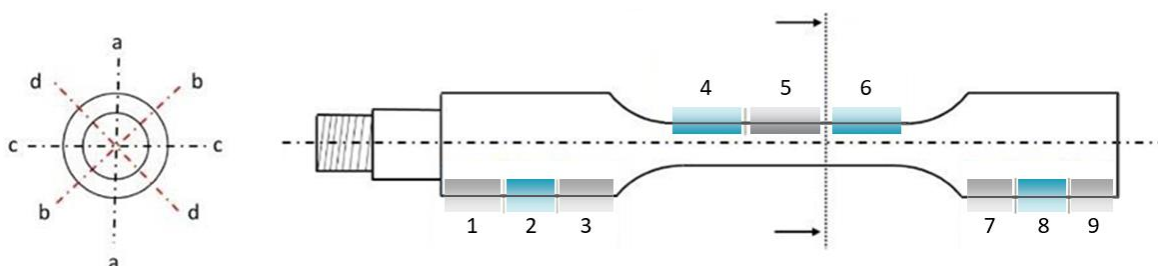
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 10

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,082	15,099	15,091	9,256	9,208	9,204	15,058	15,070	15,027
B	14,992	14,990	14,997	9,088	9,091	9,103	15,045	15,065	15,000
C	15,016	15,053	15,067	9,125	9,101	9,114	15,036	15,044	15,03
D	14,996	14,988	14,977	9,089	9,068	9,102	14,992	14,997	14,924
<b>Media</b>	<b>15,021</b>	<b>15,032</b>	<b>15,033</b>	<b>9,139</b>	<b>9,117</b>	<b>9,131</b>	<b>15,033</b>	<b>15,044</b>	<b>14,995</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.3	Fuerza (N)	12,74
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	11,973
Ciclos	55.703	Tiempo rotura (min)	30,95
L-x rotura (mm)	67,26	Tipo de rotura	Completa

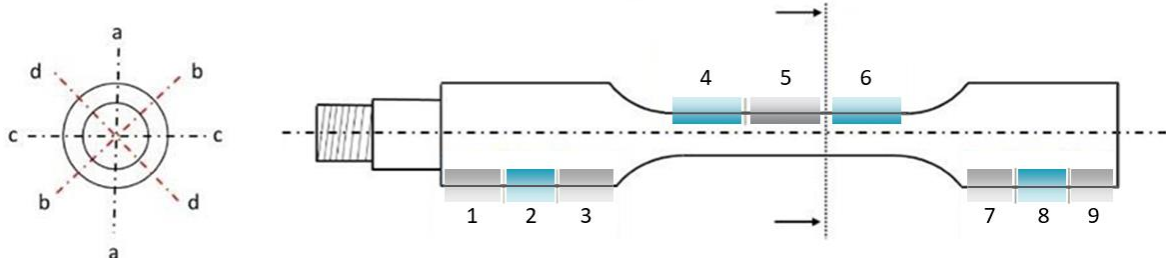
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 11

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,223	15,136	15,297	9,189	9,170	9,198	15,275	15,309	15,302
B	14,971	15,007	15,135	9,108	9,097	9,114	15,244	15,297	14,979
C	15,241	15,183	15,228	9,099	9,108	9,097	15,112	15,028	15,291
D	15,229	14,999	15,094	9,101	9,025	9,074	15,17	15,001	15,142
<b>Media</b>	<b>15,166</b>	<b>15,081</b>	<b>15,188</b>	<b>9,124</b>	<b>9,100</b>	<b>9,121</b>	<b>15,200</b>	<b>15,158</b>	<b>15,178</b>

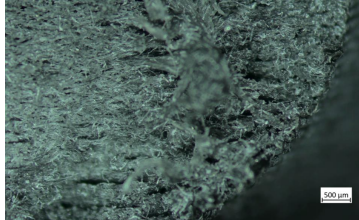
## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1,0	Fuerza (N)	9,82
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	9,229
Ciclos	288.825	Tiempo rotura (min)	160,46
L-x rotura (mm)	67,40	Tipo de rotura	Completa

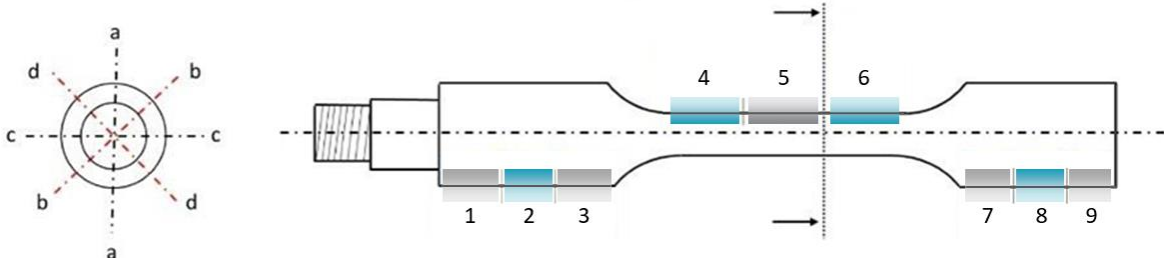
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 12

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	Mayor zona dúctil. Señas de torsión 
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	15,109	15,264	15,116	9,204	9,189	9,206	15,005	15,088	15,052
B	15,174	15,162	15,116	9,090	9,072	9,099	15,087	15,082	15,146
C	15,299	15,187	15,152	9,151	9,091	9,077	15,162	14,977	15,011
D	15,004	15,024	15,033	9,047	9,025	9,052	14,951	15,108	15,306
<b>Media</b>	<b>15,146</b>	<b>15,159</b>	<b>15,104</b>	<b>9,123</b>	<b>9,094</b>	<b>9,108</b>	<b>15,051</b>	<b>15,064</b>	<b>15,128</b>

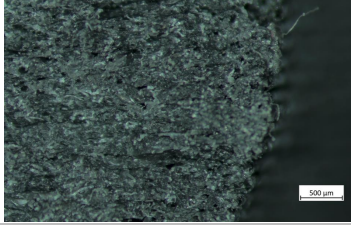
## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1,0	Fuerza (N)	9,82
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	9,439
Ciclos	168.292	Tiempo rotura (min)	93,50
L-x rotura (mm)	68,93	Tipo de rotura	Completa

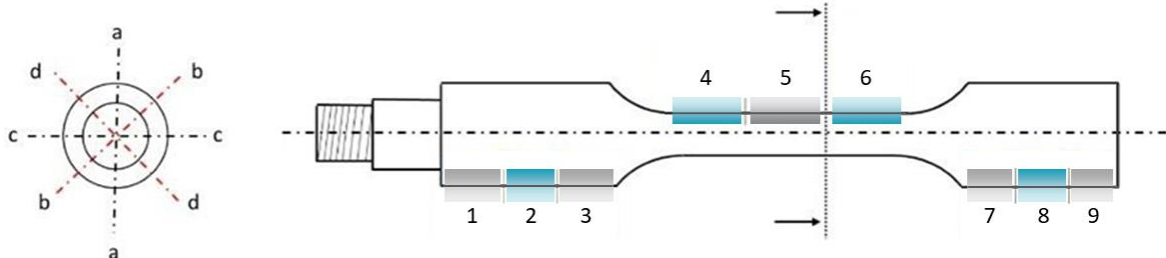
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 13

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	Mejor adhesión de capas. Rotura Frágil 
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	15,297	15,121	15,159	9,198	9,196	9,204	15,102	15,032	15,062
B	15,246	15,182	15,045	9,118	9,113	9,167	15,208	15,262	15,041
C	15,174	15,136	15,258	9,137	9,114	9,127	15,161	15,225	15,136
D	15,022	15,212	15,186	9,139	9,050	9,071	14,959	15,036	15,071
<b>Media</b>	<b>15,184</b>	<b>15,163</b>	<b>15,162</b>	<b>9,148</b>	<b>9,118</b>	<b>9,142</b>	<b>15,107</b>	<b>15,138</b>	<b>15,077</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1,0	Fuerza (N)	9,82
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	9,336
Ciclos	742.489	Tiempo rotura (min)	412,49
L-x rotura (mm)	68,18	Tipo de rotura	Completa

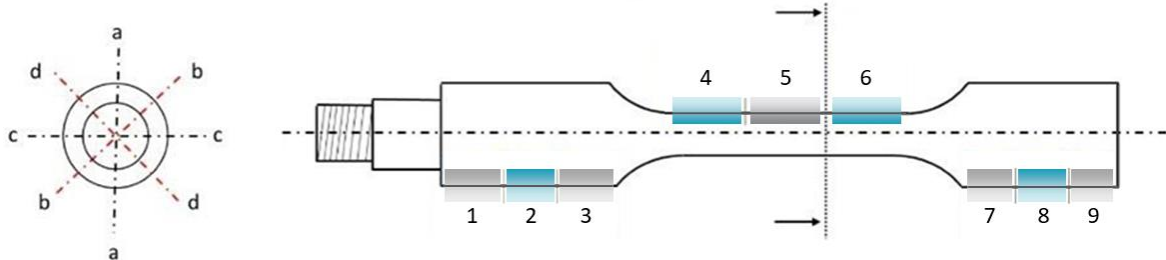
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 14

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,140	15,263	15,086	9,189	9,207	9,216	15,302	15,046	15,251
B	15,015	14,993	15,095	9,117	9,102	9,117	15,014	14,986	15,059
C	15,108	14,968	15,231	9,155	9,100	9,106	15,080	15,162	15,276
D	15,055	15,305	15,192	9,086	9,052	9,065	14,98	15,104	15,086
<b>Media</b>	<b>15,079</b>	<b>15,131</b>	<b>15,151</b>	<b>9,137</b>	<b>9,115</b>	<b>9,126</b>	<b>15,093</b>	<b>15,074</b>	<b>15,168</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1,0	Fuerza (N)	9,82
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	9,219
Ciclos	684.491	Tiempo rotura (min)	380,27
L-x rotura (mm)	67.33	Tipo de rotura	Completa

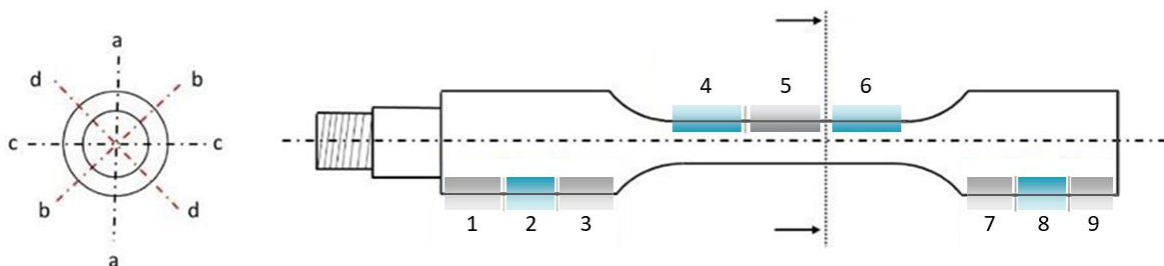
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 15

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	14,953	14,979	15,107	9,213	9,182	9,191	15,212	15,101	14,975
B	15,113	15,025	15,044	9,088	9,081	9,104	14,955	15,145	15,192
C	15,254	15,233	15,244	9,134	9,079	9,089	15,271	15,25	15,131
D	15,276	15,011	14,989	9,068	9,044	9,04	15,074	15,114	15,071
<b>Media</b>	<b>15,148</b>	<b>15,062</b>	<b>15,096</b>	<b>9,126</b>	<b>9,096</b>	<b>9,106</b>	<b>15,128</b>	<b>15,152</b>	<b>15,092</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1,0	Fuerza (N)	9,82
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	9,369
Ciclos	244.276	Tiempo rotura (min)	135,71
L-x rotura (mm)	68,42	Tipo de rotura	Completa

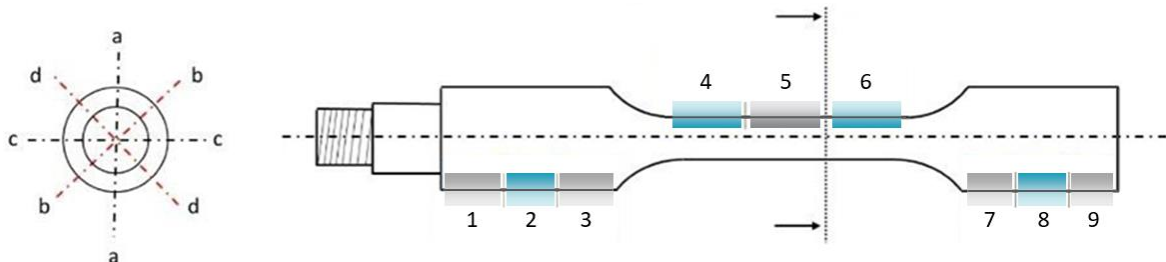
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 16

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,031	15,115	15,049	9,198	9,081	9,131	15,300	15,070	14,951
B	15,093	14,961	15,233	9,034	9,180	9,098	15,093	15,066	15,310
C	15,192	15,136	14,995	9,087	9,119	9,057	15,067	15,089	15,283
D	15,28	15,097	15,269	9,026	9,261	9,210	15,174	15,222	15,231
<b>Media</b>	<b>15,149</b>	<b>15,077</b>	<b>15,136</b>	<b>9,086</b>	<b>9,160</b>	<b>9,124</b>	<b>15,158</b>	<b>15,112</b>	<b>15,193</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	0,80	Fuerza (N)	7,84
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	8,435
Ciclos	1.025.771	Tiempo rotura (min)	569,87
L-x rotura (mm)	77,00	Tipo de rotura	Vida infinita

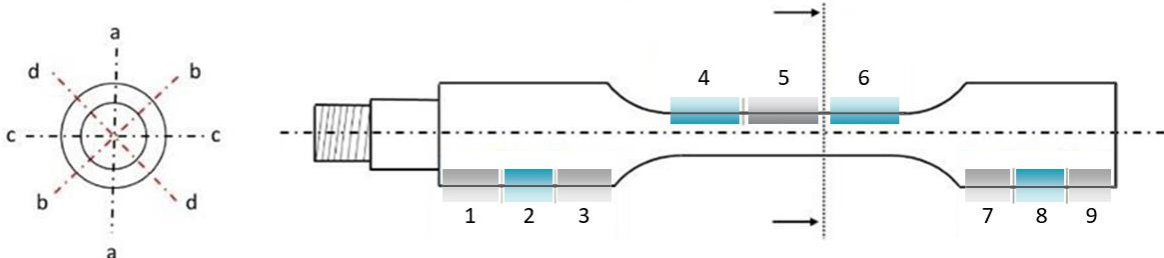
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 17

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	14,948	15,037	15,108	9,221	9,251	9,052	15,012	15,225	15,181
B	15,001	14,964	15,185	9,049	9,146	9,026	15,18	15,128	15,224
C	15,262	14,997	14,969	9,100	9,090	9,055	15,091	15,222	15,251
D	15,216	15,154	15,152	9,151	9,081	9,169	15,257	15,032	15,298
<b>Media</b>	<b>15,106</b>	<b>15,038</b>	<b>15,103</b>	<b>9,130</b>	<b>9,142</b>	<b>9,075</b>	<b>15,135</b>	<b>15,152</b>	<b>15,238</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	0,80	Fuerza (N)	7,84
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	7,526
Ciclos	642.780	Tiempo rotura (min)	357,10
L-x rotura (mm)	68,70	Tipo de rotura	Completa

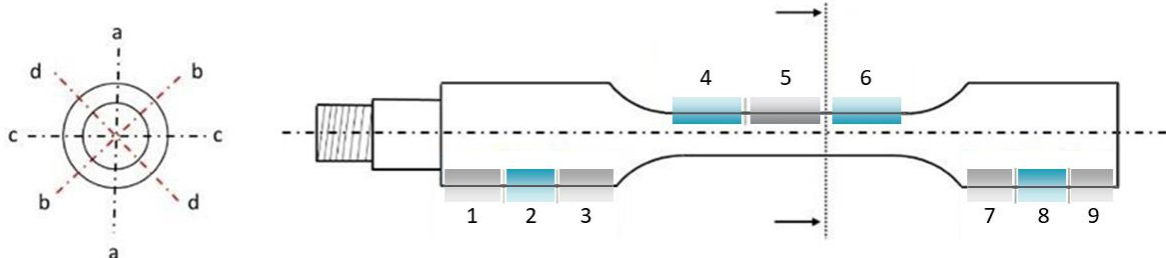
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 18

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,290	15,047	15,245	9,229	9,037	9,221	15,177	15,288	14,966
B	15,223	15,143	15,082	9,112	9,251	9,205	15,144	15,194	15,003
C	15,036	15,056	15,273	9,063	9,238	9,100	15,186	15,211	15,162
D	15,125	15,072	15,118	9,211	9,217	9,083	15,046	15,156	15,018
<b>Media</b>	<b>15,168</b>	<b>15,079</b>	<b>15,179</b>	<b>9,153</b>	<b>9,185</b>	<b>9,152</b>	<b>15,138</b>	<b>15,212</b>	<b>15,037</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	0,80	Fuerza (N)	7,84
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	8,435
Ciclos	1.016.915	Tiempo rotura (min)	564,95
L-x rotura (mm)	77,00	Tipo de rotura	Vida infinita

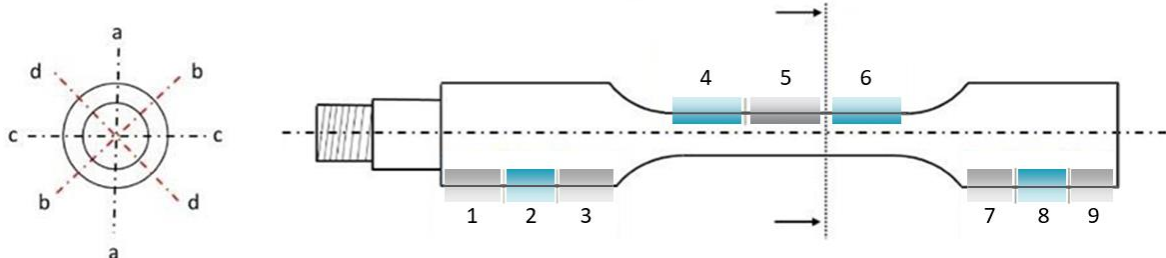
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 19

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	14,988	15,045	15,230	9,030	9,093	9,207	15,138	15,274	15,164
B	15,297	15,208	15,06	9,046	9,040	9,073	15,076	15,266	15,189
C	15,242	15,297	15,011	9,058	9,194	9,036	15,072	14,975	15,29
D	15,229	15,223	15,174	9,267	9,088	9,236	15,218	15,244	14,945
<b>Media</b>	<b>15,189</b>	<b>15,193</b>	<b>15,118</b>	<b>9,100</b>	<b>9,104</b>	<b>9,138</b>	<b>15,126</b>	<b>15,189</b>	<b>15,146</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	0,80	Fuerza (N)	7,84
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	7,456
Ciclos	804.349	Tiempo rotura (min)	446,86
L-x rotura (mm)	68,06	Tipo de rotura	Completa

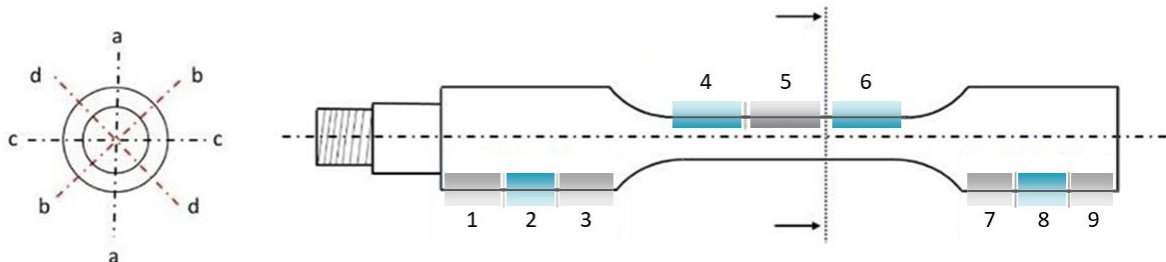
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA Textura (Celulosa)

**ID. ENSAYO** Probeta 20

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,069	15,238	15,069	9,250	9,043	9,123	15,026	15,24	15,138
B	15,111	15,043	15,241	9,042	9,198	9,241	15,093	15,172	15,247
C	14,960	15,241	15,181	9,079	9,110	9,147	15,145	15,082	14,962
D	15,166	15,000	15,282	9,087	9,155	9,191	15,18	14,986	15,293
<b>Media</b>	<b>15,076</b>	<b>15,130</b>	<b>15,193</b>	<b>9,114</b>	<b>9,126</b>	<b>9,175</b>	<b>15,111</b>	<b>15,120</b>	<b>15,159</b>

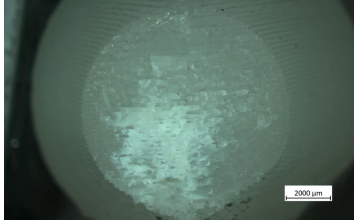
## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	0,80	Fuerza (N)	7,84
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	8,435
Ciclos	1.316.177	Tiempo rotura (min)	731,21
L-x rotura (mm)	77,00	Tipo de rotura	Vida infinita

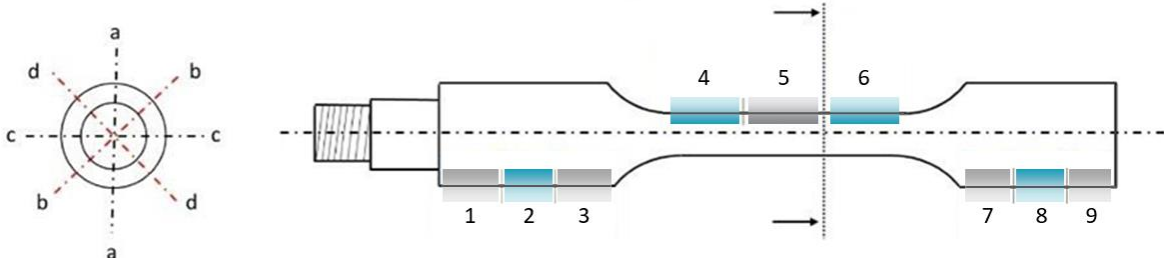
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 1

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	Mejor adhesión de capas. Rotura Frágil 
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	14,788	14,802	14,715	9,343	8,748	9,074	14,81	15,156	14,74
B	15,149	15,008	14,515	9,215	8,923	8,813	15,201	14,439	14,732
C	15,178	14,517	14,651	9,055	8,925	8,97	14,765	14,517	14,754
D	14,754	14,814	14,638	9,346	9,005	9,131	14,664	14,799	14,929
<b>Media</b>	<b>14,967</b>	<b>14,785</b>	<b>14,630</b>	<b>9,240</b>	<b>8,900</b>	<b>8,997</b>	<b>14,860</b>	<b>14,728</b>	<b>14,789</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.0	Fuerza (N)	9,82
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	9,255
Ciclos	690.613	Tiempo rotura (min)	383,67
L-x rotura (mm)	67,59	Tipo de rotura	Completa

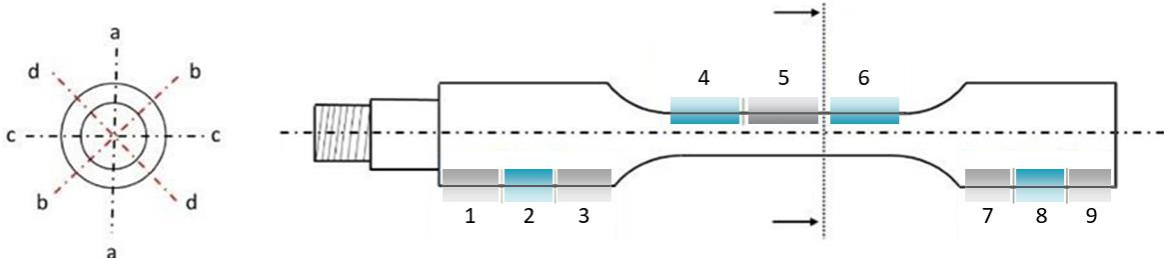
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 2

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	14,610	14,479	15,002	9,025	8,972	8,838	14,987	14,967	14,771
B	14,712	14,465	15,184	9,222	9,002	9,074	14,451	14,493	15,071
C	14,670	14,657	14,685	9,233	9,233	8,891	14,943	14,639	14,895
D	15,199	14,460	14,57	9,222	9,188	9,031	14,6	15,044	14,900
<b>Media</b>	<b>14,798</b>	<b>14,515</b>	<b>14,860</b>	<b>9,176</b>	<b>9,099</b>	<b>8,959</b>	<b>14,745</b>	<b>14,786</b>	<b>14,909</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.0	Fuerza (N)	9,82
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	9,228
Ciclos	673.457	Tiempo rotura (min)	374,14
L-x rotura (mm)	67,39	Tipo de rotura	Completa

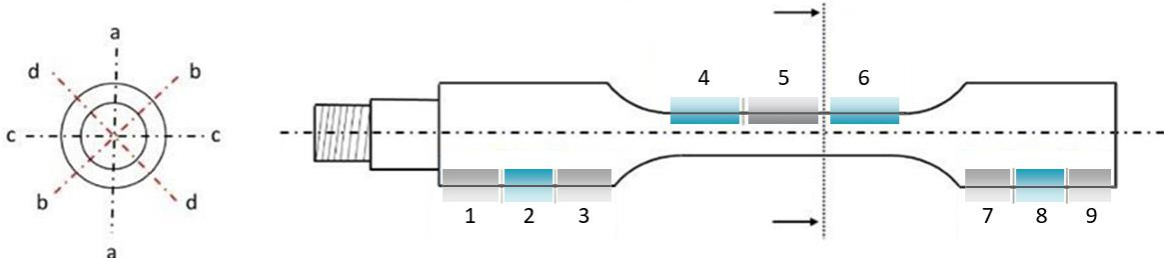
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 3

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,156	15,152	15,169	9,427	9,148	9,115	15,142	15,088	15,031
B	14,904	14,976	15,056	9,067	8,986	8,888	14,995	14,893	14,951
C	15,002	14,896	14,905	8,977	8,969	8,992	15,021	14,923	14,939
D	14,786	14,728	14,61	8,831	8,763	8,803	14,984	14,934	14,934
<b>Media</b>	<b>14,962</b>	<b>14,938</b>	<b>14,935</b>	<b>9,076</b>	<b>8,967</b>	<b>8,950</b>	<b>15,036</b>	<b>14,960</b>	<b>14,964</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.0	Fuerza (N)	9,82
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	9,222
Ciclos	282.385	Tiempo rotura (min)	156,88
L-x rotura (mm)	67,35	Tipo de rotura	Completa

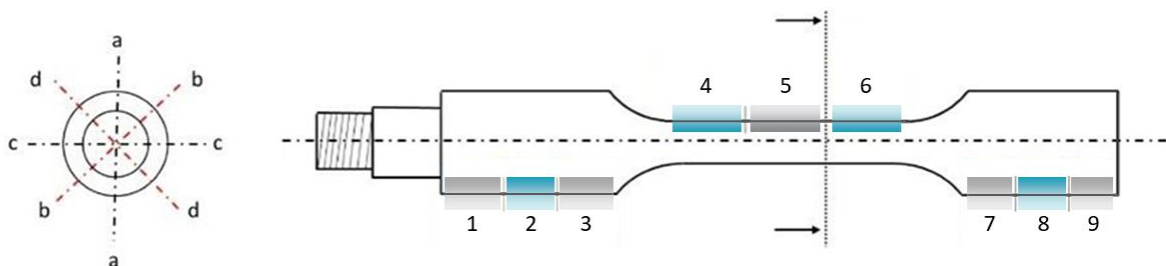
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 4

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,211	15,182	15,195	9,311	9,253	9,272	15,223	15,239	15,132
B	15,056	14,737	14,900	8,989	8,973	9,016	15,149	14,978	14,911
C	14,844	14,852	14,864	9,033	9,006	8,98	14,945	14,96	14,952
D	14,764	14,575	14,486	8,813	8,758	8,832	14,647	14,509	14,901
<b>Media</b>	<b>14,969</b>	<b>14,837</b>	<b>14,861</b>	<b>9,037</b>	<b>8,998</b>	<b>9,025</b>	<b>14,991</b>	<b>14,922</b>	<b>14,974</b>

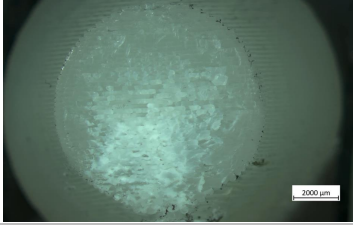
## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.0	Fuerza (N)	9,82
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	9,215
Ciclos	324.598	Tiempo rotura (min)	180,33
L-x rotura (mm)	67,30	Tipo de rotura	Completa

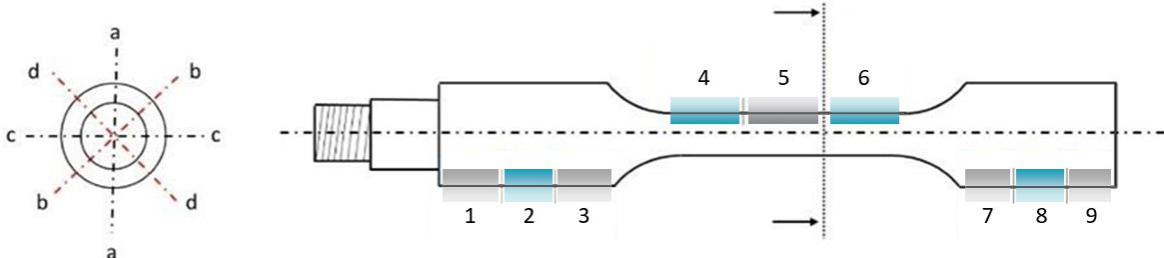
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 5

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	Mayor zona dúctil 
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	15,201	15,212	15,206	9,267	9,175	9,178	15,109	15,101	15,022
B	14,976	14,643	14,707	9,055	8,984	8,934	14,427	14,421	14,698
C	14,830	14,867	14,868	9,054	8,958	8,934	14,872	14,892	14,918
D	14,888	14,690	14,857	9,002	8,847	8,787	15,002	14,864	15,030
<b>Media</b>	<b>14,974</b>	<b>14,853</b>	<b>14,910</b>	<b>9,095</b>	<b>8,991</b>	<b>8,958</b>	<b>14,853</b>	<b>14,820</b>	<b>14,917</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.0	Fuerza (N)	9,82
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	9,230
Ciclos	244.177	Tiempo rotura (min)	135,65
L-x rotura (mm)	67,41	Tipo de rotura	Completa

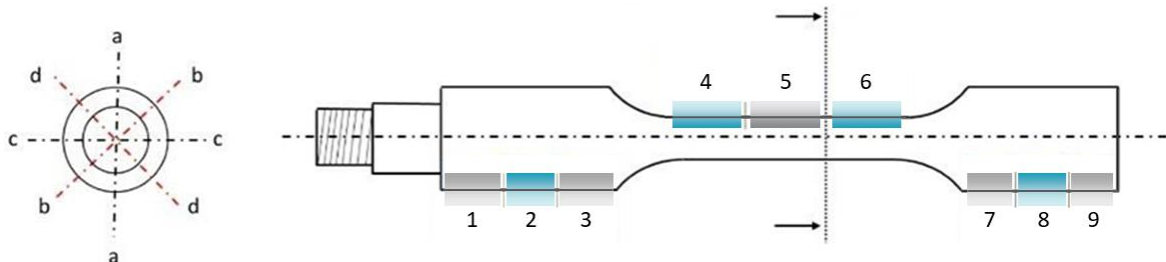
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 6

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,147	15,153	15,117	9,328	9,244	9,218	15,088	15,125	15,093
B	14,645	14,543	14,767	9,034	9,016	8,968	14,566	14,676	14,902
C	14,876	14,892	14,897	8,985	8,952	8,972	14,881	14,888	14,88
D	14,641	14,468	14,578	9,019	8,899	8,935	14,799	14,798	14,997
<b>Media</b>	<b>14,827</b>	<b>14,764</b>	<b>14,840</b>	<b>9,092</b>	<b>9,028</b>	<b>9,023</b>	<b>14,834</b>	<b>14,872</b>	<b>14,968</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.3	Fuerza (N)	12,74
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	12,147
Ciclos	219.950	Tiempo rotura (min)	122,19
L-x rotura (mm)	68,24	Tipo de rotura	Completa

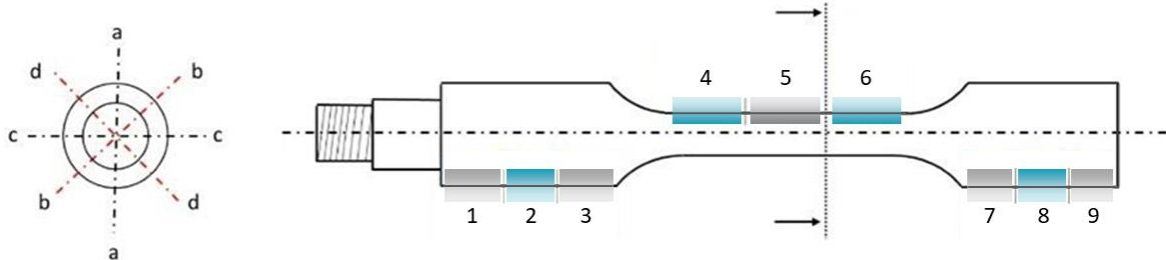
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 7

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	Fallo frágil por flexión 
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	15,232	15,278	15,175	9,435	9,283	9,260	15,150	15,158	15,100
B	14,813	14,615	14,773	9,134	8,952	8,945	14,564	14,680	14,948
C	14,859	14,892	14,899	9,043	9,002	8,995	14,91	14,936	14,932
D	14,692	14,721	14,784	8,876	8,798	8,879	14,788	14,725	15,013
<b>Media</b>	<b>14,899</b>	<b>14,877</b>	<b>14,908</b>	<b>9,122</b>	<b>9,009</b>	<b>9,020</b>	<b>14,853</b>	<b>14,875</b>	<b>14,998</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.3	Fuerza (N)	12,74
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	12,108
Ciclos	360.608	Tiempo rotura (min)	200,34
L-x rotura (mm)	68,02	Tipo de rotura	Completa

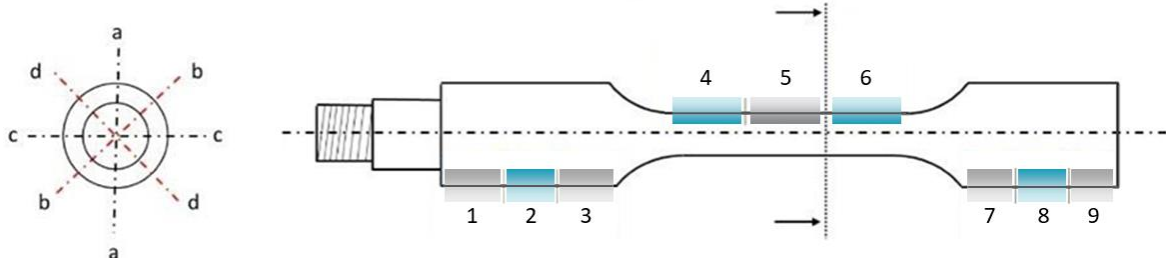
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 8

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,173	15,147	15,108	9,214	9,128	9,178	15,064	15,111	15,156
B	14,675	14,587	14,660	9,034	8,917	8,926	14,639	14,741	14,939
C	14,867	14,874	14,885	9,079	8,947	8,977	14,934	14,888	14,908
D	14,711	14,502	14,457	9,028	8,883	8,868	14,900	14,832	14,912
<b>Media</b>	<b>14,857</b>	<b>14,778</b>	<b>14,778</b>	<b>9,089</b>	<b>8,969</b>	<b>8,987</b>	<b>14,884</b>	<b>14,893</b>	<b>14,979</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.3	Fuerza (N)	12,74
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	12,178
Ciclos	227.726	Tiempo rotura (min)	126,51
L-x rotura (mm)	68,41	Tipo de rotura	Completa

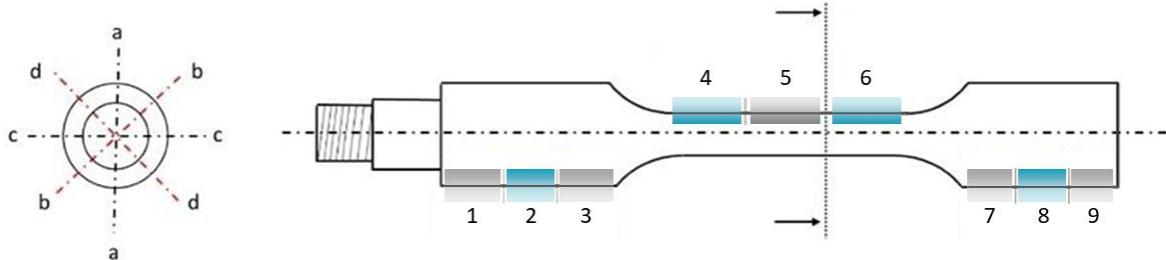
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 9

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,192	15,199	15,151	9,347	9,196	9,178	15,118	15,117	15,062
B	15,123	14,874	14,847	8,975	8,929	8,961	14,619	14,626	14,780
C	14,864	14,882	14,901	9,035	8,998	9,010	14,918	14,939	14,938
D	14,405	14,440	14,607	8,816	8,811	8,838	14,524	14,602	14,860
<b>Media</b>	<b>14,896</b>	<b>14,849</b>	<b>14,877</b>	<b>9,043</b>	<b>8,984</b>	<b>8,997</b>	<b>14,795</b>	<b>14,821</b>	<b>14,910</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.3	Fuerza (N)	12,74
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	12,033
Ciclos	197.030	Tiempo rotura (min)	109,46
L-x rotura (mm)	67,60	Tipo de rotura	No completa

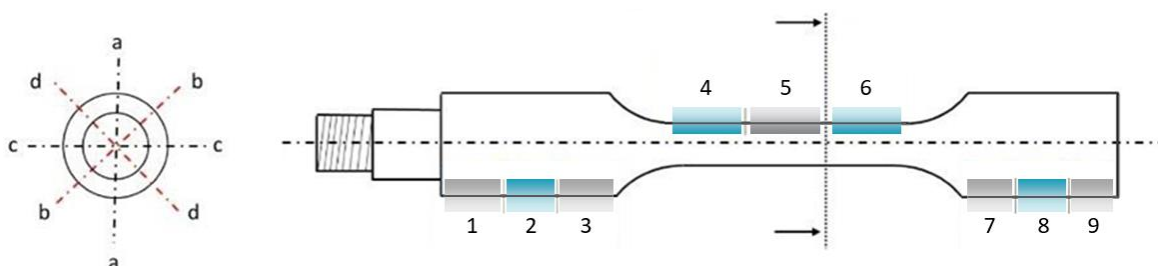
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 10

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,154	15,109	15,136	9,368	9,182	9,203	15,109	15,141	15,100
B	14,697	14,466	14,503	9,113	9,009	8,968	14,534	14,417	14,820
C	14,848	14,757	14,856	9,003	8,960	8,970	14,843	14,863	14,891
D	14,905	14,539	14,534	8,840	8,744	8,771	14,848	14,727	15,050
<b>Media</b>	<b>14,901</b>	<b>14,718</b>	<b>14,757</b>	<b>9,081</b>	<b>8,974</b>	<b>8,978</b>	<b>14,834</b>	<b>14,787</b>	<b>14,965</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1.3	Fuerza (N)	12,74
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	12,017
Ciclos	215.948	Tiempo rotura (min)	119,97
L-x rotura (mm)	67,51	Tipo de rotura	Completa

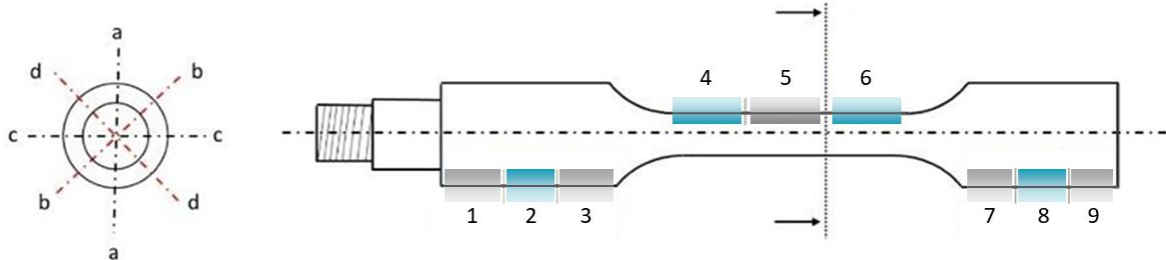
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 11

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	14,448	15,201	14,973	8,829	8,779	9,044	14,902	15,013	15,137
B	15,008	14,522	15,159	9,415	9,197	8,972	15,194	14,808	14,786
C	15,227	14,531	14,905	9,012	9,001	9,143	14,962	14,544	14,826
D	15,207	15,237	14,586	9,174	9,16	8,817	15,129	14,917	15,053
<b>Media</b>	<b>14,973</b>	<b>14,873</b>	<b>14,906</b>	<b>9,108</b>	<b>9,034</b>	<b>8,994</b>	<b>15,047</b>	<b>14,821</b>	<b>14,951</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	0,80	Fuerza (N)	7,84
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	7,403
Ciclos	741.546	Tiempo rotura (min)	411,97
L-x rotura (mm)	67,58	Tipo de rotura	Completa

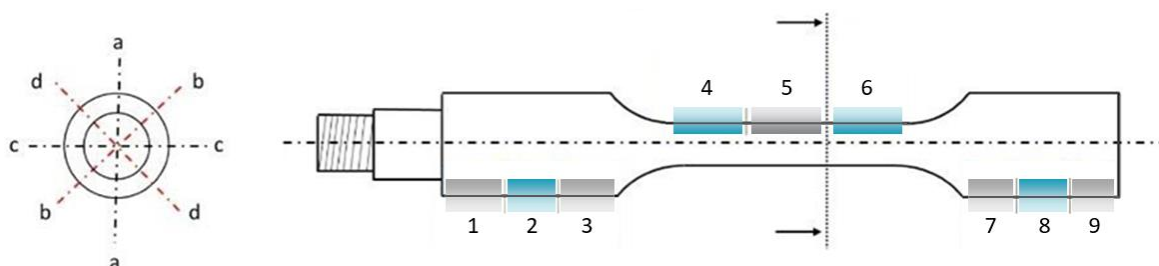
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 12

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	14,527	14,459	14,632	8,954	8,867	8,804	15,027	15,043	14,852
B	14,964	14,554	14,696	9,297	9,126	8,955	14,454	14,611	14,788
C	14,945	14,932	14,495	8,958	8,908	9,087	14,559	14,504	14,924
D	14,533	15,159	14,539	9,183	9,192	8,776	14,708	14,59	14,737
<b>Media</b>	<b>14,742</b>	<b>14,776</b>	<b>14,591</b>	<b>9,098</b>	<b>9,023</b>	<b>8,906</b>	<b>14,687</b>	<b>14,687</b>	<b>14,825</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	0,80	Fuerza (N)	7,84
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	7,407
Ciclos	898.598	Tiempo rotura (min)	499,22
L-x rotura (mm)	67,62	Tipo de rotura	Completa

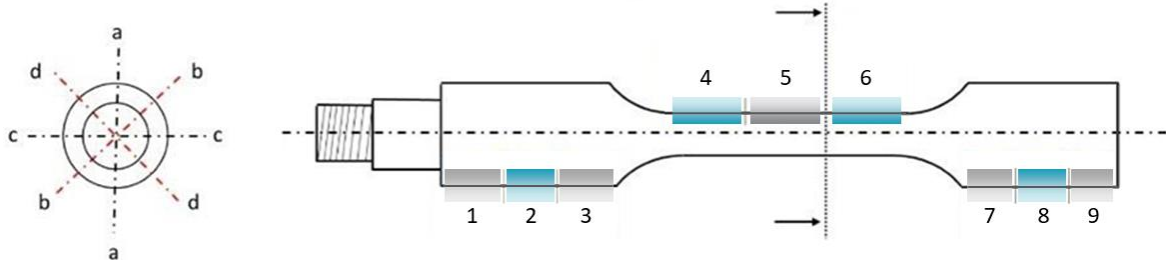
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 13

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,078	14,573	14,731	9,34	8,916	9,125	15,053	14,618	15,004
B	15,204	14,811	15,035	9,039	9,255	8,91	14,47	14,656	14,962
C	15,01	14,836	14,643	9,333	8,855	8,834	14,797	14,966	14,995
D	14,824	15,000	14,808	8,818	9,205	9,241	14,895	14,867	14,864
<b>Media</b>	<b>15,029</b>	<b>14,805</b>	<b>14,804</b>	<b>9,133</b>	<b>9,058</b>	<b>9,028</b>	<b>14,804</b>	<b>14,777</b>	<b>14,956</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	0,80	Fuerza (N)	7,84
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	7,447
Ciclos	794.315	Tiempo rotura (min)	441,29
L-x rotura (mm)	67,98	Tipo de rotura	Completa

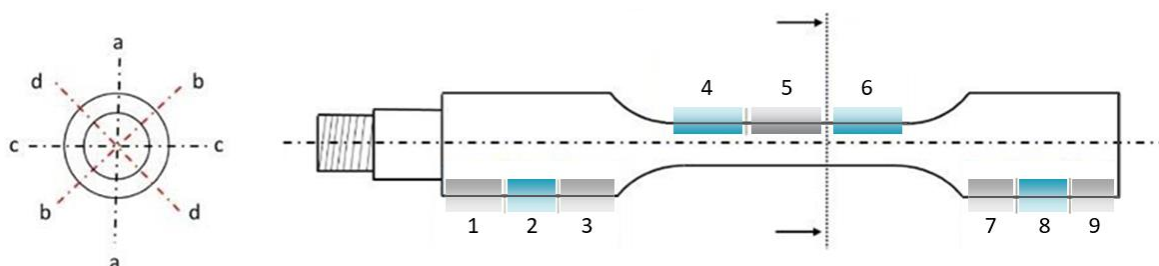
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 14

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	14,605	15,223	14,760	9,269	9,216	9,08	14,687	14,896	14,966
B	15,081	15,181	15,19	9,129	9,182	9,249	14,919	15,148	14,857
C	14,632	14,463	15,024	8,854	9,182	9,208	15,079	14,623	15,037
D	14,838	14,992	14,787	9,194	9,008	9,222	14,659	14,904	15,034
<b>Media</b>	<b>14,789</b>	<b>14,965</b>	<b>14,940</b>	<b>9,112</b>	<b>9,147</b>	<b>9,190</b>	<b>14,836</b>	<b>14,893</b>	<b>14,974</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	0,80	Fuerza (N)	7,84
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	8,435
Ciclos	1.860.397	Tiempo rotura (min)	1033,55
L-x rotura (mm)	77,00	Tipo de rotura	Vida infinita

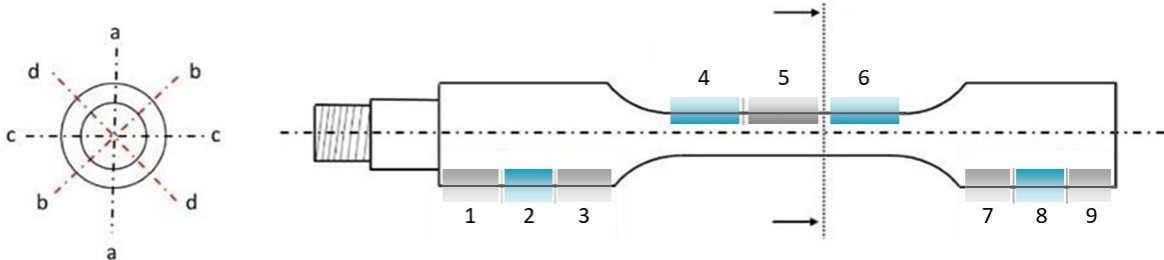
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 15

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	14,797	14,548	14,788	8,997	8,979	9,255	15,035	14,729	15,016
B	15,109	14,989	14,457	9,089	8,767	9,237	14,539	14,85	15,106
C	14,931	14,874	15,13	9,391	8,877	8,974	14,475	15,143	14,976
D	15,147	14,640	15,16	9,426	9,279	9,186	14,626	14,525	14,712
<b>Media</b>	<b>15,019</b>	<b>14,763</b>	<b>14,884</b>	<b>9,226</b>	<b>8,976</b>	<b>9,163</b>	<b>14,669</b>	<b>14,812</b>	<b>14,953</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	0,80	Fuerza (N)	7,84
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	8,435
Ciclos	2.361.046	Tiempo rotura (min)	1311,69
L-x rotura (mm)	77,00	Tipo de rotura	Vida infinita

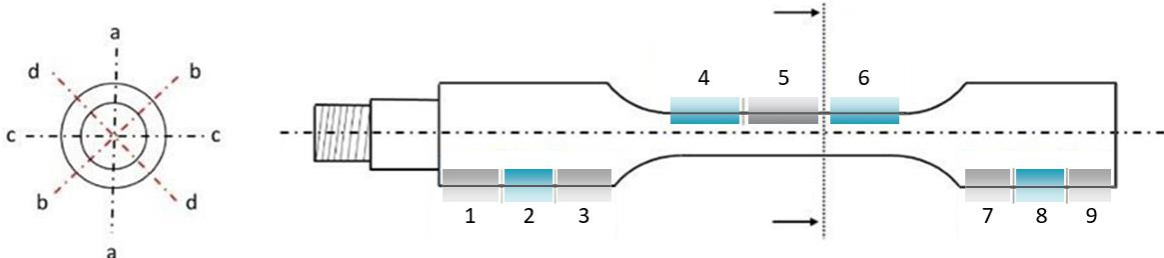
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 16

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	14,76	15,059	15,049	9,01	9,175	9,134	14,624	14,801	14,992
B	15,119	15,275	15,092	9,022	9,142	9,046	14,45	14,747	14,859
C	14,553	14,582	14,648	8,969	9,188	9,079	15,032	14,461	14,898
D	14,406	14,679	15,087	8,863	8,811	8,974	14,77	14,934	14,802
<b>Media</b>	<b>14,710</b>	<b>14,899</b>	<b>14,969</b>	<b>8,966</b>	<b>9,079</b>	<b>9,058</b>	<b>14,719</b>	<b>14,736</b>	<b>14,888</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1,10	Fuerza (N)	10,78
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	10,107
Ciclos	340.291	Tiempo rotura (min)	189,05
L-x rotura (mm)	67,10	Tipo de rotura	Completa

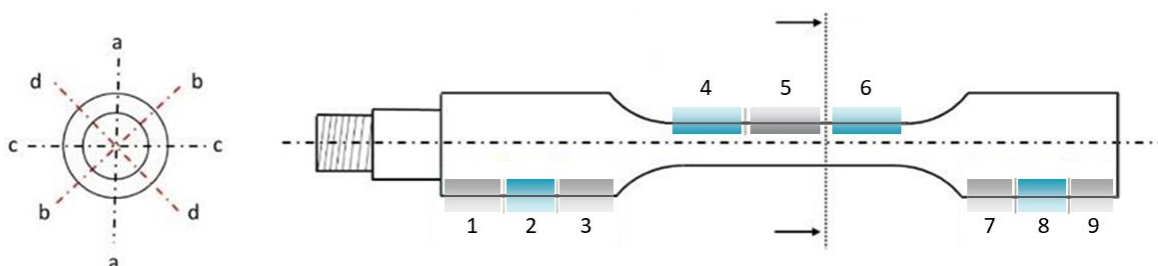
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 17

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	15,062	14,834	14,567	9,341	9,012	8,991	14,604	14,931	14,775
B	14,545	14,792	14,675	9,058	8,918	9,261	14,522	15,193	15,002
C	15,121	14,974	14,715	9,295	9,008	8,814	15,139	14,475	14,937
D	14,898	14,585	15,162	8,856	9,229	8,941	14,819	14,461	14,88
<b>Media</b>	<b>14,907</b>	<b>14,796</b>	<b>14,780</b>	<b>9,138</b>	<b>9,042</b>	<b>9,002</b>	<b>14,771</b>	<b>14,765</b>	<b>14,899</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1,10	Fuerza (N)	10,78
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	10,157
Ciclos	429.366	Tiempo rotura (min)	238,54
L-x rotura (mm)	67,43	Tipo de rotura	Completa

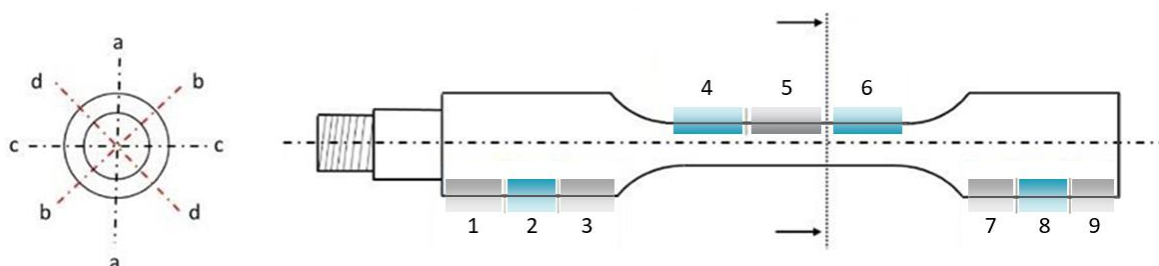
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 18

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	14,598	14,819	15,176	8,847	9,103	8,829	14,597	14,706	14,937
B	14,55	14,477	14,896	8,863	8,954	9,023	14,434	14,574	14,788
C	14,869	15,159	14,833	8,857	8,918	8,823	14,522	14,589	15,044
D	14,996	14,839	14,813	8,978	9,180	8,88	14,711	14,664	14,949
<b>Media</b>	<b>14,753</b>	<b>14,824</b>	<b>14,930</b>	<b>8,886</b>	<b>9,039</b>	<b>8,889</b>	<b>14,566</b>	<b>14,633</b>	<b>14,930</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1,10	Fuerza (N)	10,78
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	10,164
Ciclos	265.012	Tiempo rotura (min)	147,23
L-x rotura (mm)	67,48	Tipo de rotura	Completa

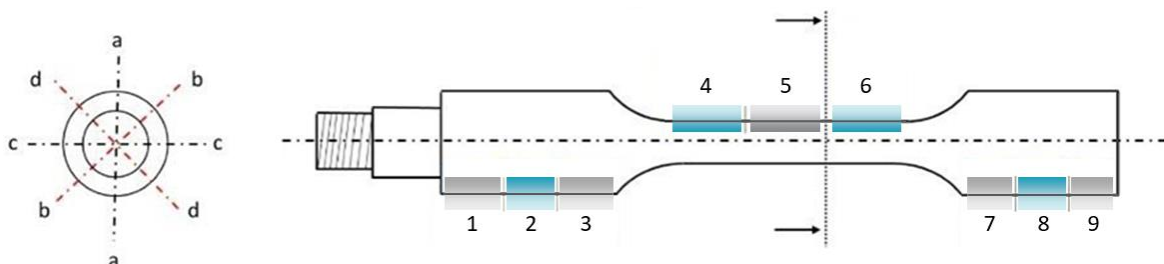
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 19

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	14,493	14,738	14,487	9,423	9,258	8,918	15,073	14,846	14,996
B	14,448	14,857	14,66	9,305	9,174	9,052	15,193	14,563	14,745
C	15,213	14,845	15,092	9,18	8,803	9,006	14,600	15,022	14,887
D	14,895	14,570	14,86	9,187	8,752	9,107	15,031	14,756	14,765
<b>Media</b>	<b>14,762</b>	<b>14,753</b>	<b>14,775</b>	<b>9,274</b>	<b>8,997</b>	<b>9,021</b>	<b>14,974</b>	<b>14,797</b>	<b>14,848</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1,10	Fuerza (N)	10,78
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	10,172
Ciclos	476.755	Tiempo rotura (min)	264,86
L-x rotura (mm)	67,53	Tipo de rotura	Completa

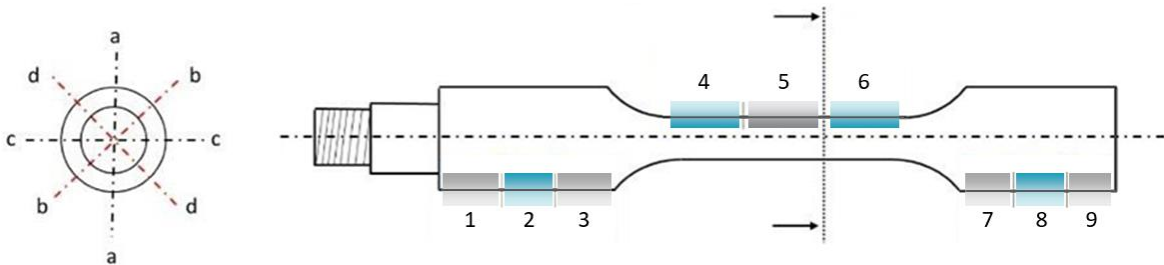
## HOJA DE DATOS VIDA A FATIGA

**MATERIAL** PLA HR-3D870

**ID. ENSAYO** Probeta 20

DATOS DEL PROCESO		OBSERVACIONES
Tª extrusión (°C)	215	
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	14,785	14,819	14,951	9,377	8,823	9,156	15,218	14,447	15,116
B	14,816	14,933	15,077	8,954	8,954	9,155	14,561	14,763	14,864
C	14,701	14,462	14,71	9,371	8,961	9,254	14,546	14,701	14,884
D	14,788	15,084	14,997	8,994	9,065	8,968	15,162	14,463	14,858
<b>Media</b>	<b>14,773</b>	<b>14,825</b>	<b>14,934</b>	<b>9,174</b>	<b>8,951</b>	<b>9,133</b>	<b>14,872</b>	<b>14,594</b>	<b>14,931</b>

## ENSAYO DE FATIGA

Carga (kg)	1,10	Fuerza (N)	10,78
Revoluciones (rpm)	1.800	Tensión (MPa)	10,169
Ciclos	322.828	Tiempo rotura (min)	179,35
L-x rotura (mm)	67,51	Tipo de rotura	Completa