



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

---

**Escola Tècnica Superior d'Enginyeries  
Industrial i Aeronàutica de Terrassa**

Titulació:

**Máster Universitario en Ingeniería Industrial.  
Especialidad Mecánica**

Alumno:

**ORIOL TRAVER RAMOS**

Título:

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL PROCESO DE  
FABRICACIÓN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE  
ESPECÍMENES MODELADOS POR DEPOSICIÓN FUNDIDA**

Director del TFM : **Dr. JORDI ROMEU GARBÍ**

Codirector del TFM: **RAMÓN JEREZ MESA**

Convocatoria: **JUNIO 2017**

## Contenido

Índice de figuras.....	3
Índice de tablas.....	6
Tabla de símbolos.....	7
Resum .....	8
Resumen.....	8
Abstract.....	9
Agradecimientos .....	10
1. Introducción.....	11
1.1. Motivación .....	11
1.2. Objeto.....	11
1.3. Alcance.....	12
1.4. Requerimientos .....	13
1.5. Justificación de la utilidad .....	13
2. Estado del arte .....	14
2.1. Tecnologías de Fabricación Aditiva (AM).....	14
2.1.2. Tipos de tecnologías <i>Additive Manufacturing</i> (AM) para polímeros..	15
2.2. Impresión por deposición fundida .....	17
2.3. Aplicaciones de las tecnologías AM.....	18
2.4. Estudio de la influencia de los parámetros de impresión respecto a las propiedades mecánicas .....	20
2.4.1. Estrategia de impresión ( <i>build style</i> ).....	23
2.5. Resumen .....	25
3. Descripción de los experimentos de flexión en cuatro puntos.....	26
3.1. Probetas de estudio de flexión en cuatro puntos .....	27
3.1.1. PLA. Material utilizado en el estudio .....	27
3.2. Diseño del experimento. ....	28
3.2.1. Diseño de experimentos de Taguchi.....	31
3.2.2. Parámetros constantes durante el estudio.....	33
3.3. Fabricación de probetas .....	35
3.4. Máquina de ensayos, flexión en cuatro puntos. ....	36
3.5. Procedimiento del ensayo .....	37
3.5.1. Metrología .....	37
3.5.2. Ensayo .....	38
3.6. Procesado de datos.....	42

4.	Resultados y análisis de los ensayos flexión en cuatro puntos .....	48
4.1.	Resultados .....	48
4.2.	Análisis ANOVA.....	49
4.2.1.	Consideraciones.....	49
4.2.2.	Módulo de Young.....	50
4.2.2.	Límite elástico.....	56
4.2.3.	Tensión máxima .....	60
4.2.4.	Alargamiento máximo .....	62
4.2.5.	Densidad .....	65
4.2.6.	Resultado del análisis.....	68
5.	Discusión de los resultados del ensayo de flexión en cuatro puntos.....	71
5.1.	Orientación de impresión.....	71
5.2.	Altura de capa y anchura de hilo .....	74
5.3.	Velocidad.....	74
5.4.	Densidad de relleno y patrón .....	75
6.	Validación de la combinación óptima de parámetros de impresión en flexión con resultados de fatiga.....	77
6.1.	Descripción del estudio de la resistencia a la fatiga de especímenes impresos en 3D.....	77
6.2.	Metodología de evaluación.....	78
6.1	Comparación niveles óptimos con ensayos a flexión en cuatro puntos ....	79
6.1.1.	Comparación de los resultados.....	82
6.2.	Comparación niveles óptimos con ensayo de fatiga .....	82
6.2.2.	Fenómeno de la fatiga .....	82
6.2.3.	Ensayo de fatiga .....	83
6.2.4.	Comparación de los resultados.....	91
7.	Conclusiones .....	93
8.	Prospectiva y trabajos futuros.....	95
9.	Bibliografía .....	96
10.	Anexo.....	98
	I: Presupuesto.....	98
	II: Recopilación fotográfica .....	102

## Índice de figuras

Figura 2.1. Esquema y partes básicas de máquinas con tecnología de esterolitografía (SLA).....	15
Figura 2.2. Esquema y partes básicas de máquinas con tecnología de sinterización selectiva por láser (SLS)..	16
Figura 2.3. Esquema y partes básicas de una maquina por tecnología de base sólida (LOM).....	17
Figura 2.4. Esquema y partes básicas de una máquina de modelado por filamento fundido (FFF).....	18
Figura 2.5. Conducto deflector de combustible para turbinas de gas impreso por SLS. ....	19
Figura 2.6. Modelos de órganos impresos en 3D. ....	19
Figura 2.7. Prototipo de herramienta impreso en la Estación Espacial.....	20
Figura 2.8. Orientaciones de apilamiento de capas. ....	21
Figura 2.9. Proceso de soldadura entre hilos.....	22
Figura 2.10. Uniones entre hilos de capa y entre capas.....	22
Figura 2.11. Sección de una pieza impresa con dos tipos de patrón de relleno. Izquierda: honeycomb, Derecha: linear.....	23
Figura 2.12. Patrones y densidad de relleno.....	24
Figura 2.13. Geometrías de material de soporte.....	25
Figura 3.1. Deformaciones en una viga biapoyada con carga distribuida. ....	26
Figura 3.2. Distribución del esfuerzo en la sección. ....	26
Figura 3.3. Medidas de las probetas: 80 x 10 x 4 mm, estándar ASTM D6272 ..	27
Figura 3.4. Densidad de relleno. a) 25% b) 50% c) 75%. Slic3r.....	29
Figura 3.5. Esquema apilamiento en Z, vertical. ....	30
Figura 3.6. Fotografía, apilamiento en Z, vertical. ....	30
Figura 3.7. Esquema apilamiento en X, planas.....	30
Figura 3.8. Fotografía, apilamiento en X, planas.....	30
Figura 3.9. Esquema apilamiento en Y, canto.....	30
Figura 3.10. Fotografía, apilamiento en Y, canto.....	30
Figura 3.11. Patrones de relleno. a) linear b) rectilinear c) honeycomb. Slic3r.	31
Figura 3.12. Interacción entre parámetros en la matriz de Taguchi L27. ....	32
Figura 3.13. Plano de sección, con el espesor del contorno .....	33
Figura 3.14. Imagen de la sección, detalle en los contornos y relleno. Slic3r....	33
Figura 3.15. Fotografía de la impresora 3D, Pyramid3DStudio .....	35
Figura 3.16. Máquina multiensayo elctromecánica. Laboratorio de material EEBE .....	36
Figura 3.17. Plantilla de metrología. Fuente: DEFAM .....	37
Figura 3.18. Esquema del método de ensayo flexión en 4 puntos. ....	38
Figura 3.19. Esquema de la configuración del ensayo.....	39
Figura 3.20. Equipo de realización del ensayo flexión en 4 puntos. Laboratorio de materiales EEBE.....	41
Figura 3.21. Proceso de sincronización de fuentes.....	43
Figura 3.22. Posición inicial de marcadores.....	44
Figura 3.23. Posición final (cruces rojas) e inicial (cruces verdes) de los marcadores.....	44

Figura 3.24. Medición de la resolución. Grosor de la probeta: 3,95 mm. N° píxeles; 111. Ratio: 27,75 mm/píxel. ....	45
Figura 3.25. Plantilla curva tensión – deformación. ....	47
Figura 4.1. Curva tensión deformación comportamiento frágil. ....	49
Figura 4.2. Curva tensión deformación comportamiento dúctil. ....	49
<i>Figura 4.3. Efectos principales para medias, módulo de Young. ....</i>	<i>50</i>
Figura 4.4. Efectos principales para relaciones SN, módulo de Young. ....	52
Figura 4.5. Interacción entre las medias de los parámetros. ....	53
Figura 4.6. Interacción entre las relaciones SN. ....	54
Figura 4.7. Residuos para medias. ....	55
Figura 4.8. Residuos para relaciones SN. ....	55
Figura 4.9. Efectos principales para medias, límite elástico. ....	56
Figura 4.10. Efectos principales relaciones SN. ....	58
Figura 4.11. Residuos de las medias. $R_{p0,2}$ ....	59
Figura 4.12. Residuos relaciones SN. $R_{p0,2}$ ....	59
Figura 4.13. Efectos principales para medias, tensión máxima. ....	60
Figura 4.14. Efectos principales para relaciones SN, tensión máxima. ....	61
Figura 4.15. Residuos de medias. $\sigma_{m\acute{a}x}$ ....	62
Figura 4.16. . Residuos de medias. $\epsilon$ ....	65
Figura 4.17. Residuos relaciones. SN. $\epsilon$ ....	65
Figura 4.18. Efectos principales para medias, densidad ....	65
Figura 4.19. Efectos principales para relaciones SN, densidad. ....	67
Figura 4.20. Residuos de medias. $\rho$ ....	68
Figura 4.21. Residuos de medias. $\rho$ ....	68
<i>Figura 5.1. Diagrama orientación de capas en Z. ....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.2. Diagrama orientación de capas en Y. ....</i>	<i>71</i>
Figura 5.3 Sección de rotura, probeta con orientación Z. Probeta 17_2. Fotografía microscópica. ....	72
Figura 5.4. Sección de rotura, probeta con orientación Y. Probeta 14_3. Fotografía microscópica. ....	72
Figura 5.5. Diagrama orientación de capas en X. ....	72
Figura 5.6. Diagrama orientación de capas en Y. ....	72
Figura 5.7. Sección de rotura, probeta con orientación X, fallo por rotura. Probeta 1_2 Fotografía microscópica. ....	73
Figura 5.8. Fotografía de probeta con orientación X, fallo por laminación. Probeta D_1, D_2. ....	73
Figura 5.9. Sección de rotura, probeta con orientación Y. Probeta 14_3. Fotografía microscópica. ....	73
Figura 5.10. Probeta con altura de capa 0,3 mm y anchura de hilo 0,3mm. Probeta 9_2. Fotografía microscópica ....	74
Figura 5.11. Probeta con altura de capa 0,1 mm y anchura de hilo 0,6mm. Probeta 21_3. Fotografía microscópica ....	74
Figura 5.12. Dimensiones y detalle de la sección de las probetas. ....	75
Figura 5.13. Sección de la probeta 2_2. Fotografía microscópica. ....	75
Figura 6.1. Diagrama metodología de evaluación de la combinación de niveles óptimos. ....	79
Figura 6.2. Probetas impresas con parámetros Fatiga 2016. ....	81
Figura 6.3. Probetas impresas con parámetros Flexión 2017 ....	81
Figura 6.4. Tensiones alternativas. ....	83

Figura 6.5. Dimensiones de las probetas para el ensayo de fatiga. ....	83
Figura 6.6. Proceso de impresión. ....	84
Figura 6.7. Figura 6.8. Proceso de impresión. ....	84
Figura 6.9. Máquina de ensayos de fatiga. Laboratorio de mecánica de EEBE .	84
Figura 6.10. Esquema del funcionamiento de la máquina de ensayos de fatiga. Fuente: Otero, J. ....	85
Figura 6.11. Curva S-N, tensión respecto número de ciclos . ....	86
Figura 6.12. Curva de Wohler. Fuente: <a href="http://www.comsol.com/blogs/fatigue">www.comsol.com/blogs/fatigue</a> . ....	86
Figura 6.13. Factor q respecto del radio de redondeo y el material. ....	88
Figura 6.14. Factor $K_t$ respecto el cambio de sección. ....	88
<i>Figura 6.15. Dimensiones de la probeta y aplicación de la carga.</i> ....	89
<i>Figura 6.16. Curva SN, de la combinación Fatiga 2016 y Flexión.</i> ....	91
<i>Figura 6.17. Curva de Wöhler, de la combinación Fatiga 2016 y Flexión.</i> ....	91
Figura 10.1 Probetas ensayadas ....	102
Figura 10.2 Fotografía sección rotura ....	102
Figura 10.3 Fotografía sección rotura ....	102
Figura 10.4 Probetas ensayadas ....	102
Figura 10.5 Fotografía sección rotura ....	102
Figura 10.6 Fotografía sección rotur ....	102
Figura 10.7 Probetas ensayadas ....	103
Figura 10.8 Fotografía sección rotura ....	103
Figura 10.9 Probetas ensayadas ....	103
Figura 10.10 Fotografía sección rotura ....	103
Figura 10.11 Probetas ensayadas ....	104
Figura 10.12 Fotografía sección rotura ....	104
Figura 10.13 Probetas ensayadas ....	104
Figura 10.14 Probetas ensayadas ....	105
Figura 10.15 Fotografía sección rotura ....	105
Figura 10.16 Probetas ensayadas ....	105
Figura 10.17 Probetas ensayadas ....	105
Figura 10.18 Fotografía sección rotura ....	106
Figura 10.19 Probetas ensayadas ....	106
Figura 10.20 Fotografía sección rotura ....	106
Figura 10.21 Probetas ensayadas ....	107
Figura 10.22 Fotografía sección rotura ....	107
Figura 10.23 Probetas ensayadas ....	107
Figura 10.24 Probetas ensayadas ....	108
Figura 10.25 Probetas ensayadas ....	108
Figura 10.26 Fotografía sección rotura ....	108

## Índice de tablas

Tabla 4.1. Resultado promedios y desviaciones estándar de las propiedades mecánicas y físicas.....	48
Tabla 4.2. P valores para medias de los parámetros de impresión. ....	51
Tabla 4.3. P valores para relacionar señal-ruido de los parámetros de impresión respecto el módulo de Young. ....	53
Tabla 4.4. P valores para relacionar medias de los parámetros de impresión respecto al límite elástico.....	57
Tabla 4.5. P valores para relacionar señal-ruido de los parámetros de impresión respecto al límite elástico.....	58
Tabla 4.6. P valores para relacionar medias de los parámetros de impresión respecto a la tensión máxima. ....	60
Tabla 4.7. P valores para relacionar señal-ruido de los parámetros de impresión respecto a la tensión máxima. ....	61
Tabla 4.8. P valores para relacionar medias de los parámetros de impresión respecto al alargamiento.....	63
Tabla 4.9. P valores para relacionar señal – ruido de los parámetros de impresión respecto al alargamiento. ....	64
Tabla 4.10. P valores para relacionar medias de los parámetros de impresión respecto la densidad.....	66
Tabla 4.11. P valores para relacionar señal–ruido de los parámetros de impresión respecto la densidad. ....	67
Tabla 4.12. Valor de la significancia de los parámetros respecto las respuestas. ....	68
Tabla 4.13. Nivel de los parámetros para maximizar la respuesta. ....	69
Tabla 4.14. Combinación óptima de parámetros para maximizar la rigidez y resistencia a flexión. ....	69
Tabla 4.15. Combinación óptima y significativa de parámetros para maximizar la rigidez y resistencia a flexión .....	70
Tabla 6.1. Parámetros y niveles de estudio del proyecto Fatiga. 2016.....	77
Tabla 6.2. Combinación de niveles óptimos para maximizar la resistencia a fatiga. Proyecto Fatiga 2016. ....	78
Tabla 6.3. Combinación Fatiga 2016. ....	79
Tabla 6.4. Combinación Flexión 2017.....	79
Tabla 6.5. Resultados ensayo de flexión 4 puntos con combinación de parámetros Fatiga 2016.....	80
Tabla 6.6. Resultados ensayo de flexión 4 puntos con combinación de parámetros Flexión 2017. ....	80
Tabla 6.7. Comparación de resultados. ....	80
Tabla 6.8. Niveles de fuerza aplicada. ....	85
Tabla 6.9. Niveles de fuerza y tensión en el ensayo de fatiga.....	90

## Tabla de símbolos

<b>h</b>	hora
<b>min</b>	minuto
<b>s</b>	segundo
<b>mm</b>	milímetro
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>mg</b>	miligramo
<b>g/u</b>	gramos/unidad
<b>N</b>	Newton
<b>N</b>	Número de ciclos
<b>N · m</b>	Newton por metro
<b>MPa</b>	MegaPascal
<b>KW</b>	Kilovatio
<b>W/h</b>	vatio/hora
<b>KWh</b>	Kilovatio/hora
<b>€/KWh</b>	Euro/Kilovatio/hora
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto
<b>GHz</b>	Gigahercio
<b>E</b>	Módulo de Young
<b>R<sub>p0,2</sub></b>	Límite elástico
<b>ρ</b>	densidad
<b>α</b>	Nivel de significación
<b>π</b>	Número pi
<b>ε</b>	Alargamiento máximo
<b>log</b>	Logaritmo
<b>R</b>	Ratio de velocidad de flexión (mm/min)
<b>L</b>	Distancia entre rodillos de soporte (mm)
<b>d</b>	Grosor de la probeta (mm)
<b>Z</b>	Ratio de velocidad de deformación de las fibras(mm/mm/min)
<b>D</b>	Deflexión (mm)
<b>r</b>	Deformación (mm)
<b>S</b>	Tensión en la fibra más externa (MPa)
<b>P</b>	Carga aplicada (N)
<b>b</b>	Anchura de la probeta
<b>d</b>	Grosor de la probeta (mm)
<b>I</b>	Inercia (mm <sup>4</sup> )
<b>I<sub>x</sub></b>	Inercia de la sección resistente (mm <sup>4</sup> )
<b>M<sub>f</sub></b>	Momento flector (N·mm)
<b>Y<sub>máx</sub></b>	Distancia entre la fibra externa y fibra neutra (mm)
<b>h</b>	Altura de la sección
<b>q</b>	factor ratio material radio de redondeo
<b>A<sub>resistente</sub></b>	Área de la sección resistente (mm <sup>2</sup> )
<b>D<sub>eq</sub></b>	Diámetro equivalente (mm)
<b>K<sub>t</sub></b>	factor radio de redondeo respecto cambio de sección
<b>K<sub>f</sub></b>	factor de entalla
<b>σ<sub>máx</sub></b>	Tensión máxima
<b>σ<sup>l</sup><sub>10<sup>3</sup></sub></b>	Tensión a 10 <sup>3</sup> ciclos
<b>σ<sup>l</sup><sub>f</sub></b>	Tensión límite de fatiga
<b>σ<sub>f</sub></b>	Tensión límite de fatiga pieza real

## Resum

El present projecte ha tingut com a objectiu analitzar la resposta de les propietats mecàniques d'espècimens d'àcid polilàctic (PLA) fabricats per modelatge per deposició fosa.

S'ha estudiat la influència de sis paràmetres d'impressió en la resistència a flexió mitjançant un disseny d'experiments L27 segons els arranjaments de Taguchi. Els paràmetres que s'han tingut en compte han estat: amplària de fil, altura de capa, densitat de farcit, orientació de capa, velocitat i patró de farcit.

Els espècimens han estat testejats mitjançant assajos a flexió en quatre punts i assajos de fatiga. La combinació de paràmetres òptims obtinguda serà la que maximitzi la rigidesa i resistència a flexió. Els resultats han estat recolzats i avalats amb fotografies microscòpiques de les seccions de trencament i posteriorment s'han validat comparant-los amb altres resultats d'un estudi anterior.

S'ha determinat la millor combinació de paràmetres. L'orientació és el paràmetre més influent, seguit de l'altura de capa, l'amplària de fil i en menor mesura la velocitat. La densitat i patró de farcit no mostren influència significativa. Les orientacions de capa paral·leles a les tensions resulten les més resistents i les propietats mecàniques milloren amb altures de capa petites i amplàries de fil grans.

## Resumen

El presente proyecto ha tenido como objetivo analizar la respuesta de las propiedades mecánicas de especímenes de ácido poliláctico (PLA) fabricados por modelado por deposición fundida.

Se ha estudiado la influencia de seis parámetros de impresión en la resistencia a flexión mediante un diseño de experimentos L27 según los arreglos de Taguchi. Los parámetros que se han tenido en cuenta han sido: anchura de hilo, altura de capa, densidad de relleno, orientación de capa, velocidad y patrón de relleno.

Los especímenes han sido testeados mediante ensayos a flexión en cuatro puntos y ensayos de fatiga. La combinación de parámetros óptimos obtenida será la que maximice la rigidez y resistencia a flexión. Los resultados han sido respaldados y avalados con fotografías microscópicas de las secciones de rotura y posteriormente se han validado comparándolos con otros resultados de un estudio anterior.

Se ha determinado la mejor combinación de parámetros. La orientación es el parámetro más influyente, seguido de la altura de capa, la anchura de hilo y en menor medida la velocidad. La densidad y patrón de relleno no muestran influencia significativa. Las orientaciones de capa paralelas a las tensiones resultan las más resistentes y las propiedades mecánicas mejoran con alturas de capa pequeñas y anchuras de hilo grandes.

## **Abstract**

This paper aims to analyze the mechanical properties response of polylactic acid (PLA) parts manufactured through fused filament fabrication.

The influence of six manufacturing factors (layer height, filament width, fill density, layer orientation, velocity and infill pattern) on flexural resistance of PLA specimens is studied through an L27 Taguchi experimental array.

The specimens have been tested on four point bending machine and on rotating bending machine. The optimal set of parameters and levels will be, which optimize the mechanical properties. The results will be supported with microscopic photographs of rupture sections and will be validated by comparisons with previous studies results.

The optimal set of parameters and levels deriving in the highest flexural resistance have been determined. Orientation is the most influential parameter, followed by layer height, filament width and print velocity. The density and filling pattern show no significant influence. The layer orientation parallel to the stress direction is the most resistant. Mechanical properties improve with small layer heights and large filament widths.

## **Agradecimientos**

Después de todo el trabajo realizado en este proyecto quiero dar las gracias a una serie de personas que me han prestado su ayuda, tanto a nivel académico como a nivel personal.

En primer lugar quiero agradecer el apoyo del grupo de investigación DEFAM de la UPC, especialmente a Jordi Llumà por su ayuda prestada en la preparación y realización de los experimentos. A Ramón Jerez, codirector del proyecto, y a Toni Travieso, por su colaboración en el planteamiento del proyecto y por su cooperación y consejos durante el mismo. A Daniel Puig, por su contribución con el trabajo realizado previamente. Y al director del proyecto Dr. Jordi Romeu.

También quiero dar las gracias a Sebastián Witosky por su ayuda en la fabricación de las probetas y por la cesión de la impresora 3D.

Finalmente quiero agradecer el apoyo de mi familia, especialmente a mi padre Carlos por sus consejos, ayuda e interés.

A todos, muchas gracias, ya que con vuestro apoyo he podido realizar este trabajo final de máster.

# 1. Introducció

En este capítulo se muestran las razones por las que se ha llevado a cabo este trabajo de investigación, se expone y plantea el problema y se presentan los objetivos.

## 1.1. Motivació

La Fabricación por Deposición Fundida o Fabricación por Filamento Fundido (FDM/FFF), más conocida por impresión 3D; es un fenómeno que está revolucionando la forma en la que entendemos la fabricación. Esta tecnología ha despertado gran interés por parte de todo tipo de industria y de la sociedad en general. El interés viene dado por las claras ventajas que presenta respecto a las tecnologías de fabricación tradicionales: gran libertad de diseño e innovación, rapidez desde el diseño a la fabricación, capacidad de fabricación de piezas únicas, etc. Además, es una de las pocas tecnologías de fabricación que ha llegado a los particulares, así, diseñadores, arquitectos, ingenieros y cualquier persona con conocimientos técnicos, pueden desarrollar sus proyectos al completo, con el prototipado o incluso con la fabricación de piezas finales.

Sin embargo, la impresión 3D aún no es aplicable a la mayoría de procesos o técnicas. El comportamiento mecánico y las características físicas de las piezas finales son muy difíciles de predecir, debido al desconocimiento de la influencia de los parámetros de fabricación.

El gran impulso de esta tecnología en todos los campos y la falta de conocimiento del comportamiento mecánico respecto el proceso de fabricación, evidencian la necesidad de desarrollar el presente estudio.

## 1.2. Objeto

El objetivo de este proyecto es el estudio de la influencia del proceso de fabricación en las propiedades mecánicas de piezas fabricada por FDM utilizando PLA como material.

Este objetivo se subdivide en otros tres más concretos:

- Analizar la influencia de los parámetros principales de fabricación en el comportamiento mecánico de las piezas, tanto por separado, como sus interacciones,
- Encontrar e identificar, la combinación de parámetros de impresión que maximicen las propiedades mecánicas, específicamente: la rigidez y la resistencia a flexión.
- Evaluar y validar la combinación de parámetros óptima encontrada en este estudio, comparándola con otra combinación de parámetros de un estudio anterior de resistencia a fatiga.

### 1.3. Alcance

Con el objetivo de conocer la influencia de los parámetros de fabricación y de sus interacciones, y de encontrar su combinación óptima, se realizará un diseño de experimentos según el método de Taguchi (L27).

Las propiedades mecánicas de los experimentos se testearán mediante ensayos a flexión en cuatro puntos con el objetivo de encontrar las propiedades mecánicas de rigidez y resistencia a flexión.

Los resultados de los experimentos se procesarán mediante un análisis estadístico. Las conclusiones del análisis se apoyarán con fotografías de las secciones de rotura de las probetas ensayadas mediante flexión en cuatro puntos.

Para validar y corroborar los resultados encontrados en el estudio, se cruzarán dos estudios de análisis del comportamiento mecánico de probetas impresas. Uno será el nuestro, al que llamaremos *Flexión 2017* y el otro, el realizado en el año 2016 dentro del grupo de investigación DEFAM de la UPC, que denominaremos *Fatiga 2016*.

En primer lugar se imprimirán probetas con los niveles óptimos encontrados a partir del estudio de *Fatiga 2016* y se ensayarán a flexión en cuatro puntos. De esta manera se evaluará cuál es la mejor combinación de parámetros que nos permitirán maximizar la resistencia y rigidez a flexión.

En segundo lugar se realizarán ensayos a fatiga, con probetas impresas con los parámetros óptimos encontrados en el presente estudio de flexión en cuatro puntos, (*Flexión 2017*).

Con ambos resultados se evaluará la mejor combinación de parámetros respecto a la resistencia a fatiga.

## 1.4. Requerimientos

Los requerimientos del presente proyecto consisten en;

Conocer la influencia de los parámetros y de sus interacciones y encontrar la combinación óptima en probetas de PLA por FDM.

Construir el diseño de experimentos según el arreglo de Taguchi utilizando una matriz L27m repitiendo cada ensayo cuatro veces para corroborar la precisión de los resultados obtenidos,

Averiguar el comportamiento mecánico de los experimentos realizando ensayos de flexión en cuatro puntos. En la metodología del ensayo se deberá seguir el método estandarizado D6272-02 de ensayo flexión en cuatro puntos para plásticos sin esfuerzo, con refuerzo, o para materiales aislantes de la electricidad.

Los resultados del comportamiento mecánico deberán ser validados mediante fotografías microscópicas de las secciones de rotura que nos permitan deducir el tipo de fallo de rotura,

La combinación óptima de parámetros encontrada en el estudio debe ser válida.

## 1.5. Justificación de la utilidad

El presente proyecto surge de la necesidad de conocer la influencia de los parámetros de fabricación en el comportamiento de piezas fabricadas por FDM, debido que actualmente no hay modelos claros de esta correlación.

Con los resultados del estudio se conocerá la influencia de los parámetros y de sus interacciones y se encontrará la combinación óptima que permitirá maximizar la rigidez y resistencia a flexión.

Los resultados obtenidos serán determinantes para poder definir los procesos de fabricación de piezas impresas y mejorar su comportamiento mecánico. Todo ello podrá ser aplicado en el diseño, prototipado y fabricación de piezas finales, tanto para uso privado, comercial o industrial.

## 2. Estado del arte

En el siguiente capítulo se hace una introducción a las tecnologías de fabricación aditiva explicando las más utilizadas y se profundiza en la tecnología de modelado por deposición fundida o de modelado por filamento fundido (FDM o FFF) usada como base de estudio en el presente trabajo. Además, se muestran y contrastan los trabajos sobre FDM que son antecedentes y base del presente proyecto

### 2.1. Tecnologías de Fabricación Aditiva (AM)

La fabricación aditiva o *Additive Manufacturing*, en adelante (AM) es el método de fabricación mediante el cual, partiendo de un sólido digitalizado en 3D se fabrica el objeto físico por adición de material, normalmente capa a capa. A diferencia de otros métodos de fabricación tradicional de extracción de material.

La fabricación aditiva es una tecnología nueva comparada con los procesos tradicionales, aunque se conoce desde 1984, cuando Chuck Hull patentó su sistema en EEUU con el nombre de *stereolithography*. En 1986 creó la conocida empresa de *3DSystems*. Otras empresas la siguieron, creando así la fabricación aditiva o de prototipo rápido (*Rapid Prototyping*). En 1990 se empezó a aplicar la tecnología en piezas para fundición, en 1995 para matrices de moldes y en el año 2000 para piezas de fabricación rápida (*Rapid Manufacturing*). A partir de entonces el desarrollo de estas tecnologías ha avanzado muy rápidamente.

El mayor desarrollo de esta tecnología se ha producido en los últimos cinco años, debido principalmente a:

- La incorporación de nuevos materiales con mejores prestaciones.
- Vencimiento de patentes (que ha permitido la entrada de pequeñas empresas en el mercado).
- Gran promoción y difusión de esta tecnología a través de internet.
- Aplicaciones que solo son posibles con esta tecnología. (Fontrodona, J. y Blanco, R. 2014)

### 2.1.2. Tipos de tecnologías *Additive Manufacturing* (AM) para polímeros

Las tecnologías de AM se pueden dividir en tres categorías según el material base que utilizan: material líquido, sólido o en polvo.

A continuación se describen estas categorías y se explican las tecnologías más importantes de cada una de ellas.

#### Tecnología de base líquida

Este tipo de tecnología se basa en la solidificación de líquidos para crear capas del contorno del objeto. La estereolitografía (SLA) es la tecnología más popular dentro de esta categoría. La formación de las capas se hace curando resina líquida mediante una luz ultravioleta. La máquina se compone de un láser o luz ultravioleta, espejo, cubeta (donde se encuentra la resina), plataforma y paleta (Figura 2.1). El láser o luz ultravioleta ilumina la zona de líquido con el contorno de la pieza, así solidifica la capa de resina con la forma del objeto a crear, el espejo se encarga de dirigir la luz. Cuando la capa está solidificada, la plataforma desciende a una distancia igual a la altura de capa y sumergiendo la pieza y la paleta deja uniforme la capa de líquido superficial. Este proceso se repite sucesivamente hasta que se ha impreso toda la pieza.

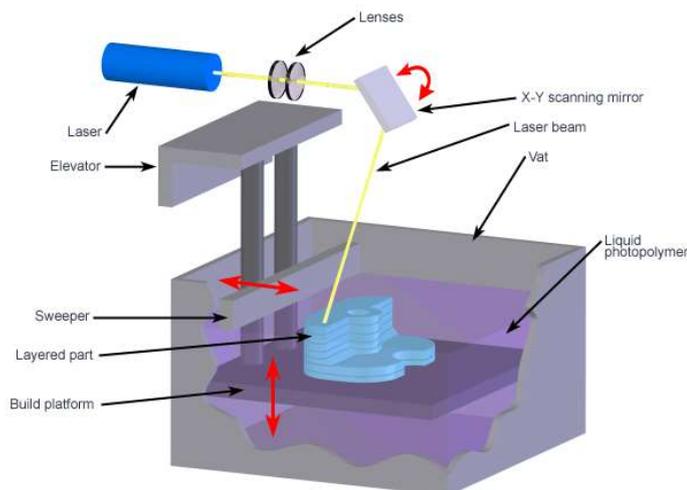


Figura 2.1. Esquema y partes básicas de máquinas con tecnología de estereolitografía (SLA).  
Fuente: [www.emaze.com](http://www.emaze.com)

### Tecnología de base polvo

Esta tecnología se basa en la creación de capas sólidas a partir de polvo, mediante un láser o añadiendo un aglomerante. Uno de los métodos más utilizados es el *selective laser sintering* (SLS) que se puede utilizar para polímeros y metales. La máquina se compone de un láser, un espejo, una plataforma, una paleta y una cubeta donde se encuentra el polvo. (Figura 2.2). El proceso consiste en sinterizar la capa de polvo más superficial con la forma del objeto, gracias al aporte de energía de un láser, el cual escanea y funde el material selectivamente. Cuando la capa está sinterizada, la plataforma desciende una distancia igual a la altura de la capa y la paleta cubre la pieza con otra capa de polvo, la cual, se sinterizará a continuación. Este proceso se repite capa a capa hasta que se completa la pieza.

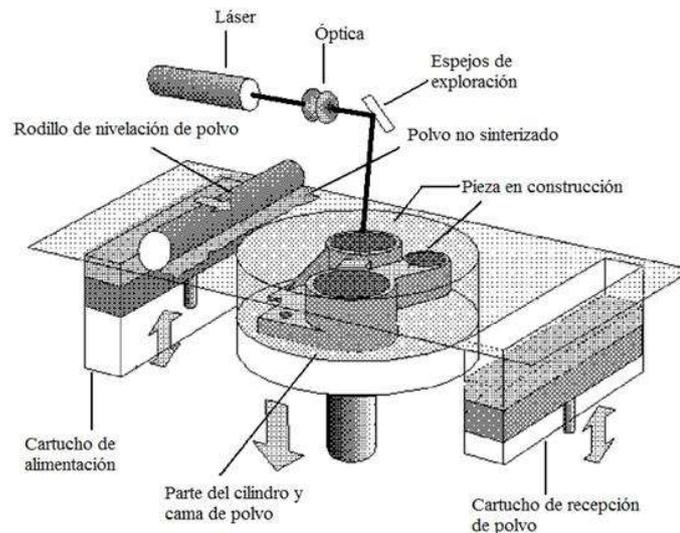


Figura 2.2. Esquema y partes básicas de máquinas con tecnología de sinterización selectiva por láser (SLS). Fuente: [www.tfmrimuned.wordpress.com](http://www.tfmrimuned.wordpress.com)

### Tecnología de base sólida

Este tipo de tecnologías utiliza como material polímeros en base sólida. La más extendida es el modelado por deposición fundida (FDM) sobre la cual se basa este trabajo y se explicará en el siguiente apartado. Otra tecnología que es una buena referencia es la llamada *Layered Object Manufacturing* (LOM). Los principales componentes de esta máquina son: un láser o cuchilla, un espejo móvil, una plataforma, un rollo calefactor, y un mecanismo alimentador (Figura 2.3). El funcionamiento es el siguiente: el mecanismo alimentador aplica una lámina de

polímero con un adhesivo y la hace avanzar sobre la plataforma, el rollo calefactor activa el adhesivo y el láser corta el contorno de la correspondiente capa del objeto, la plataforma baja y una nueva capa de deposita encima. El proceso se repite capa a capa hasta que la pieza es creada.

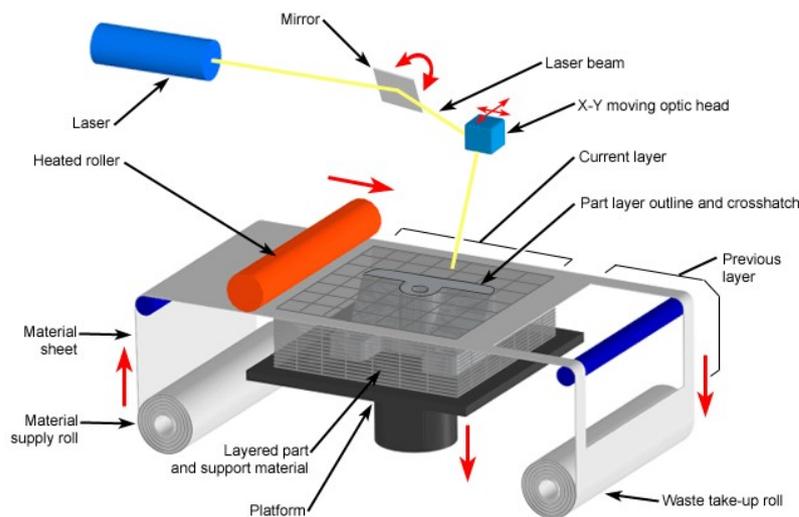


Figura 2.3. Esquema y partes básicas de una máquina por tecnología de base sólida (LOM).

Fuente: <http://www.3d-printers.com.au>

## 2.2. Impresión por deposición fundida

El presente trabajo se centra en esta tecnología de base sólida, conocida como Modelado por Deposición Fundida (FDM) o Fabricación por Filamento Fundido (FFF). Es la tecnología más popular y extendida particularmente en el ámbito doméstico debido a su simplicidad. La máquina consta de las siguientes partes: uno o dos extrusores con boquillas, una plataforma de fabricación y bobinas con el filamento base. (Figura 2.4). La base de funcionamiento es la siguiente: unos motores introducen el filamento base dentro del extrusor, éste se calienta, se funde y se extruye a través de la boquilla. La boquilla se mueve sobre la superficie de la plataforma y dibuja el contorno de la capa correspondiente de la pieza con el filamento extruido. Cuando la capa está completada, la boquilla sube o la plataforma baja una distancia igual a la altura de la capa. Seguidamente la boquilla vuelve a dibujar o imprimir una nueva capa de material encima de la anterior. Algunas impresoras 3D disponen de dos extrusores con los que pueden imprimir con dos colores y/o materiales diferentes. Una ventaja de la doble extrusión es

poder imprimir la pieza con un material resistente y los soportes con otro material; debido a ciertas geometrías utilizadas los soportes son imprescindibles y suelen ser de material menos resistente o soluble al agua, esto permite y facilita el post-procesado de las piezas.

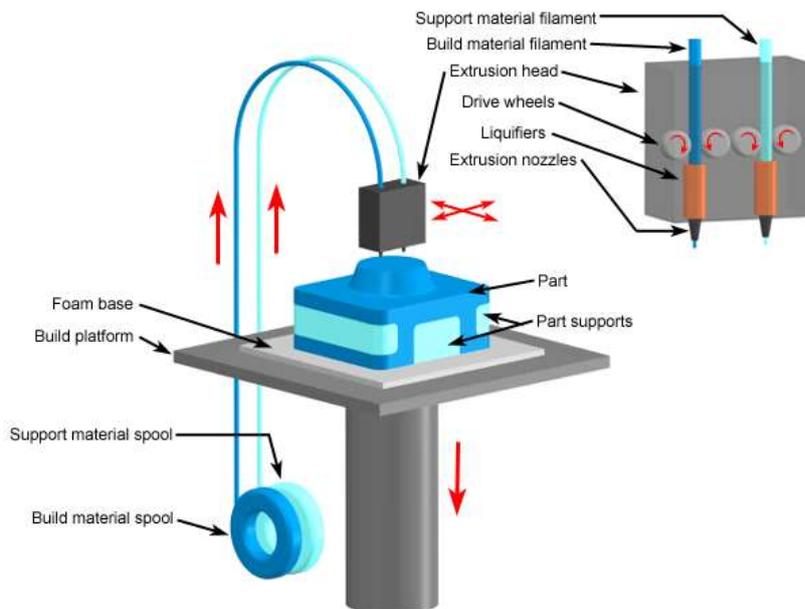


Figura 2.4. Esquema y partes básicas de una máquina de modelado por filamento fundido (FFF).  
Fuente: <http://www.custompartnet.com>

### 2.3. Aplicaciones de las tecnologías AM

Las claves de las tecnologías AM son la capacidad que tienen para crear geometrías muy complejas imposibles de conseguir con otras técnicas y la rapidez con la que se pasa del modelo digitalizado al modelo físico. Esta facilidad en la creación de piezas permite acelerar el ciclo de desarrollo del producto, mientras se diseña el producto se puede estar fabricando, y los utillajes para la fabricación convencional pueden ser impresos. Otras ventajas son: la fabricación totalmente personalizada y la fabricación flexible, debido a que los tiempos de preparación de la maquinaria son muy pequeños. (Fontrodona, J. y Blanco, R. 2014)

Estas ventajas son aplicadas en muchos ámbitos, tanto industriales, científicos y domésticos.

Empresas automovilísticas y aeronáuticas aprovechan la posibilidad de fabricar piezas sin limitación en el diseño y rapidez de fabricación. Ejemplos representativos de ésta tecnología son los conductos hidráulicos, y la fabricación de piezas para la industria aeronáutica, así *Boeing*, utiliza impresoras 3D para

hacer más de doscientas piezas para diez tipos de aeronaves diferentes; por ejemplo, un conducto deflector que se hacía con el ensamble de trece piezas, ahora se fabrica en titanio sinterizado por láser en una sola pieza (Kellner, T. 2016), (figura 2.5).



Figura 2.5. Conducto deflector de combustible para turbinas de gas impreso por SLS.  
Fuente: [www.3printr.com](http://www.3printr.com)

La biomedicina es otra gran industria que está apostando por las tecnologías AM. Gracias a la posibilidad de crear utensilios e implantes específicos para cada intervención quirúrgica y a la creación de modelos exactos, el cirujano puede practicar y planificar la intervención pudiendo agilizar la operación y evitar errores o complicaciones post-operatorias. (Kira, 2016) (figura 2.6).

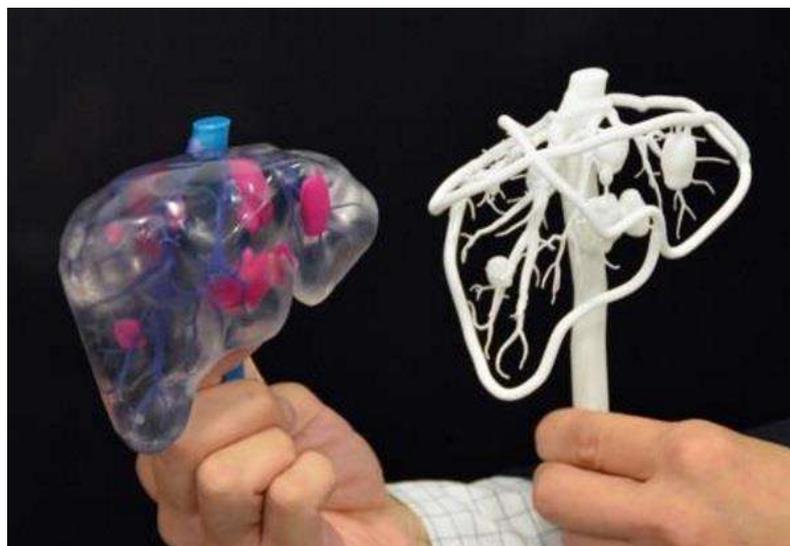


Figura 2.6. Modelos de órganos impresos en 3D. Fuente: [www.3ders.org](http://www.3ders.org)

Una de las mayores ventajas de las máquinas AM es su versatilidad. Permite fabricar gran cantidad de objetos utilizando el mismo material y la misma máquina.

Esta ventaja ya la ha puesto en práctica la NASA, imprimiendo pequeñas piezas en la Estación Espacial Internacional (ISS). Su objetivo es imprimir las piezas de repuesto en el espacio en vez de traerlas desde la tierra. En la figura 2.7 se muestra una llave impresa en la Estación Espacial Internacional. (NASA, 2014)

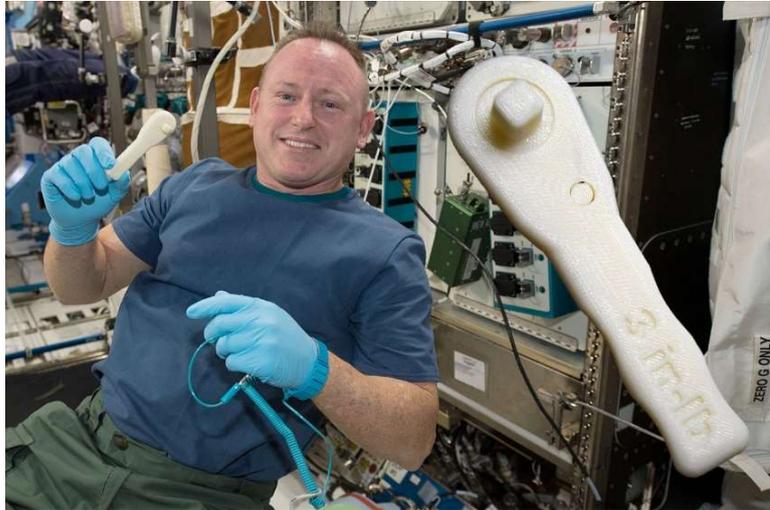


Figura 2.7. Prototipo de herramienta impreso en la Estación Espacial. Fuente: [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)

#### 2.4. Estudio de la influencia de los parámetros de impresión respecto a las propiedades mecánicas

El comportamiento mecánico de las piezas impresas en 3D es una de las propiedades más difíciles de predecir. Primero, debido a la gran variabilidad de parámetros a definir durante el proceso de fabricación. Segundo, debido a la gran heterogeneidad o anisotropía del material, provocado por la complejidad en las interacciones entre hilos y capas de hilos, (Espín, D. 2016).

La característica principal y común en todas las tecnologías AM es la construcción a través de apilamiento de capas. Este rasgo, provoca un comportamiento mecánico anisotrópico, debido a las diferencia entre las fuerzas de unión entre hilos de una misma capa (intracapa) y entre capas (intercapa). (Bellini y Güçeri 2003). Por esta razón, la orientación de las capas es el factor más importante y debe definirse teniendo en cuenta las condiciones de trabajo de la pieza. En la figura 2.8 se muestran dos orientaciones de apilamiento de capas. En la figura 2.8 (a) las capas están perpendiculares a la dirección de carga y la resistencia de la pieza es igual a la resistencia de las uniones entre capas. En la figura 2.8 (b) las capas están alineadas en la dirección de la carga y la resistencia de la pieza es igual a la resistencia de las uniones intracapa y de los propios hilos.

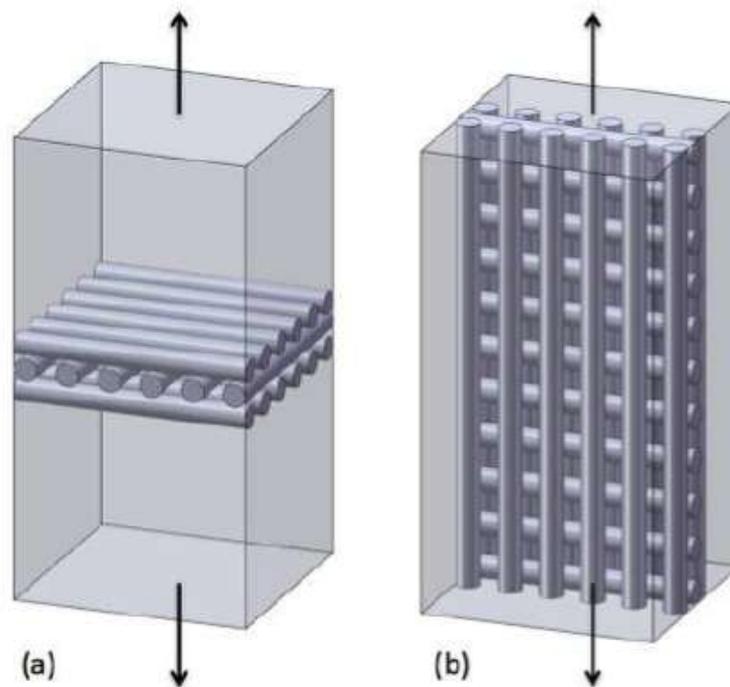


Figura 2.8. Orientaciones de apilamiento de capas. Fuente: Otero, J.2016

La resistencia de las piezas es el resultado de las resistencias de tres factores, ordenados de mayor a menor:

- de los filamentos,
- de la unión entre filamentos de una misma capa
- de la unión entre capas.

La resistencia propia de los hilos depende de las propiedades mecánicas de la materia prima y la resistencia de las uniones depende la cohesión entre filamentos, ésta es proporcional a la energía térmica de los hilos cuando entran en contacto al ser colocados. La unión es una sinterización local en la que se comparten cadenas poliméricas. (Bellehumeur et al. 2004). Este proceso es aplicable a todas las uniones, entre hilos de capa y entre capas (figura 2.9).

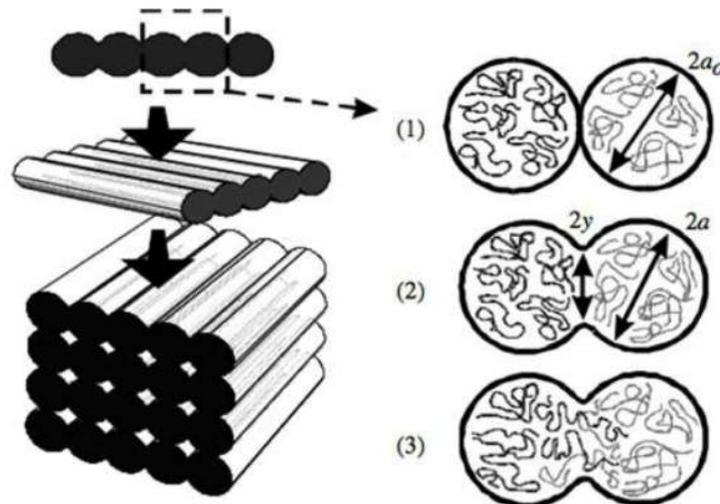


Figura 2.9. Proceso de soldadura entre hilos. Fuente: Bellehumeur et al. 2004.

En el proceso de impresión, primero se depositan los hilos formando la capa, cuando está completada se inicia la siguiente capa; por lo tanto, los hilos de capa conservan más energía térmica al depositarse consecutivamente consiguiendo así unas uniones fuertes. Como hay que esperar a completar la capa antes de empezar con la siguiente, los hilos de la capa anterior se enfrían y al depositarse la siguiente capa se ha perdido energía térmica por lo que resultan unas uniones débiles (figura 2.10).

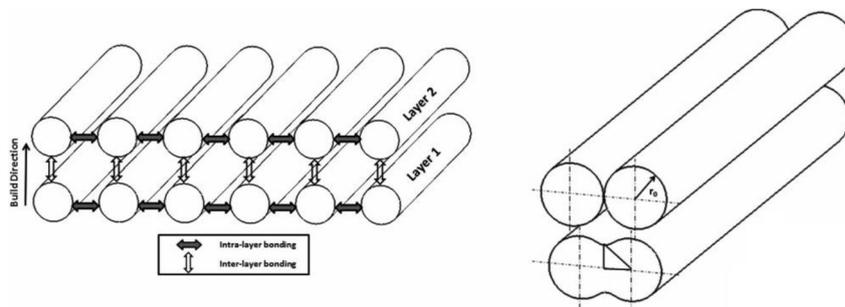


Figura 2.10. Uniones entre hilos de capa y entre capas. Fuente: Gurralla y.Pregalla, 2014.

Trabajos anteriores coinciden en que la orientación de las capas debe coincidir con las dirección de la cargas para optimizar las propiedades mecánicas. (Gurralla and Regalla, 2014; Gray et al., 2001; Zhong et al., 2001). En cambio, en fuerzas de compresión, debido al efecto de pandeo, las fibras tienden a doblarse, en este caso es recomendable que las fibras estén orientadas perpendicularmente a la carga. (Sood, 2009).

El efecto de la orientación de las capas en las propiedades mecánicas también ha sido observado en otros procesos de manufacturación aditiva como en la tecnología de base sólida (Olivier et al., 2016), sinterizado selectivo por láser (Ajoku et al., 2006) o estereotilografía (Quintana et al., 2010).

El segundo parámetro con gran influencia es la altura de la capa. Cuando las capas decrecen en altura, las piezas muestran mejor cohesión entre capas, debido a la mayor superficie de contacto y menor espacio vacío entre filamentos. Este efecto mejora el mecanismo de transporte de energía térmica favoreciendo la soldadura entre hilos (Sood et al., 2012).

El grosor o anchura del hilo extruido es un parámetro que influye notablemente en el comportamiento mecánico. Tiene un gran impacto en los mecanismos de transporte de energía térmica por lo que afectará la cohesión de los hilos. (Wang, 2007)

#### 2.4.1. Estrategia de impresión (*build style*)

En la sección anterior se han descrito los parámetros de mayor influencia en el comportamiento mecánico. Estos parámetros junto a otros caracterizan las estrategias o procesos de impresión o *build style*. La estrategia de impresión determina los recorridos del cabezal de la máquina en la creación de la pieza.

Las piezas impresas se componen de dos zonas características: el contorno y el *infill* o relleno. El contorno es la “piel” que delimita la pieza, dentro de cada capa corresponde a los perímetros exteriores. El relleno son las trayectorias que sigue la boquilla para rellenar el espacio vacío dentro del contorno (figura 2.11).

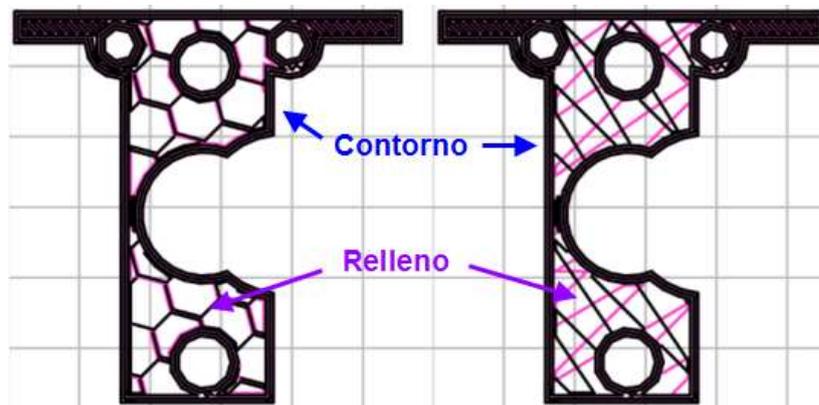


Figura 2.11. Sección de una pieza impresa con dos tipos de patrón de relleno. Izquierda: honeycomb, Derecha: lineal

Por lo general, en cada capa, primero se realiza el contorno y seguidamente el relleno interior con la estrategia de impresión seleccionada. En la tabla siguiente se muestran diferentes patrones de relleno y su densidad. Cada uno aporta propiedades mecánicas distintas. En el presente trabajo se estudiará la influencia del patrón lineal, rectilíneo y honeycomb y las densidades: 25%, 50% 75%.

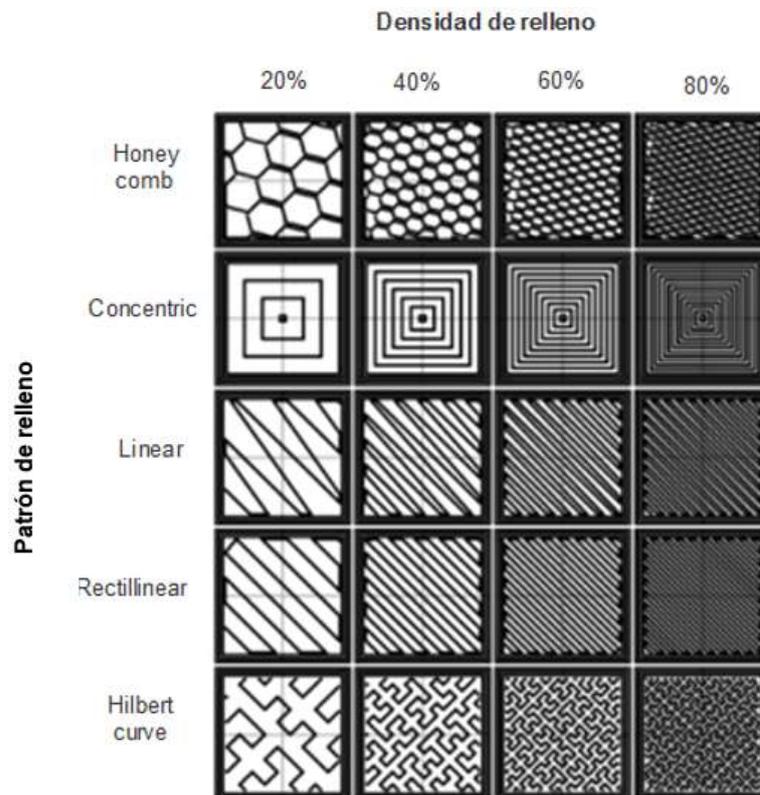


Figura 2.12. Patrones y densidad de relleno. Fuente: [www.manual.slic3r.org](http://www.manual.slic3r.org)

La velocidad de impresión es un parámetro modificable. Se puede definir en cada zona de impresión, siendo esta independiente para los contornos, rellenos, capas superiores e inferiores. La velocidad será un parámetro de estudio en el proyecto, ya que tiene influencia en el proceso de fundido y solidificación de los filamentos, además puede afectar a la tasa de material extruido..

Otra característica de las técnicas AM es el material de soporte. Las piezas con partes en voladizo necesitan una estructura auxiliar donde sustentarse; una vez terminada la pieza, el material de la estructura es eliminando. El material de soporte tiene un papel importante en el acabado y tolerancia dimensional de las parten en voladizo.

El tipo de probetas utilizadas en este estudio no requieren de material de soporte por lo que no entrará en el estudio.

En la figura 2.13 se muestran los patrones para soportes: rectiliniar, linear grid y honeycomb.

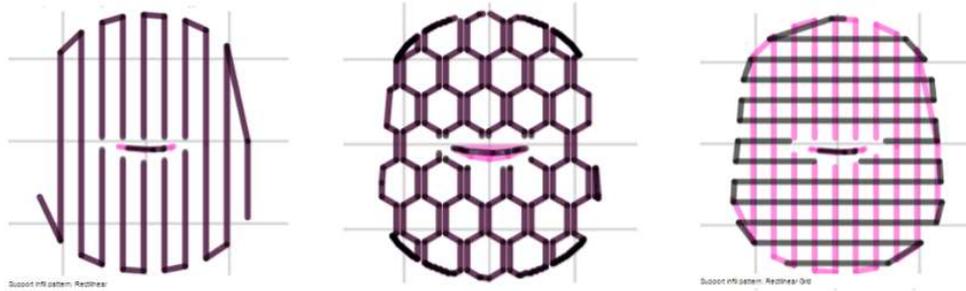


Figura 2.13. Geometrías de material de soporte. Fuente: [www.manual.slic3r.org](http://www.manual.slic3r.org)

## 2.5. Resumen

La fabricación aditiva es una tecnología relativamente nueva, aunque se creó en 1984. La gran expansión de la técnica es debido a la capacidad de crear geometrías muy complejas y la velocidad de pasar del modelo digital al físico, claras ventajas respecto las técnicas de fabricación tradicionales.

El comportamiento mecánico de las piezas impresas es una de las propiedades más difíciles de predecir, debido a la gran variabilidad de parámetros de fabricación y a la heterogeneidad de las piezas. Además hay escasez de bibliografía referente a modelos de comportamiento respecto a los parámetros de fabricación.

Debido a las grandes expectativas que tiene la impresión 3D y a la necesidad de comprender mejor sus propiedades, se realiza el presente proyecto.

### 3. Descripción de los experimentos de flexión en cuatro puntos

En la bibliografía revisada, no se encuentra suficiente información sobre las propiedades mecánicas de las piezas impresas con FFF respecto sus parámetros de impresión, por ello en este trabajo se explorarán parámetros de impresión no considerados a menudo en la bibliografía con la ayuda de un diseño de experimentos. Por esta razón, se fabricarán probetas, donde se combinarán los parámetros de fabricación más importantes. Las propiedades mecánicas de las probetas se comprobarán mediante ensayos a flexión.

El presente proyecto se realiza dentro del grupo de investigación DEFAM (Grup de Desenvolupament en Fabricació i Materials –UPC–), donde se desarrollan proyectos de caracterización de las propiedades mecánicas de la impresión 3D mediante ensayos de tracción y fatiga, entre otros. Con el objetivo de mejorar la comprensión del comportamiento de las piezas impresas y para completar y validar los proyectos predecesores, se hará un estudio con ensayos a flexión en cuatro puntos.

Con el ensayo de flexión se puede observar un módulo de elasticidad o módulo de Young, la resistencia a la flexión, y otras propiedades como el alargamiento. El ensayo se puede definir como la aplicación de fuerzas perpendiculares a una viga simple biapoyada.

Las fibras de la sección del elemento resistente, funcionan de manera diferente según su posición relativa a la fibra neutra. Si las fuerzas van de arriba abajo, (figura 3.1) en las secciones de la viga se generan tensiones de tracción en las fibras inferiores y tensiones de compresión en las fibras superiores (figura 3.2), respecto la fibra neutra.

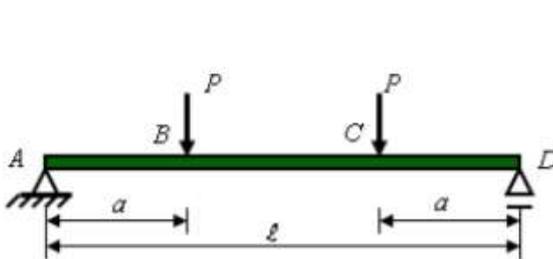


Figura 3.1. Deformaciones en una viga biapoyada con carga distribuida.  
Fuente: Monografias.com

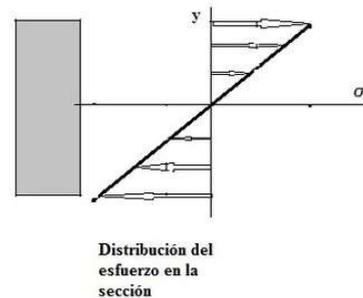


Figura 3.2. Distribución del esfuerzo en la sección.  
Fuente:  
www.dismecanico.weebly.com

Las tensiones máximas se generan en las fibras más exteriores. Este efecto nos permitirá analizar el comportamiento de las probetas respecto a tensiones de compresión y tracción.

### 3.1. Probetas de estudio de flexión en cuatro puntos

Para realizar ensayos de flexión en cuatro puntos, las probetas de ensayo son de forma prismática y cumplen la norma ASTM D6272. Para su diseño se ha utilizado el software *Solidworks*® y los modelos se han fileteado con *Slic3r*.

El software fileteador es el encargado de definir la estrategia de impresión que la máquina debe seguir, con los parámetros de impresión definidos según el diseño de experimentos.

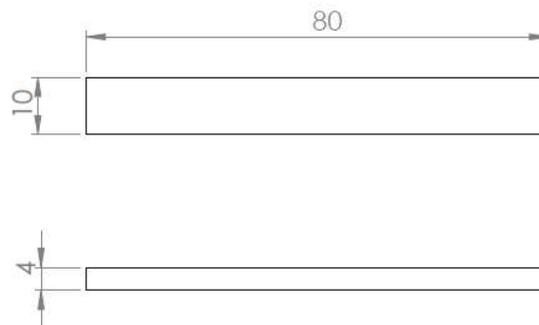


Figura 3.3. Medidas de las probetas: 80 x 10 x 4 mm, estándar ASTM D6272

#### 3.1.1. PLA. Material utilizado en el estudio

El material utilizado en la fabricación de las probetas es el ácido poliláctico o poliácido láctico (PLA). El PLA es un polímero constituido por moléculas de ácido láctico, con propiedades semejantes a las del tereftalato de polietileno (PET). Es un termoplástico que se obtiene mayoritariamente a partir de almidón de maíz, yuca, mandioca y de la caña de azúcar. Es biodegradable. Se degrada fácilmente en agua y óxido de carbono. Se utiliza ampliamente en la impresión 3D bajo el proceso FDM

La elección del PLA como material de ensayo, se debe a que es el material más utilizado en la impresión 3D doméstica.

Respecto a las propiedades mecánicas, presenta una resistencia relativamente baja respecto a otros materiales como el Nylon y una dureza alta.

Las propiedades mecánicas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas del PLA

Propiedades mecánicas	Valor Típico Unidad	Método de ensayo
<b>Módulo de Tensión</b>		<b>ASTM D638</b>
22,7°C	2020 a 3543 MPa	
<b>Tensión</b>		
Límite elástico, 22,7 °C	61 a 66 MPa	
Rotura, 22,7°C	49 a 56 MPa	
<b>Elongación</b>		
Punto de Fluencia, 22,7°C	9,8 a 10 %	
Rotura, 22,7°C	0.5 a 9,2 %	
<b>Módulo de Flexión</b>		
22,7°C	2392 a 4929 MPa	
<b>Resistencia a la flexión</b>		
22,7°C	48 a 110 MPa	

### 3.2. Diseño del experimento.

El diseño consistirá en la combinación de los parámetros de impresión que se consideran más influyentes en el comportamiento mecánico. Los parámetros de estudio serán seis y se definirán tres niveles de cada uno (tabla 3.1). Al tener tres niveles se podrá conocer cómo varía la respuesta del experimento dependiendo el nivel. Se repetirá cada ensayo cuatro veces para comprobar la repetitividad de los resultados, dada la baja reproducibilidad que permite una tecnología como la impresión 3D.

Tabla 3.2. Parámetros y niveles de estudio del diseño de experimentos.

Parámetro	Código	Nivel			Unidad
		1	2	3	
<b>Anchura hilo</b>	A	0,3	0,4	0,6	mm
<b>Altura de capa</b>	B	0,1	0,2	0,3	mm
<b>Densidad de relleno</b>	C	25	50	75	%
<b>Velocidad</b>	D	20	30	40	mm/min
<b>Orientación</b>	E	Plano	De canto	Vertical	(-)
<b>Patrón de relleno</b>	F	Linear	Rectilíneo	Panel abeja	(-)

**Altura de capa:** Determina el grosor de las capas y el número de capas que tendrá la pieza impresa. Afecta en el volumen y superficie de los hilos, así como en la soldadura entre capas. El tiempo de fabricación es inversamente proporcional a la altura de capa. Capas más finas implican más número de capas a imprimir y más tiempo de producción.

**Anchura de hilo:** La anchura de hilo se determinará utilizando boquillas de extrusión de diámetro: 0,3, 0,4 y 0,6 mm. Este parámetro también determinará el volumen y superficie de los hilos extruidos, así como la superficie de soldadura entre hilos.

**Densidad de relleno:** Parámetro que determina la cantidad de material que se deposita dentro de los contornos (densidad del relleno). Evita movimientos relativos entre contornos y da robustez a las piezas. Determina la distancia entre los hilos interiores y afecta el consumo de material.

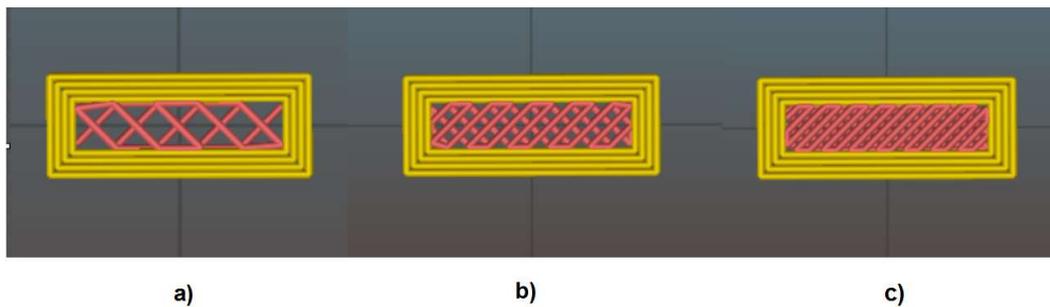


Figura 3.4. Densidad de relleno. a) 25% b) 50% c) 75%.  
Slic3r

**Velocidad:** Determina la velocidad de extrusión y deposición de los hilos. La velocidad es definida para cada parte de la pieza (perímetros interiores, exteriores, los hilos interiores, etc.) para optimizar el tiempo de fabricación. En el presente estudio se definirá una misma velocidad para todas las partes de la pieza para homogeneizar su estructura.

**Orientación:** Las probetas serán impresas verticalmente (dirección Z), planas (dirección X), y de canto (dirección Y). De esta manera el apilamiento de las capas se hará de tres formas diferentes y se podrá estudiar su comportamiento. Generalmente, la dirección de apilamiento es el factor más determinante en el comportamiento mecánico.

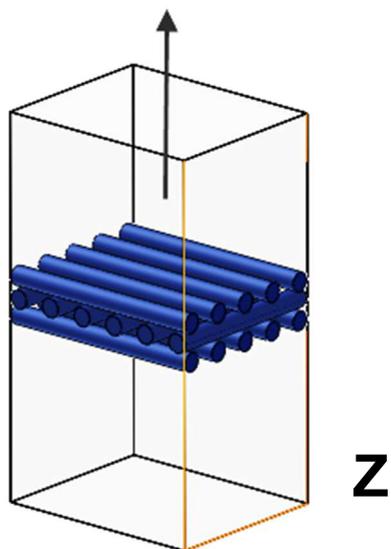


Figura 3.5. Esquema apilamiento en Z, vertical.

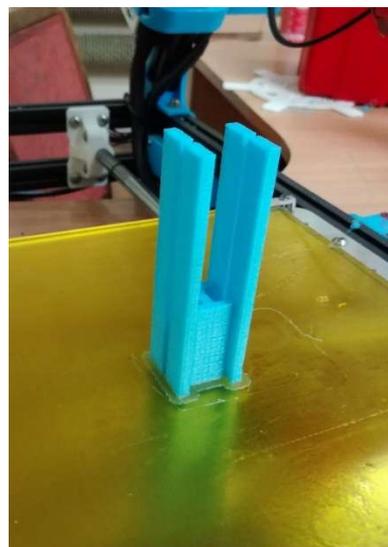


Figura 3.6. Fotografía, apilamiento en Z, vertical.

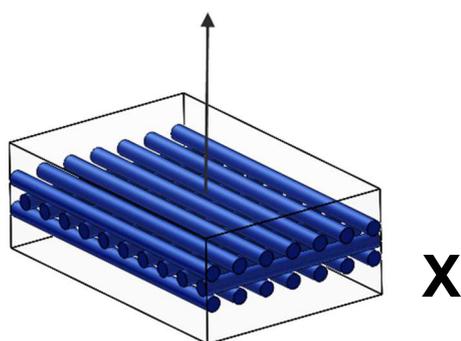


Figura 3.7. Esquema apilamiento en X, planas.

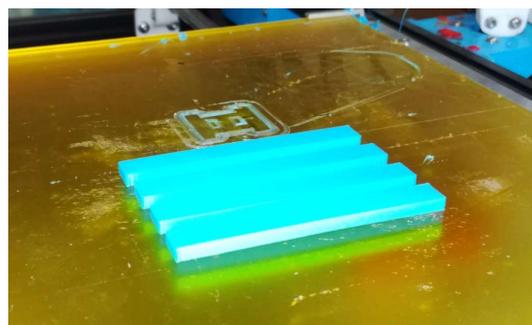


Figura 3.8. Fotografía, apilamiento en X, planas.

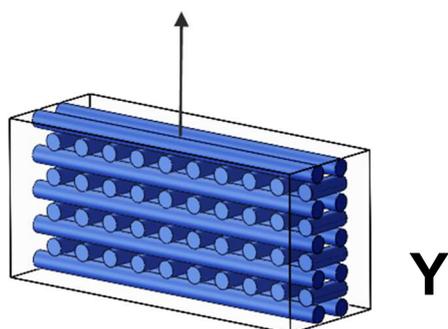


Figura 3.9. Esquema apilamiento en Y, canto.

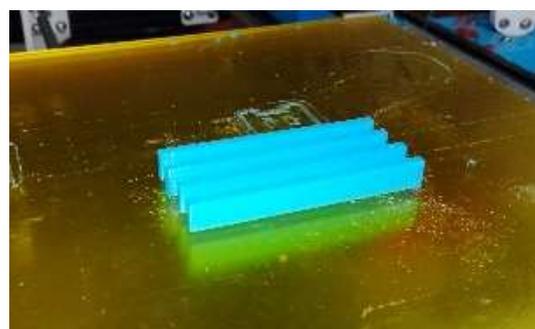


Figura 3.10. Fotografía, apilamiento en Y, canto.

**Patrón relleno:** Determina el tipo de trayectorias que sigue la boquilla para rellenar el espacio vacío dentro del contorno. Cada patrón creará una geometría interior diferente produciendo comportamientos mecánicos distintos.

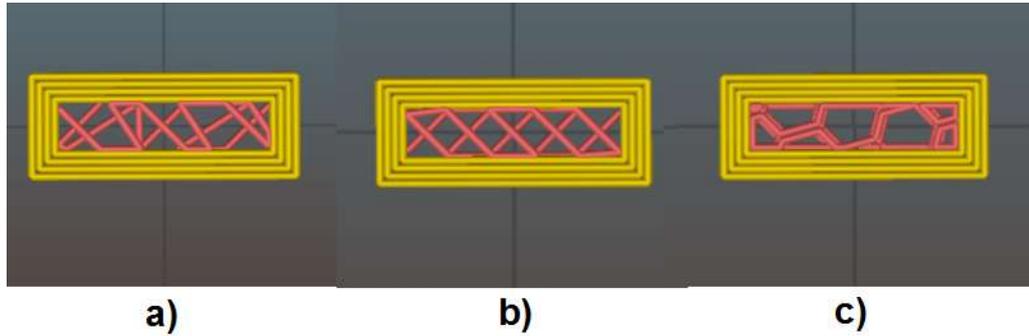


Figura 3.11. Patrones de relleno. a) linear b) rectilinear c) honeycomb. Slic3r

### 3.2.1. Diseño de experimentos de Taguchi

Un diseño de experimentos clásico de 6 factores a 3 niveles, como el nuestro, implicaría  $(3^6) = 729$  experimentos. Para reducir la cantidad de experimentos se utilizará el diseño de experimentos de Taguchi. Este método ha sido aplicado con éxito en otros estudios sobre propiedades mecánicas de FFF (Mohamed et al. 2015).

El método de Taguchi, propone utilizar una matriz ortogonal con una combinación específica de parámetros, para poder estudiar la influencia de estos por separado y su interacción. La matriz ortogonal permite reducir considerablemente el número de ensayos, asegurando que, en total, cada parámetro está siempre apareado con un segundo el mismo número de veces, para cada par de parámetros.

El presente proyecto utilizará una matriz de experimentos de Taguchi (L27), con lo que se reducirá el número de experimentos a 27. Una matriz L27 tiene 26 grados de libertad o comparaciones entre experimentos.

La asignación de los factores e interacciones se muestra en la figura 3.11.

Tabla 3.3. Asignación de posiciones dentro de la matriz de Taguchi

Parámetro	Posición
Anchura hilo	1
Altura de capa	2
Densidad de relleno	5
Velocidad	9
Orientación	10
Patrón de relleno	12

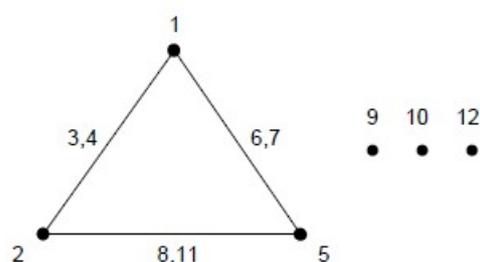


Figura 3.12. Interacción entre parámetros en la matriz de Taguchi L27.

Fuente: American Supplier Institute.

Con la asignación de parámetros de definida, en la matriz de Taguchi L27, se estudiará la influencia de todos ellos por separado (columnas de la matriz: 1, 2, 5, 9, 10, 12) y la interacción de los tres primeros (1, 2, 5): anchura de hilo (1), altura de capa (2) y densidad de relleno (5).

Tabla 3.4. Matriz ortogonal de Taguchi L27 para el diseño de experimentos.

Nº	Anchura hilo	Altura capa	Densidad Relleno	Velocidad	Orientación	Patrón de relleno
1	0,3	0,1	25	20	PLANO	RECTILIN
2	0,3	0,1	50	30	CANTO	LINEAR
3	0,3	0,1	75	40	VERTICAL	HONEYC
4	0,3	0,2	25	30	CANTO	HONEYC
5	0,3	0,2	50	40	VERTICAL	RECTILIN
6	0,3	0,2	75	20	PLANO	LINEAR
7	0,3	0,3	25	40	VERTICAL	LINEAR
8	0,3	0,3	50	20	PLANO	HONEYC
9	0,3	0,3	75	30	CANTO	RECTILIN
10	0,4	0,1	25	30	VERTICAL	LINEAR
11	0,4	0,1	50	40	PLANO	HONEYC
12	0,4	0,1	75	20	CANTO	RECTILIN
13	0,4	0,2	25	40	PLANO	RECTILIN
14	0,4	0,2	50	20	CANTO	LINEAR
15	0,4	0,2	75	30	VERTICAL	HONEYC
16	0,4	0,3	25	20	CANTO	HONEYC
17	0,4	0,3	50	30	VERTICAL	RECTILIN
18	0,4	0,3	75	40	PLANO	LINEAR
19	0,6	0,1	25	40	CANTO	HONEYC
20	0,6	0,1	50	20	VERTICAL	RECTILIN
21	0,6	0,1	75	30	PLANO	LINEAR
22	0,6	0,2	25	20	VERTICAL	LINEAR
23	0,6	0,2	50	30	PLANO	HONEYC
24	0,6	0,2	75	40	CANTO	RECTILIN
25	0,6	0,3	25	30	PLANO	RECTILIN
26	0,6	0,3	50	40	CANTO	LINEAR
27	0,6	0,3	75	20	VERTICAL	HONEYC

### 3.2.2. Parámetros constantes durante el estudio

#### Espesor de contorno fijo

En las figuras 3.13 y 3.14 se muestran un corte de sección de la probeta. Se pueden diferenciar dos zonas, el contorno exterior y el espacio interior o relleno. Para que el estudio sea eficaz y solo contemple los parámetros explicados anteriormente, el espesor del contorno siempre será de 1,2 mm independientemente de la altura de las capas o del ancho del hilo. En consecuencia la inercia respecto a la geometría interna será la misma en todos los ensayos. Se elige 1,2 mm porque el número de hilos del contorno siempre debe ser entero y es el mínimo común múltiplo de las anchuras de hilo (0,3, 0,4 y 0,6 mm).

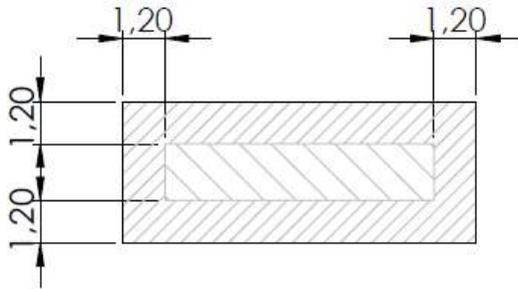


Figura 3.13. Plano de sección, con el espesor del contorno

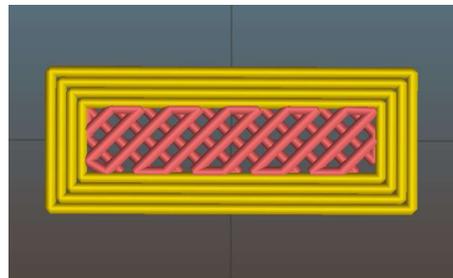


Figura 3.14. Imagen de la sección, detalle en los contornos y relleno. Slic3r

#### Parámetros constantes que no participan en el estudio

Los parámetros de las tablas 3.4, 3.5 y 3.6 son constantes y no se analizarán en éste estudio

Tabla 3.5. Parámetros de impresión constantes

Parámetros de impresión			
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Nº Contornos	Nº = 1,2 mm/anchura hilo	Brim/ Anchura reborde	5 mm
Capas sólidas superiores	Nº = 1,2 mm/altura capa		
Capas sólidas inferiores	Nº = 1,2 mm/altura capa	Overlap/ Intersección contorno con relleno	15%

<b>Calidad/ Contorno extra si es necesario</b>	Sí	<b>Soportes/</b> Distancia de contacto en Z con soportes	0.05 mm
<b>Calidad/ Detectar paredes finas</b>	Sí	<b>Soportes/</b> Espacio entre filamentos	1.5 mm
<b>Reducción tiempo de impresión/ Combinar relleno cada</b>	2 capas	<b>Soportes/</b> Patrón del soporte	Rectilíneo
<b>Avanzado/ Ángulo patrón relleno</b>	45°	<b>Raft</b> o capas pedestal	0 capa
<b>Avanzado/ Relleno solido si área es inferior.</b>	0 mm <sup>2</sup>	<b>Velocidad/</b> Trayectos sin impresión	130 mm/s
<b>Avanzado/ Solo retirar filamento cuando se cruzan los perímetros</b>	Sí	<b>Caudal/</b> Ratio de caudal de impresión	1

Tabla 3.6. Parámetros del material primario.

<b>Parámetros del material primario</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Filamento/Diámetro</b>	3 mm	<b>Temperatura/</b> Extrusión	210 °C
<b>Filamento/</b> Multiplicador extrusión	0,9	<b>Temperatura/</b> Base o cama caliente	60 °C
<b>Refrigeración/</b> Conectar ventiladores	No		

Tabla 3.7. Parámetros del extrusor.

<b>Parámetros del extrusor</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Retracción<sup>1</sup>/</b> Longitud	2 mm	<b>Retracción/</b> Longitud extra al reimprimir	0 mm
<b>Retracción/</b> Levantamiento en Z	0 mm	<b>Retracción/</b> Distancia mínima para retracción	2 mm
<b>Retracción/</b> Velocidad	40 mm/s		

**Retracción<sup>1</sup>:** Retirada brusca del filamento de alimentación dentro del extrusor. Se provoca para generar succión dentro del extrusor y evitar pérdida de filamento fundido en los desplazamientos de la máquina.

### 3.3. Fabricación de probetas

Las probetas han sido fabricadas utilizando la impresora 3D *Pyramid3Dstudio XL Single Extruder*. Se trata de una impresora doméstica *RepRap* autorreplicante, ya que gran parte de sus componentes han sido impresos por otras máquinas del mismo tipo.



Figura 3.15. Fotografía de la impresora 3D, Pyramid3DStudio

- Temperatura máxima de trabajo de Hotend: 250 °C
- Compatible con todos los filamentos con un diámetro de 3 mm (ABS, PLA, NYLON, Goma, Laywood, Laybrick, etc.)
- Boquillas (nozzles) intercambiables con diámetros: 0,3 mm; 0.4 mm; 0.5 mm; 0.6 mm; 0.7mm; 0.8 mm; 1 mm; 1.3 mm
- Motores Nema17
- Fuente de alimentación de 400W
- Temperatura máxima de trabajo de la plataforma (heatbed): 115 °C
- Resolución posicionamiento XY: 0,0125 mm
- Resolución posicionamiento Z: 0,000625 mm

### 3.4. Máquina de ensayos, flexión en cuatro puntos.

Los ensayos se han llevado a cabo en la máquina multiensayo electromecánica EM2/20. La máquina puede trabajar tanto a compresión como tracción y se le pueden adaptar diferentes tipos de mordazas y utensilios.

Datos técnicos:

- Capacidad (fuerza): 20 kN
- Recorrido típico: 1000 mm
- Nº columnas: 2
- Accionamiento: Sistema electromecánico: Doble husillo a bolas accionado por sistema motor reductor.
- Rango de velocidades: 0-500 mm/min
- Resolución fuerza: 100.00 dígitos
- Resolución posición: 0,001 mm
- 



*Figura 3.16. Máquina multiensayo electromecánica.  
Laboratorio de material EEBE*

La lectura de fuerza se toma a través de una célula de carga con precisión de milésimas de N y capacidad de 500 N.

### 3.5. Procedimiento del ensayo

#### 3.5.1. Metrología

Para conseguir una mayor veracidad, autenticidad y precisión en los resultados se midieron las 108 probetas para conocer la sección resistente. Con esta información se pudo conocer el área real de la sección de cada una de las probetas en particular, sin tener que generalizar con los datos de la probeta teórica. Los datos se utilizarán posteriormente para calcular las tensiones generadas en las probetas.

Las probetas fueron pesadas individualmente para poder calcular su densidad y buscar correlaciones entre la cantidad de material extruido en cada probeta y los parámetros de impresión.

Para comprobar la repetitividad en la toma de datos, se realizaron tres medidas de cada magnitud.

Los utensilios e instrumentos de medida utilizados han sido:

- Pie de rey, resolución 100  $\mu\text{m}$ : Largo de la probeta.
- Micrómetro, resolución 1  $\mu\text{m}$ : Ancho y grosor de la probeta.
- Báscula de laboratorio, resolución 1 mg: Masa de la probeta.

Mostra	PLA-0,3-0,1-25-20-PLANO-RECTILIN 1.1				N	tp (95%)
					1	12,7062
Operari	Oriol Traver				2	4,30265
					3	3,18245
Ample mostra	Gruix ( $\mu\text{m}$ )	Llarg mostra	Pes (mg)		4	2,77645
( $\mu\text{m}$ )		(mm)			5	2,57058
9940	4047	80,14	2722		6	2,44691
9916	4056	80,14	2724		7	2,36462
9895	4061	80,07	2725		8	2,306
					9	2,26216
					10	2,22814
					11	2,20099
					12	2,17881
					13	2,16037
					14	2,14479
					15	2,13145
					16	2,11991
					17	2,10982
					18	2,10092
					19	2,09302
					20	2,08596
					21	2,07961
					23	2,06866
					24	2,0639
					25	2,05954
					26	2,05553
					27	2,05183
					28	2,04841

	Mitjana	Error	Desviació	
Ample ( $\mu\text{m}$ )	9917,0	56,9	22,5	
Gruix ( $\mu\text{m}$ )	4054,7	18,6	7,1	
Llarg (mm)	80,1	0,2	0,0	
Secció ( $\text{mm}^2$ )	40,2101	0,2956	Er (%)	0,7%
Pes (mg)	2723,7	4,8	1,5	
Densitat ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0,845	0,007		

Versió 20-02-17		Resolució	
Gruix ( $\mu\text{m}$ )	1	Llarg ( $\mu\text{m}$ )	100
Llarg ( $\mu\text{m}$ )	100	Pes (mg)	1

Figura 3.17. Plantilla de metrología. Fuente: DEFAM

### 3.5.2. Ensayo

En la ejecución de los ensayos se ha seguido el método estandarizado D6272-02 de ensayo flexión en cuatro puntos para plásticos sin refuerzo, con refuerzo, o para materiales aislantes de la electricidad.

#### 3.5.2.1. Método y significación

El método consiste en ensayar una probeta de sección transversal rectangular que se apoya sobre dos soportes y se carga en dos puntos (por medio de dos rodillos de carga), cada uno de ellos a una distancia igual del punto de soporte adyacente.

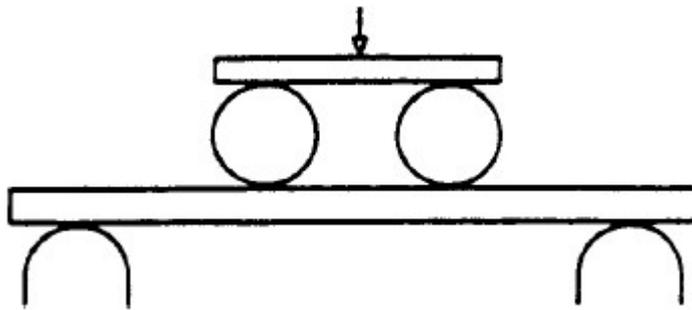


Figura 3.18. Esquema del método de ensayo flexión en 4 puntos. Fuente: Norma D6272-02.

El ensayo flexión en 4 puntos tiene una ventaja significativa respecto al ensayo en 3 puntos que aplica la carga a través de un solo rodillo.

El hecho de utilizar dos rodillos de carga en el ensayo en 4 puntos provoca un momento flexor máximo uniformemente distribuido en las fibras situadas entre los dos rodillos; mientras que en el ensayo de flexión en 3 puntos, el momento flexor máximo está concentrado en la fibra que se encuentra inmediatamente debajo del rodillo de carga. Por consiguiente, con el ensayo en 4 puntos se testean todas las fibras situadas entre los rodillos de carga, mientras que en 3 puntos solo se testean las fibras situadas justo debajo el rodillo de carga.

En el ensayo, la probeta se flectará a velocidad constante, hasta que las fibras externas presenten rotura o hasta que la deformación máxima de la fibra externa alcance un 5% de alargamiento.

### 3.5.2.1. Parámetros de ensayo y elección del procedimiento

Para seguir la misma línea de investigación del Grupo DEFAM se utilizarán los mismos parámetros que en el trabajo de (Olivier, D. y Travieso Rodríguez, J.A 2016), acordes con la norma de ensayo D6272-02.

La distancia entre los rodillos será la tercera parte de la distancia entre los rodillos de soporte.

Tabla 3.8. Medidas para la configuración del ensayo.

Concepto	Medida
Distancia corrillos soporte/ Support Span	64 mm
Distancia corrillos carga/ Load Span	21,3 mm

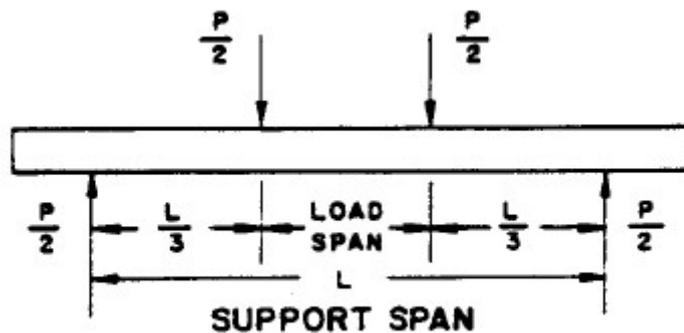


Figura 3.19. Esquema de la configuración del ensayo. Fuente: Norma D6272-02.

El método contempla dos procedimientos, que se diferencian en la velocidad de ensayo según el comportamiento de la probeta.

**Procedimiento A.** Diseñado principalmente para materiales o probetas que rompen con poca deflexión. El ratio de deformación de las fibras exteriores de la probeta debe ser 0,01mm/mm/min.

$$R = \frac{0.185 \cdot Z \cdot L^2}{d} \quad (1)$$

Donde:

R = Ratio de velocidad de flexión mm/min

L = Distancia entre rodillos de soporte (64 mm)

d = Grosor de la probeta (4 mm)

Z = Ratio de velocidad de deformación de las fibras (0.01 mm/mm/min).

Con los parámetros de ensayo, la velocidad de deflexión debe ser igual a 1,9 mm/min (ecuación 1). Por consiguiente se flectará la probeta a velocidad constante hasta que presente rotura en las fibras externas.

**Procedimiento B.** Diseñado particularmente para materiales que absorben grandes deflexiones durante el test. El ratio de deformación de las fibras exteriores de la probeta debe ser 0,1mm/mm/min.

Con los parámetros de ensayo y según la ecuación 1, la velocidad de deflexión debe ser igual a 19 mm/min. Por consiguiente, la probeta se flectará a velocidad constante hasta que presente rotura en las fibras externas.

El ensayo se llevará a cabo hasta que la deformación máxima de las fibras exteriores alcance el valor de 0,05 mm/mm. Para calcular la deflexión que implica este valor de deformación, se seguirá la siguiente ecuación.

$$D = \frac{0.21 \cdot r \cdot L^2}{d} \quad (2)$$

Donde:

D = Deflexión (mm),

r = Deformación (0,05 mm/mm)

L = Distancia entre rodillos de soporte (64 mm)

d = Grosor de la probeta (4 mm)

El valor máximo de deflexión que se debe alcanzar en el ensayo, teniendo en cuenta las medidas de las probetas y parámetros, es de 10,9 mm. Según los resultados de la ecuación 2.

### **Elección del procedimiento.**

Para poder aplicar el procedimiento adecuado dependiendo de los parámetros de las probetas, se ensayaron 9 configuraciones de las 27 que forman parte del estudio.

Se descubrió una correlación clara en el parámetro de impresión que confería a unas probetas un carácter frágil y a otras un carácter flexible. El parámetro en cuestión es la orientación de impresión. Las probetas imprimidas en vertical no admiten apenas deflexión mientras que las probetas impresas en plano o canto admiten grandes deflexiones. Por lo tanto, el resumen del procedimiento es el siguiente:

Tabla 3.9. Parámetros de ensayo.

Concepto	Procedimiento A	Procedimiento B
Probetas según orientación	Vertical, orientación Z	Plano, orientación X Canto, orientación Y
Velocidad de ensayo	1.9 mm/min	19 mm/min
Final ensayo	Cuando presenta rotura en las fibras externas	Cuando la deflexión deformación es igual a 10,89 mm

### 3.5.2.2. Adquisición de datos

La particularidad del ensayo en 4 puntos respecto a en 3 puntos, es que la deflexión no es igual al recorrido que realizan los rodillos de carga. Por lo tanto, para conocer la deflexión de la probeta se debe medir la flecha o deflexión de la parte inferior de ésta en su punto medio respecto los puntos de apoyo de los rodillos.

La obtención del valor de deflexión se hará a través de un procesamiento de imágenes. Se realizará una toma de video de alta definición de cada ensayo, se aplicarán marcadores en la fibra inferior de la probeta y se determinará su desplazamiento para calcular su deflexión.

La fuerza aplicada por los rodillos de carga se medirá con una célula de carga.



Figura 3.20. Equipo de realización del ensayo flexión en 4 puntos. Laboratorio de materiales EEBE.

### 3.6. Procesado de datos

El objetivo del procesamiento de datos es crear la curva de tensión de deformación de las probetas. Con la curva obtenida se pueden extraer los resultados siguientes:

- Módulo de Young ( $E$ )
- Límite elástico ( $R_{p0,2}$ )
- Tensión máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ )
- Alargamiento máximo ( $\epsilon$ )

Primer paso: consiste en separar los fotogramas de los videos HD de cada ensayo. La cámara utilizada toma 60 fotogramas por segundo. Los ensayos tenían una duración de entre 45 segundos y 2 minutos, por lo que en cada uno de los 108 ensayos se realizan entre 2700 y 7200 fotogramas.

Segundo paso: consiste en sincronizar la toma de datos de la célula de carga con la toma de fotogramas. La sincronización de las dos fuentes es un paso fundamental para que las fuerzas aplicadas sobre la probeta se relacionen con las deformaciones provocadas por éstas.

Para sincronizar las dos fuentes, se instaló un interruptor conectado en serie con los leds de iluminación del escenario de ensayo (figura 3.20) y un voltímetro que medía el voltaje de alimentación de los leds y enviaba esta medida al módulo de recepción de datos de fuerza. Antes de empezar cada ensayo se abría el interruptor apagando la luz, la cámara percibía el cambio de luz y el voltímetro detectaba la caída de voltaje.

La información obtenida se procesaba por un *Script de Matlab\_sincronización*, capaz de detectar la caída de voltaje referenciada con las fuerzas y el fotograma que se oscurece. Como estas dos acciones se producen en el mismo instante, se sincronizan las dos fuentes.

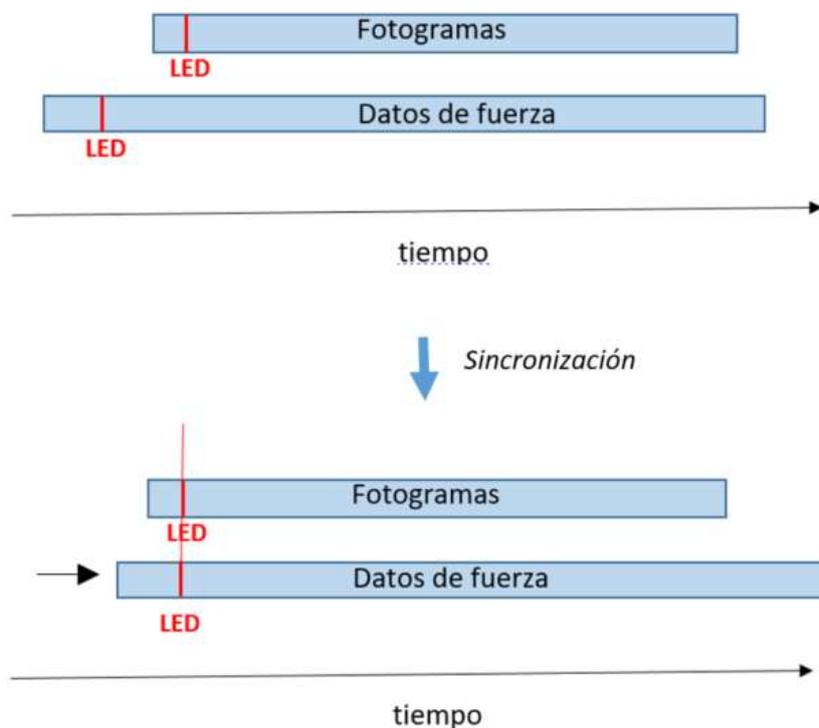


Figura 3.21. Proceso de sincronización de fuentes.

Tercer paso: consiste en calcular la deflexión de las probetas a través de los fotogramas. Se utiliza el comando *Grid\_generator* del software *Matlab*. Con este comando se ubican marcadores de posición en la fibra exterior de la probeta, donde se produce la deflexión máxima, y marcadores en los rodillos estáticos, (figura 3.22). La diferencia de posición final menos la inicial, entre el marcador de la probeta más desplazado y los marcadores en los rodillos estáticos, es la deflexión máxima (figura 3.23).

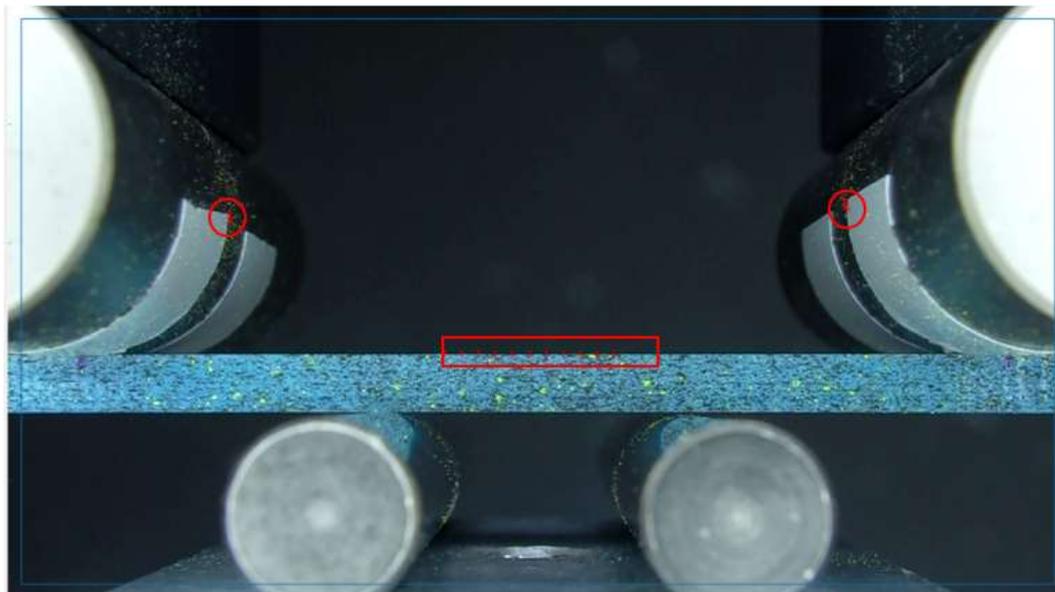


Figura 3.22. Posición inicial de marcadores.

Además se calcula el valor de deflexión en cada fotograma consiguiendo 60 valores de desplazamiento por segundo, iguales a la cantidad de fotogramas. Nótese que las fotografías están invertidas, fue necesario girar la cámara debido a la estructura del trípode que la sujetaba.

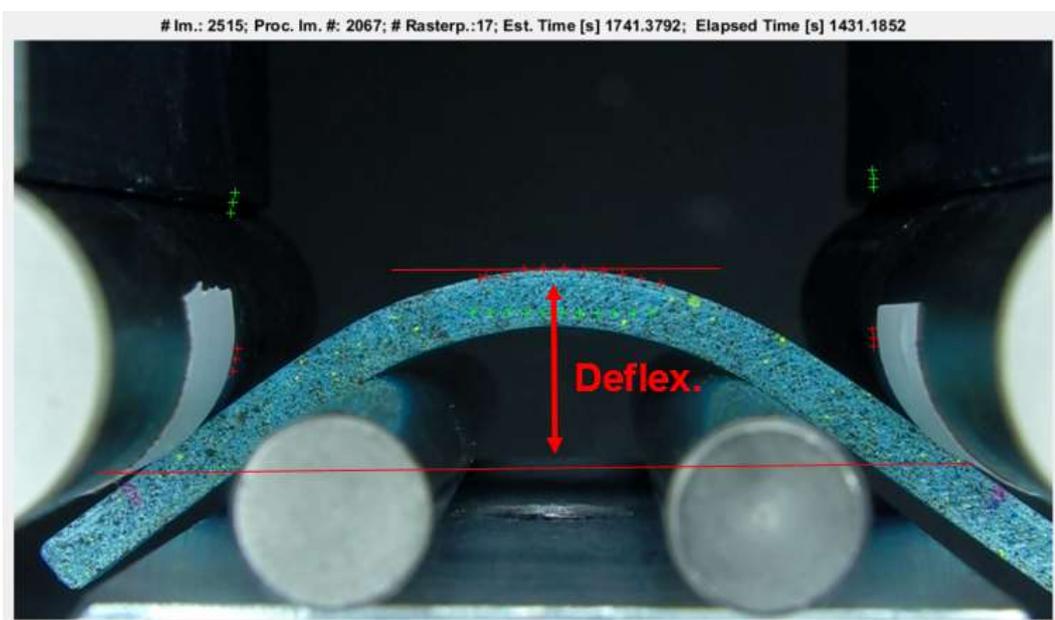


Figura 3.23. Posición final (cruces rojas) e inicial (cruces verdes) de los marcadores.

El resultado de este proceso es volcado en una matriz de desplazamientos X e Y. Cada matriz tiene tantos números como marcadores aplicados, se aplican 3 marcadores en cada rodillo estacionario y 11 marcadores en la fibra exterior de la probeta, resultando un total de 17 marcadores. El número de columnas de la

matriz corresponde a la cantidad de fotogramas procesados, generalmente entre 2000 y 7000 fotogramas, y el número de filas a la cantidad de marcadores. En consecuencia, las matrices tienen un tamaño de entre [17 x 2000] y [17 x 7200].

Cuarto paso: consiste en utilizar un *Script de Matlab\_Deflexión* que convierte los desplazamientos de los marcadores en las deformaciones mecánicas de la probeta en su fibra más externa. El *Script* calcula la diferencia de posición del marcador más desplazado de la fibra externa con el promedio de la posición de los marcadores de los rodillos estacionarios, fotograma a fotograma. Este valor está medido en píxeles y para convertirlo en milímetros se utiliza el grosor de la probeta, y se cuentan el número de píxeles que ocupan esta dimensión. Por lo tanto se puede calcular el ratio de resolución mm/píxel (figura 3.24).



Figura 3.24. Medición de la resolución. Grosor de la probeta: 3,95 mm. Nº píxeles; 111.  
Ratio: 27,75 mm/píxel.

Seguidamente se convierten los valores de deflexión a deformaciones siguiendo la ecuación 3:

$$r = \frac{d \cdot D}{0.21 \cdot L^2} \quad (3)$$

r = Deformación (mm)

D = Deflexión (mm)

L = Distancia entre rodillos de soporte (64 mm)

d = Grosor de la probeta (Metrología)

El grosor de la probeta (d) se introduce manualmente en cada cálculo (correspondiente al valor previamente calculado en el apartado 3.5.1 Metrología).

Quinto paso: consiste en calcular la tensión y deformación que se genera en la probeta en cada instante. Se utiliza un *Script de Matlab\_Crea curva flexión* para convertir los datos de fuerza aplicada en las tensiones generadas en la fibra más externa de la probeta ensayada. La ecuación 4 gobierna este proceso:

$$S = \frac{P \cdot L}{b \cdot d^2} \quad (4)$$

$S$  = Tensión en la fibra más externa (MPa)

$P$  = Carga aplicada (N)

$L$  = Distancia entre rodillos de soporte (64 mm)

$b$  = Anchura de la probeta (10 mm)

$d$  = Grosor de la probeta (4 mm).

EL mismo *script* cruza y sincroniza los resultados de deformaciones calculados en el cuarto paso con los resultados de tensiones.

Sexto y último paso: consiste en extraer los parámetros de estudio de la curva tensión deformación:

- Módulo de Young ( $E$ )
- Límite elástico ( $R_{p0,2}$ )
- Tensión máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ )
- Alargamiento máximo ( $\epsilon$ )

Se utiliza una plantilla del programa Excel (figura 3.25) y los datos de tensión deformación del quinto paso. La plantilla tiene implementada los algoritmos para calcular los parámetros de estudio.

Para calcular el módulo de Young, el programa busca de forma iterativa los puntos mejor alineados en la zona de comportamiento elástico. La pendiente definida por los tres puntos mejor alineados será el valor del módulo de Young.

El límite elástico es el punto que cruza la curva con una recta paralela con pendiente igual al módulo de Young y desplazada un 0,2%

La tensión máxima es el valor del punto máximo en el eje de tensiones.

El alargamiento máximo corresponde al valor de alargamiento cuando se produce la rotura.



Figura 3.25. Plantilla curva tensión – deformación.

## 4. Resultados y análisis de los ensayos flexión en cuatro puntos

### 4.1. Resultados

En la siguiente tabla se muestran los resultados promedio de las cuatro repeticiones de cada configuración de impresión y su desviación estándar. Se incluyen los resultados de la curva de tensión deformación y la densidad ( $\rho$ ).

Tabla 4.1. Resultado promedios y desviaciones estándar de las propiedades mecánicas y físicas.

#	E (GPa)	Desv Std.	Rp <sub>0,2</sub> (Mpa)	Desv Std.	$\sigma_{max}$ (Mpa)	Desv Std.	$\epsilon$ (-)	Desv Std.	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Desv Std.
1	2,36	0,18	53,8	3,19	64,2	8,18	4,72	1,16	0,84	0,0090
2	3,06	0,07	83,5	0,95	96,0	2,98	4,90	0,64	0,92	0,0036
3	1,79	0,03	11,8	1,74	11,8	1,74	0,70	0,13	0,92	0,0068
4	2,74	0,03	69,7	4,10	79,0	4,97	4,68	1,10	0,78	0,0028
5	1,23	0,10	7,92	1,58	7,96	1,58	0,81	0,24	0,78	0,0054
6	2,71	0,03	60,1	3,09	80,8	2,36	5,85	0,50	0,97	0,0112
7	0,59	0,05	6,71	1,76	6,7	1,76	1,20	0,22	0,62	0,0041
8	2,78	0,11	60,6	3,45	64,1	4,43	3,37	0,32	0,89	0,0114
9	2,81	0,06	65,1	3,61	79,2	6,11	4,91	0,59	0,87	0,0149
10	2,29	0,29	37,1	4,04	37,1	4,04	1,64	0,05	0,82	0,0269
11	3,34	0,19	67,9	3,16	83,7	4,53	4,57	0,17	1,00	0,0150
12	3,69	0,08	95,3	4,26	120,0	1,38	5,34	0,20	1,08	0,0032
13	2,41	0,07	50,2	6,97	72,3	8,23	5,72	0,18	0,80	0,0123
14	3,45	0,33	85,0	3,67	104,6	2,16	4,98	0,17	0,96	0,0061
15	2,07	0,21	26,2	3,34	26,1	3,34	1,49	0,41	0,98	0,0177
16	3,19	0,06	73,4	1,15	83,8	3,87	4,09	0,36	0,84	0,0048
17	1,20	0,09	10,6	1,60	10,6	1,60	1,02	0,13	0,84	0,0126
18	1,44	0,27	26,7	3,25	35,7	4,11	5,09	0,74	0,74	0,0107
19	3,61	0,07	87,4	2,53	95,5	7,35	3,73	0,72	0,97	0,0078
20	3,02	0,27	43,4	3,64	43,5	3,64	1,50	0,12	1,02	0,0213
21	3,23	0,02	70,8	3,51	93,1	4,52	5,09	0,22	1,06	0,0081
22	2,33	0,25	21,3	3,22	21,4	3,22	0,53	0,60	0,90	0,0361
23	2,85	0,19	63,4	6,54	86,4	3,27	5,36	0,64	0,95	0,0220
24	3,70	0,14	90,8	2,28	109,5	4,70	5,11	0,95	1,02	0,0056
25	1,90	0,08	44,0	5,16	60,4	4,43	6,21	0,28	0,81	0,0101
26	2,96	0,15	75,2	3,49	86,7	8,68	4,54	1,56	0,89	0,026
27	2,30	0,15	25,3	6,61	25,4	6,61	0,91	0,61	1,05	0,0505

## 4.2. Análisis ANOVA

El análisis de resultados, se puede efectuar mediante el análisis de la varianza.

Al realizar el diseño de experimentos se puede hallar la influencia y la interacción de los factores de fabricación sobre los parámetros que describen el comportamiento mecánico:

- Módulo de Young ( $E$ )
- Límite elástico ( $R_{p0,2}$ )
- Tensión máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ )
- Alargamiento máximo ( $\epsilon$ )

Además del impacto sobre propiedades físicas como la densidad ( $\rho$ ).

### 4.2.1. Consideraciones

Durante los ensayos se descubrieron dos comportamientos mecánicos distintos (dependiendo la orientación de las capas). Las probetas con capas apiladas verticalmente (Z) tienen un comportamiento frágil. Las probetas con capas apiladas en plano (X) y de canto (Y) tienen un comportamiento dúctil.

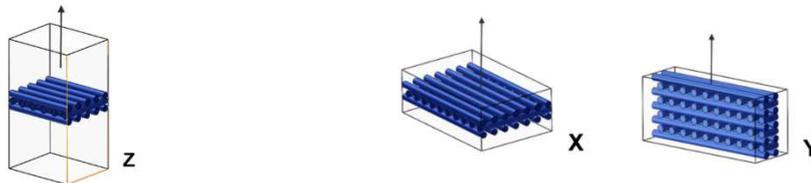


Figura 4.1. Curva tensión deformación comportamiento frágil.

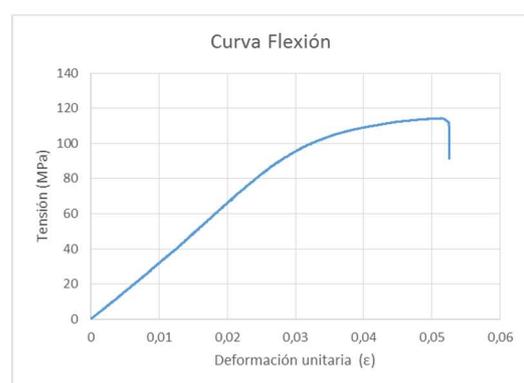


Figura 4.2. Curva tensión deformación comportamiento dúctil.

Debido al comportamiento frágil de las probetas verticales, se considera que el límite elástico ( $R_{p0,2}$ ) es igual a la tensión máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ ). Esta aproximación es necesaria para poder realizar el análisis estadístico.

#### 4.2.2. Módulo de Young

El módulo de Young es la rigidez del material en la zona de comportamiento elástico. En el siguiente gráfico se muestra como los factores de impresión y la interacción entre ellos influyen en el valor de la rigidez.

##### Módulo de Young. Efectos principales para medias

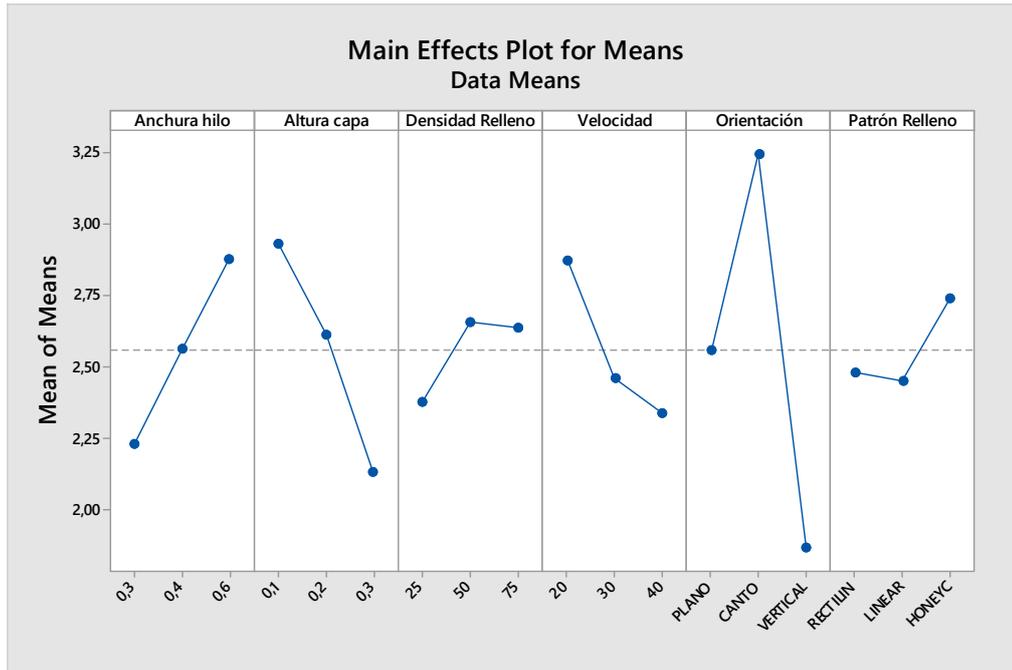


Figura 4.3. Efectos principales para medias, módulo de Young.

El gráfico de efectos principales para medias, muestra cual es la influencia de cada factor y el nivel sobre la respuesta del ensayo. Cuanto mayor es el rango de respuesta de los niveles, mayor es su influencia. A medida que los niveles crecen, incrementan el valor de la respuesta.

Observando la figura 4.3, la anchura de hilo parece tener un impacto significativo. Al aumentar la anchura de hilo se produce un aumento en el valor del módulo de Young.

De forma algo más acentuada la altura de capa también tiene influencia, pero de carácter inverso. Al disminuir la altura de capa, aumenta el valor del módulo de Young.

La densidad de relleno presenta un impacto poco significativo y ninguna tendencia clara.

La velocidad de impresión muestra una significación baja. Sí que se observa una correlación: cuando la velocidad disminuye aumenta el módulo de Young.

La orientación de impresión parece ser el parámetro más influyente, con la orientación *Canto* se consigue una alta rigidez, mientras que con la *Vertical* se consigue muy poca; con la orientación *Plano* se consigue un valor intermedio respecto las otras orientaciones de impresión.

En cuanto al patrón de relleno, es el que tiene menor relevancia. Dentro del rango, la estrategia de impresión Honeycomb es la más rígida.

La representación gráfica no es suficiente para determinar el nivel de influencia de un parámetro. Para ello se utiliza el análisis estadístico, se elige un nivel de significancia del 5%,  $\alpha = 0,05$ . Para que un parámetro se considere estadísticamente significativo, su P valor debe ser menor a 0,05.

Tabla 4.2. P valores para medias de los parámetros de impresión.

Parámetro	P valor
Anchura hilo	0,035
Altura capa	0,023
Densidad Relleno	0,136
Velocidad	0,047
Orientación	0,008
Patrón Relleno	0,129

Por consiguiente, la orientación tiene una gran influencia y en menor medida, la altura de capa, la anchura de hilo y la velocidad. La densidad y el patrón de relleno se consideran no significativos.

Una forma de completar el análisis sería ir eliminando los parámetros no significativos de uno en uno, recalculando la matriz de experimentos cada vez. Debido a la magnitud del proyecto, este método no se ha considerado, ya que no está dentro del alcance de este estudio.

Módulo de Young. Efectos principales para relaciones SN

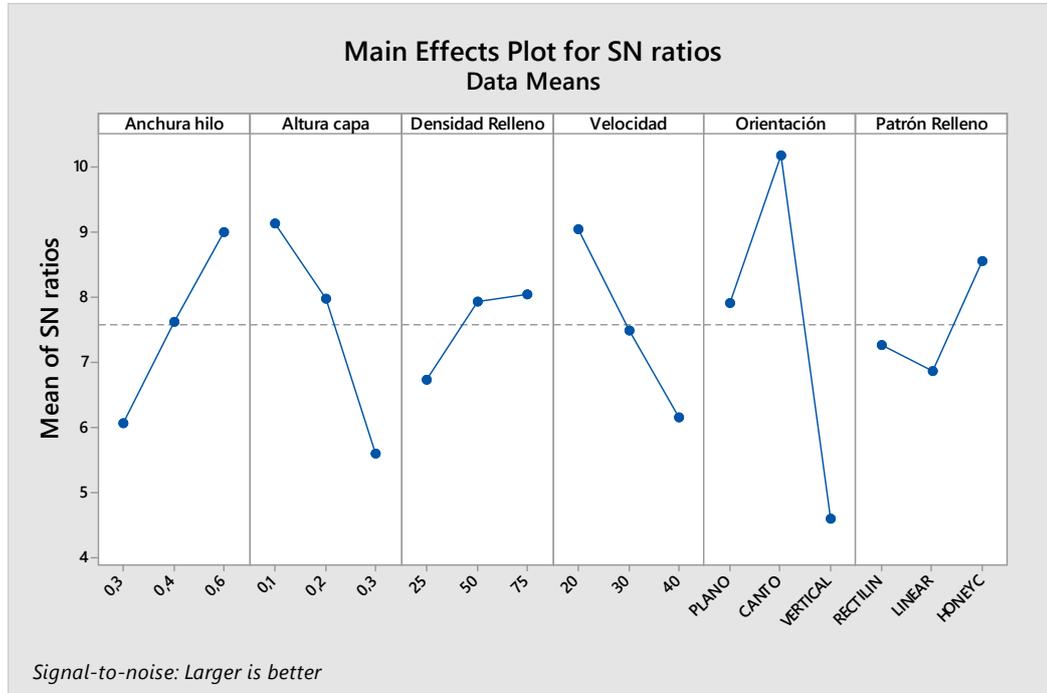


Figura 4.4. Efectos principales para relaciones SN, módulo de Young.

La relación SN, o señal – ruido, es una proporción entre el valor de la señal de salida de cada parámetro y el ruido o error del mismo. Con el cálculo de este parámetro, se puede conocer que parámetros son más robustos, con menor variabilidad en la respuesta respecto al estímulo de entrada. En cuanto mayor es el valor señal-ruido mejor es la fiabilidad.

En la figura 4.4 se observa que la orientación de capa es el parámetro más robusto. La anchura de hilo y la velocidad tienen una robustez notable, a medida que aumentan el valor de su nivel la señal SN crece. La densidad y el patrón de relleno presentan poca robustez.

Para verificar si un parámetro es suficientemente robusto o fiable se vuelve a fijar el nivel de significancia del 5%,  $\alpha = 0,05$ . Para que un parámetro sea significativo su P valor debe ser inferior a 0,05.

Tabla 4.3. P valores para relacionar señal-ruído de los parámetros de impresión respecto el módulo de Young.

Parámetro	P valor
Anchura hilo	0,148
Altura capa	0,103
Densidad Relleno	0,413
Velocidad	0,152
Orientación	0,045
Patrón Relleno	0,322

La orientación de capa es el único parámetro robusto, el resto de parámetros son poco fiables. Esto implica que, aunque se repita el mismo experimento habrá variaciones notables en la respuesta, por lo tanto, poca repetitividad. Este efecto es debido al propio proceso de fabricación; como es sabido, el proceso es poco controlable y muy heterogéneo debido a la cantidad de parámetros no controlables y la anisotropía del material. Esto no resta significación al estudio realizado, dado que se cuenta desde el origen del análisis con esta limitación del proceso de fabricación inherente a él mismo.

Se vuelve a considerar que no se puede asegurar que más de un valor es poco significativo a la vez. Se debe eliminar el menos significativo y recalcular la matriz de experimentos y repetir con el siguiente. Este procedimiento no entra en el alcance del proyecto, debido a que el objetivo del proyecto es encontrar el comportamiento general de los parámetros, sin entrar tanto en el detalle. En una segunda fase de investigación futura, se seguirá el procedimiento ordinario.

Módulo de Young, Interacción de medias

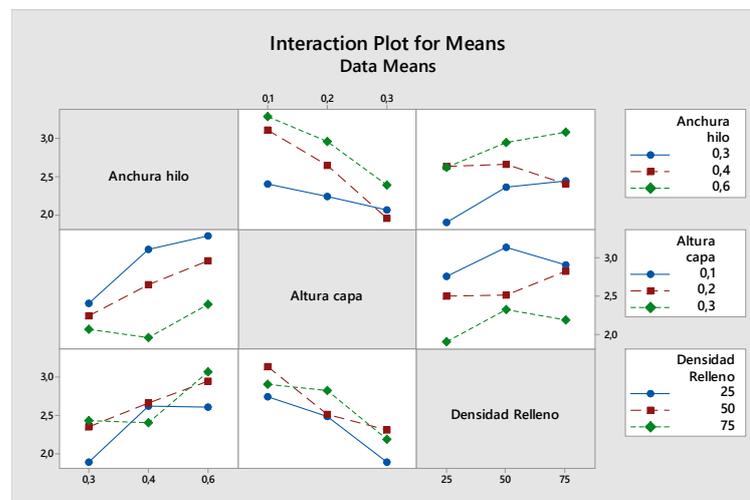


Figura 4.5. Interacción entre las medias de los parámetros.

En la figura 4.5 se puede observar si alguna de las interacciones entre los tres primeros parámetros resulta en un cambio de respuesta en el comportamiento mecánico.

No se observa ninguna interacción significativa, todas las curvas de interacción tienen la misma tendencia, creciente o decreciente.

Módulo de Young. Interacción de relaciones SN

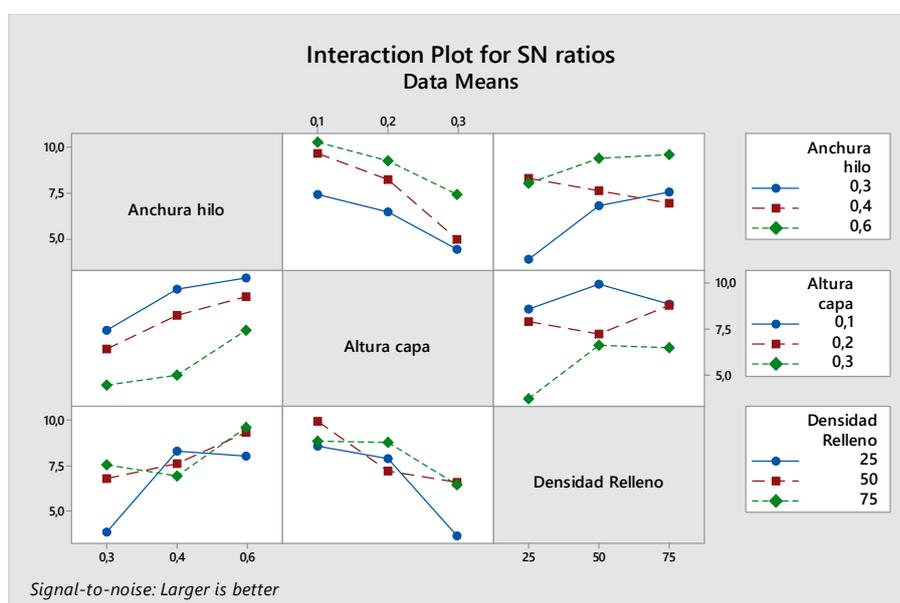


Figura 4.6. Interacción entre las relaciones SN.

En la figura 4.6 se muestra si alguna de las interacciones entre los tres primeros parámetros tiene una influencia en la robustez de los parámetros.

En este caso no se encuentra ninguna interacción destacable.

Módulo de Young. Residuos para medias y para Relaciones SN

Una de las hipótesis en que se basa el análisis ANOVA es en la normalidad de residuos, dado que permite conocer la linealidad del modelo que se puede calcular a partir del análisis,

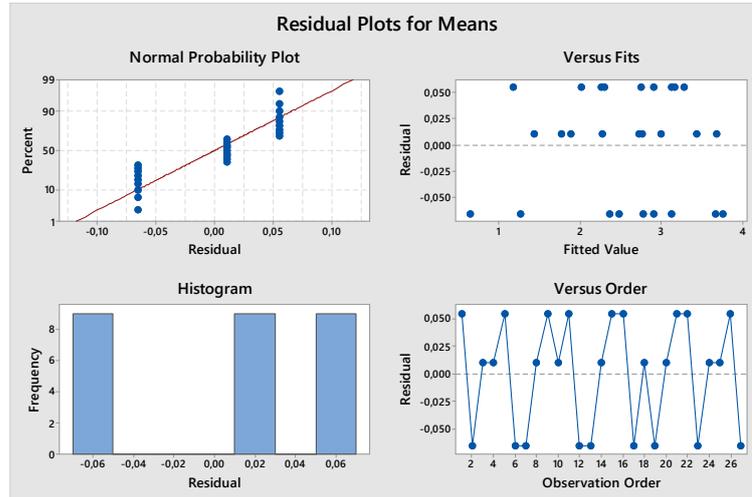


Figura 4.7. Residuos para medias.

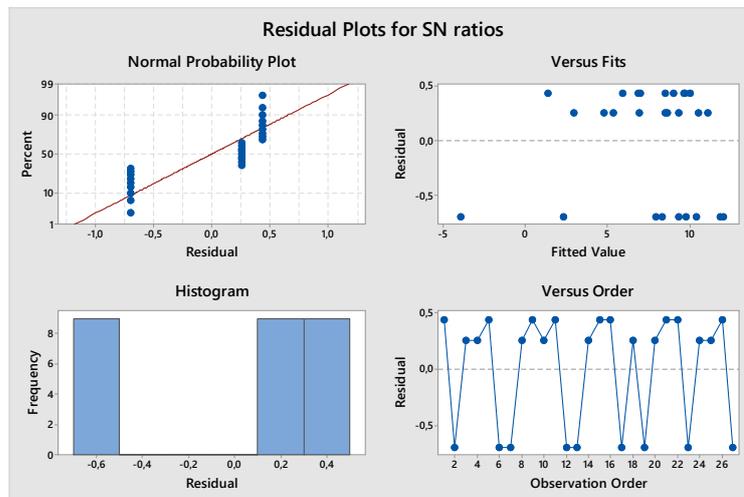


Figura 4.8. Residuos para relaciones SN.

Como se puede observar en los dos gráficos de residuos, los valores no responden a una distribución normal, sino que muestran una agrupación de puntos. Respecto el gráfico de probabilidad normal, los puntos no siguen la línea de distribución normal. En consecuencia, los residuos no son normales.

Con estos gráficos, se puede pensar que hay algún factor o parámetro que influye en los resultados y no se ha tenido en cuenta en el diseño de experimentos.

Debido a que se han utilizado todos los parámetros de impresión, de gran influencia en las propiedades mecánicas, y su elección ha sido validada por todos los estudios similares, se cree que la no aleatoriedad de residuos está ligada a la baja robustez ya analizada anteriormente. Se trata, así, de un efecto inherente a la fuerte anisotropía de piezas obtenidas mediante impresión 3D.

Por consiguiente, es necesario realizar más repeticiones de cada experimento. Se propondrá como acción futura añadir más repeticiones de cada una de las configuraciones de impresión.

#### 4.2.2. Límite elástico

El límite elástico es el valor de tensión que marca el cambio del comportamiento elástico del material al comportamiento plástico.

##### Límite elástico. Efectos principales para medias

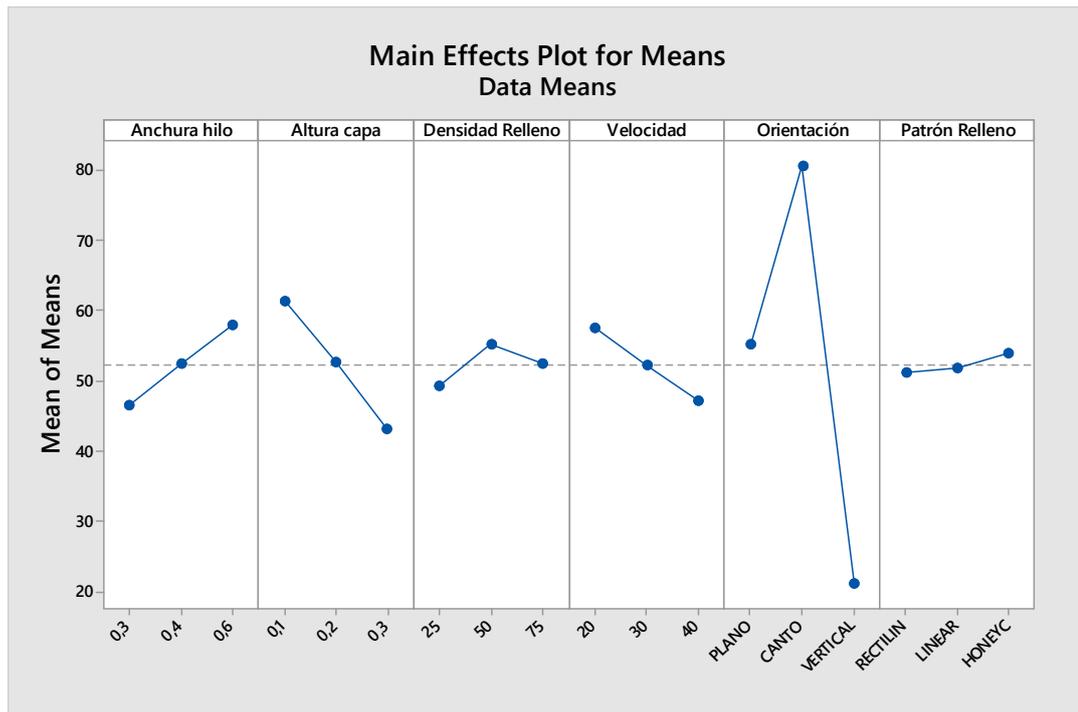


Figura 4.9. Efectos principales para medias, límite elástico.

La figura 4.9 muestra la influencia de los parámetros de impresión sobre el límite elástico, la respuesta de todos los parámetros sigue el mismo patrón que en el caso del módulo de Young.

La anchura de hilo muestra un impacto significativo, a medida que aumenta el ancho de hilo aumenta el valor del límite elástico.

La altura de capa tiene una influencia algo superior a la del ancho de hilo, pero de manera inversa; a medida que disminuye la altura de capa, aumenta el límite elástico.

La densidad de relleno no muestra un impacto significativo y no sigue ningún patrón.

La velocidad de impresión presenta una baja relevancia. Se observa una tendencia: cuando disminuye la velocidad aumenta el límite elástico.

Igual que en el módulo de Young, el parámetro más influyente con diferencia, es la orientación de impresión. Con la orientación *Canto* se consigue el límite elástico más alto, mientras que con la orientación *Vertical* el menor; con la orientación *Plano* se consigue un valor intermedio respecto las otras orientaciones de impresión.

En cuanto al patrón de relleno, es el que presenta menor importancia. Dentro del rango, la estrategia de impresión Honeycomb es la más fuerte.

Para verificar la influencia de los parámetros se define el nivel de significación igual al 5%,  $\alpha=0,05$ .

Tabla 4.4. P valores para relacionar medias de los parámetros de impresión respecto al límite elástico.

Parámetro	P valor
<b>Anchura hilo</b>	0,041
<b>Altura capa</b>	0,017
<b>Densidad Relleno</b>	<b>0,135</b>
<b>Velocidad</b>	0,049
<b>Orientación</b>	0,002
<b>Patrón Relleno</b>	<b>0,404</b>

La orientación es claramente significativa, la siguen en menor medida, la altura de capa, la anchura de hilo y la velocidad.

La densidad y patrón de relleno están lejos de ser significativos.

Límite elástico. Efectos principales relaciones SN

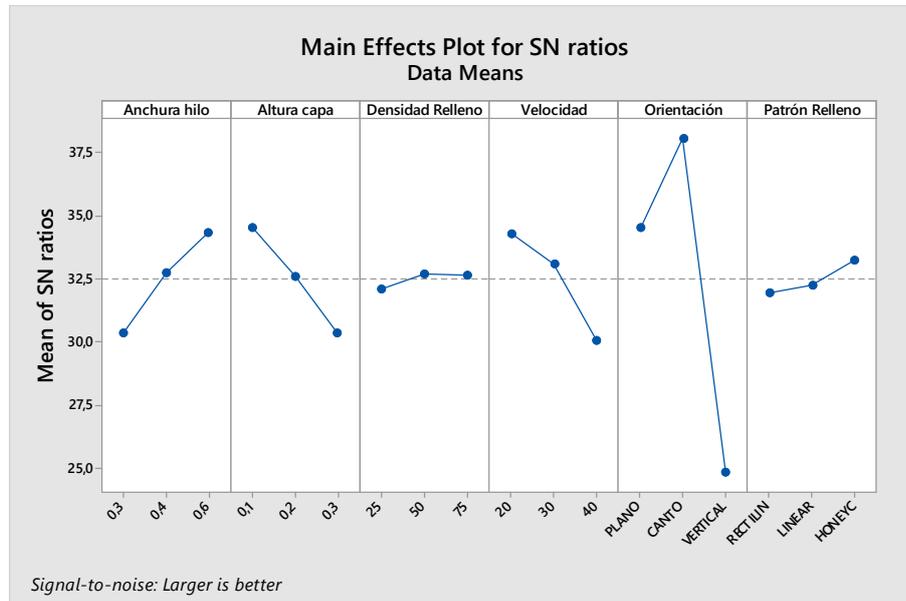


Figura 4.10. Efectos principales relaciones SN

La tendencia de los parámetros en la relación señal-ruido en sobre el límite elástico, es la misma que sobre el módulo de Young.

La orientación de capa es el parámetro que tiene más influencia en la robustez. La anchura de hilo y la velocidad tienen un menor impacto en la robustez, la cual aumenta a medida que aumenta su nivel. La altura también presenta una influencia notable, su valor aumenta cuando decrece su nivel.

Se verifica que parámetro tiene un P valor menor al nivel de significancia del 5%,  $\alpha = 0,05$ .

Tabla 4.5. P valores para relacionar señal-ruido de los parámetros de impresión respecto al límite elástico.

Parámetro	P valor
Anchura hilo	0,068
Altura capa	0,062
Densidad Relleno	0,734
Velocidad	0,057
<b>Orientación</b>	0,006
Patrón Relleno	0,388

Igual que en el anterior apartado, la orientación es el único parámetro significativo respecto a la robustez de los ensayo. Los otros parámetros no presentan suficiente significancia en esta primera aproximación.

Límite elástico. Interacción de medias y relaciones SN

Tabla 4.7. P valores interacciones de medias

Parámetro	P valor
Anchura hilo por altura de capa	0,103
Anchura de hilo por densidad de relleno	0,217
Altura de capa por densidad de relleno	0,162

Tabla 4.6. P valores interacciones de SN ratios

Parámetro	P valor
Anchura hilo por altura de capa	0,311
Anchura de hilo por densidad de relleno	0,316
Altura de capa por densidad de relleno	0,203

Los valores obtenidos son muy elevados respecto al límite máximo de significación, por lo que se concluye que no hay ninguna interacción significativa. Por esta razón no se muestran las gráficas de interacciones de parámetros. Este caso, se repite en los resultados sucesivos de los análisis, por lo cual, ya no se discutirán los valores de las interacciones obtenidos.

Límite elástico. Residuos para medias y para relaciones SN

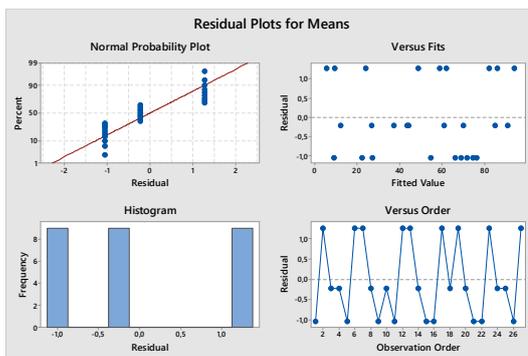


Figura 4.11. Residuos de las medias.  $Rp_{0,2}$

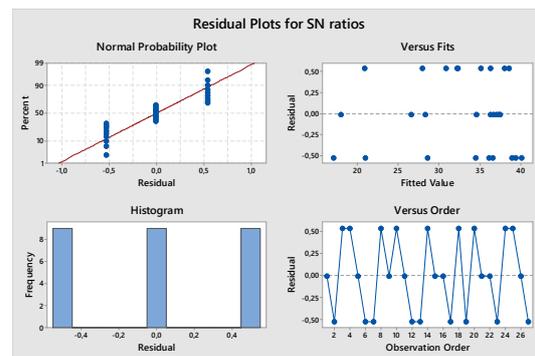


Figura 4.12. Residuos relaciones SN.  $Rp_{0,2}$

Como se puede observar en los dos gráficos de residuos, los valores no son aleatorios, sino que muestran una agrupación de puntos. Respecto el gráfico de probabilidad normal, los residuos no muestran normalidad. La justificación de este resultado ha sido explicada en el apartado 4.2.1. Módulo de Young.

### 4.2.3. Tensión máxima

#### Tensión máxima, Efectos principales para medias

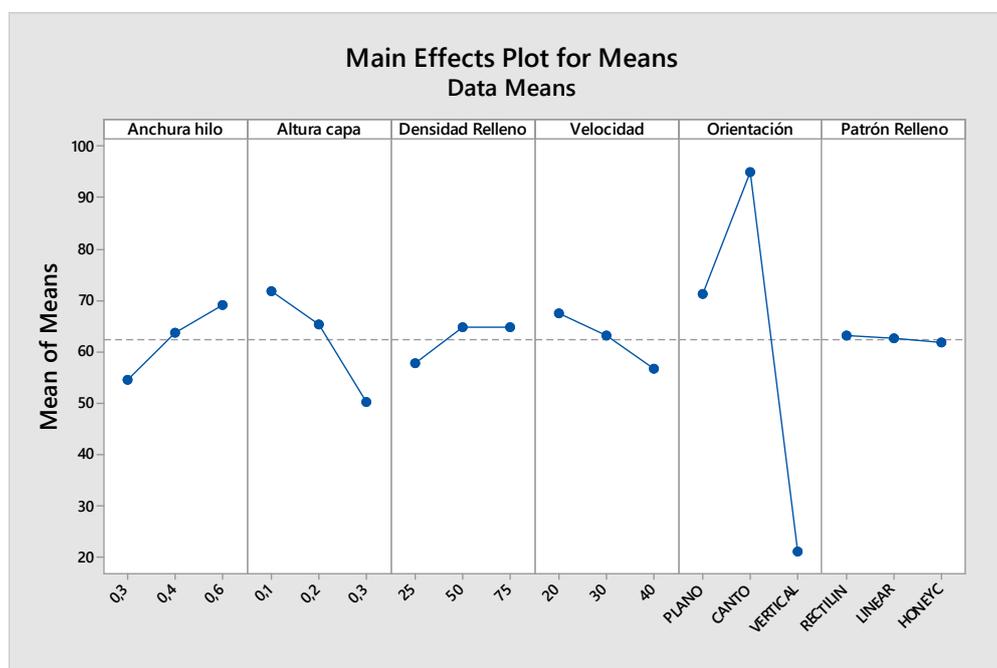


Figura 4.13. Efectos principales para medias, tensión máxima.

El comportamiento de los parámetros sigue el mismo patrón que en el caso del límite elástico (apartado 4.2.2), por lo que no se profundizará detalladamente.

Los parámetros que parecen significativos, ordenados de mayor a menor son: orientación, altura de capa y anchura de hilo. El resto de parámetros muestran una relevancia poco significativa.

Para verificar la influencia de los parámetros se define el nivel de significación igual al 5%,  $\alpha=0,05$ .

Tabla 4.8. P valores para relacionar medias de los parámetros de impresión respecto a la tensión máxima.

Parámetro	P valor
Anchura hilo	0,038
Altura capa	0,040
Densidad Relleno	0,530
Velocidad	0,040
Orientación	0,003
Patrón Relleno	0,546

La orientación de capa sigue siendo el parámetro con mayor influencia en el valor de las medias, le siguen con menor influencia la altura de capa, anchura de hilo y velocidad. La densidad y patrón de relleno no presentan suficiente influencia.

La respuesta de cada uno de los niveles sigue la misma tendencia que en el apartado 4.2.2. del límite elástico.

***Tensión máxima, Efectos principales relaciones SN***

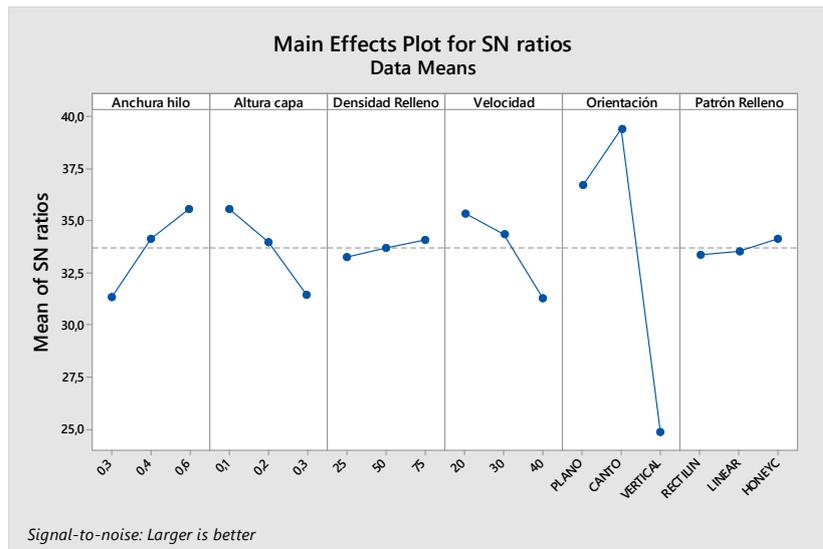


Figura 4.14. Efectos principales para relaciones SN, tensión máxima.

El comportamiento de los parámetros respecto las relaciones SN sigue el mismo patrón que en el apartado del límite elástico (apartado 4.2.2).

Los parámetros que parecen más significativos, ordenados de mayor a menor son: orientación, altura de capa y anchura de hilo. El resto de parámetros muestran una relevancia pequeña respecto los otros.

Para verificar la influencia de los parámetros se define el nivel de significación igual al 5%,  $\alpha=0,05$ .

Tabla 4.9. P valores para relacionar señal-ruido de los parámetros de impresión respecto a la tensión máxima.

Parámetro	P valor
Anchura hilo	0,145
Altura capa	0,072
Densidad Relleno	0,371
Velocidad	0,239
Orientación	0,007
Patrón Relleno	0,957

La orientación es el único parámetro significativo respecto a la robustez de los ensayos. Los otros parámetros no presentan suficiente significancia en esta primera aproximación.

### Tensión máxima. Residuos para medias y relaciones SN

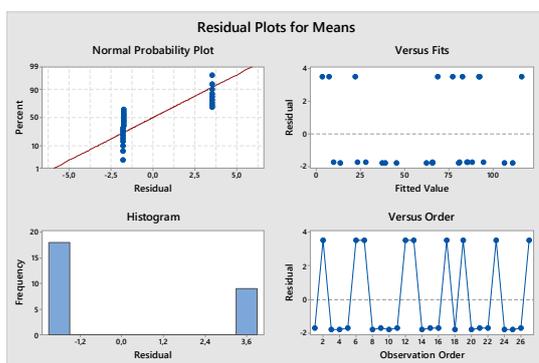


Figura 4.15. Residuos de medias.  $\sigma_{m\acute{a}x}$

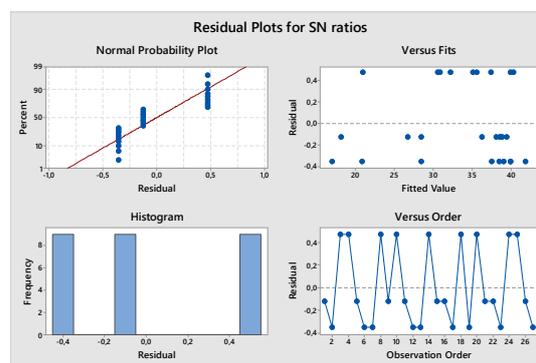


Figura 4.16. Residuos de relaciones SN.  $\sigma_{m\acute{a}x}$

Las conclusiones de los gráficos de residuos de las tensiones máximas, son las mismas que las del límite elástico. Los valores no son aleatorios, si no que muestran una agrupación de puntos y en el gráfico de probabilidad normal, los residuos no muestran normalidad.

La justificación de este resultado ha sido explicada en el apartado 4.2.1. Módulo de Young.

#### 4.2.4. Alargamiento máximo

El alargamiento máximo es la deformación unitaria justo antes del fallo de la probeta, por lo que nos da información de la flexibilidad.

Alargamiento máximo. Efectos principales para medias

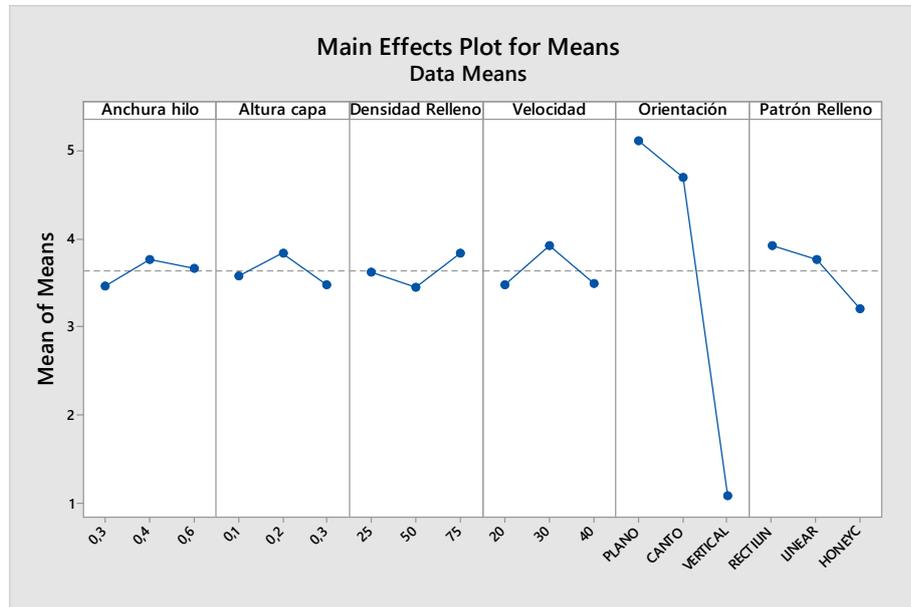


Figura 4.17. Efectos principales para medias, alargamiento máximo.

Si se observa el gráfico, el único parámetro que parece influyente es la orientación. La orientación *plano* y *canto* provocan el mayor alargamiento y el menor la orientación *vertical*. Los otros parámetros tienen poca importancia respecto a la orientación.

La anchura de hilo, altura de capa, densidad de relleno y velocidad, no presentan ningún patrón o proporcionalidad.

El patrón de relleno *Honeycomb* produce el menor alargamiento respecto a los otros patrones de relleno.

Para verificar la influencia de los parámetros se define el nivel de significación igual al 5%,  $\alpha=0,05$ .

Tabla 4.10. P valores para relacionar medias de los parámetros de impresión respecto al alargamiento.

Parámetro	P valor
Anchura hilo	0,591
Altura capa	0,514
Densidad Relleno	0,495
Velocidad	0,362
<b>Orientación</b>	<b>0,007</b>
Patrón Relleno	0,204

Las observaciones realizadas en el gráfico son verificadas con los P valor. La orientación es el único parámetro significativo, los otros parámetros se encuentran muy por encima del nivel de significación.

**Alargamiento máximo. Efectos principales relaciones SN**

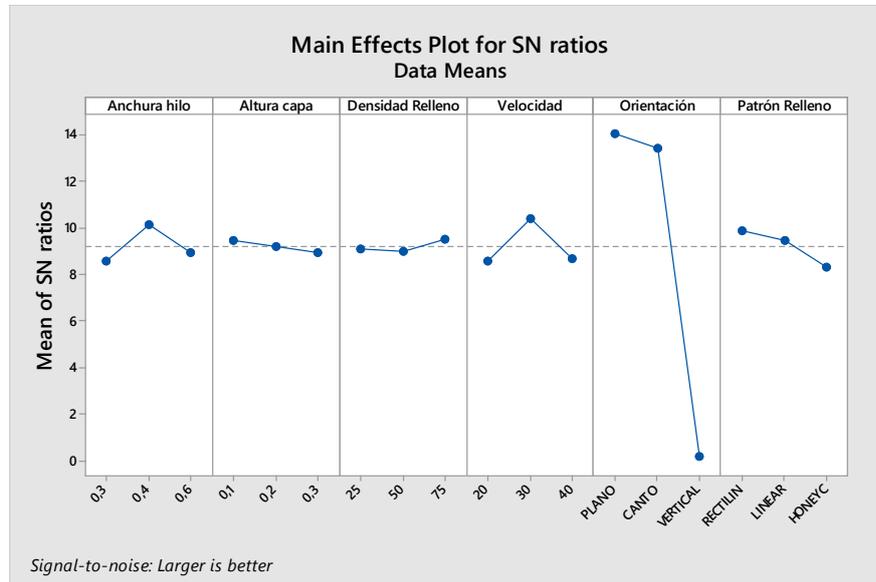


Figura 4.18. Efectos principales para relaciones SN, alargamiento máximo

Respecto a la señal– ruido, el único parámetro que tiene una gran influencia vuelve a ser la orientación. La orientación vertical resulta muy poco robusta comparado con las demás orientaciones.

Para verificar la influencia de los parámetros se define el nivel de significación igual al 5%,  $\alpha=0,05$ .

Tabla 4.11. P valores para relacionar señal – ruido de los parámetros de impresión respecto al alargamiento.

Parámetro	P valor
Anchura hilo	0,385
Altura capa	0,865
Densidad Relleno	0,852
Velocidad	0,284
<b>Orientación</b>	<b>0,007</b>
Patrón Relleno	0,392

Se verifica que el único parámetro con suficiente significancia es la orientación.

***Alargamiento máximo. Residuos para medias y para relaciones SN***

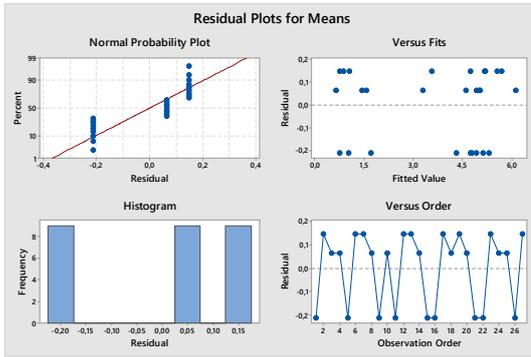


Figura 4.16. . Residuos de medias.  $\epsilon$

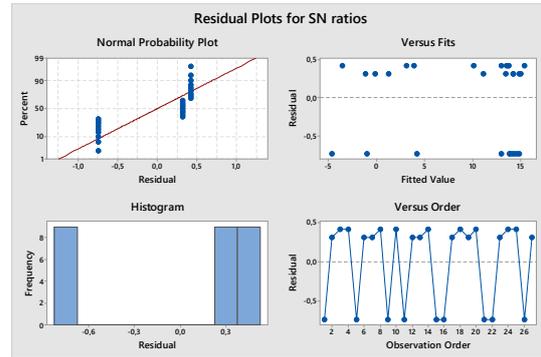


Figura 4.17. Residuos relaciones. SN.  $\epsilon$

Las conclusiones de los gráficos de residuos, son las mismas que en los anteriores apartados. Los valores no son aleatorios, sino que hay agrupaciones y no muestran normalidad.

La justificación de este resultado ha sido explicada en el apartado 4.2.1. Módulo de Young.

4.2.5. Densidad

Con el valor de la densidad se conoce la compacidad de los hilos. Es un parámetro esencial para conocer la porosidad de la probeta y el grado de soldadura entre los hilos.

***Densidad. Efectos principales para medias***

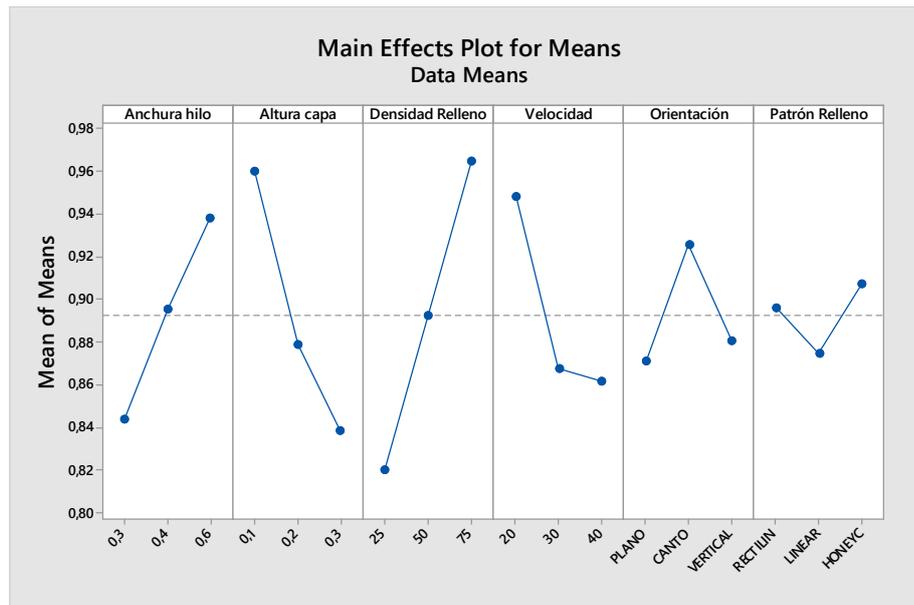


Figura 4.18. Efectos principales para medias, densidad

La anchura de hilo parece un parámetro influyente en la densidad de la probeta, a mayor anchura de boquilla mayor es la densidad de la probeta.

La altura de capa presenta un gran impacto, pero de carácter inverso; a menor altura de capa mayor densidad.

La densidad de relleno es el factor más influyente, se verifica que, a mayor densidad de relleno mayor densidad en la probeta.

La velocidad de impresión presenta un notable impacto en la densidad, y marca un patrón: a menor velocidad mayor el grado de densidad.

La orientación y el patrón de relleno presentan poca influencia en la densidad de la probeta.

Para verificar la influencia de los parámetros se define el nivel de significación igual al 5%,  $\alpha=0,05$ .

Tabla 4.12. P valores para relacionar medias de los parámetros de impresión respecto la densidad.

Parámetro	P valor
Anchura hilo	0,063
Altura capa	0,038
Densidad Relleno	0,028
Velocidad	0,061
Orientación	0,151
Patrón Relleno	0,255

Como se esperaba, la densidad de relleno es el factor más significativo, seguido de la altura de capa. Los demás factores muestran P valores superiores al valor límite.

**Densidad. Efectos principales relaciones SN**

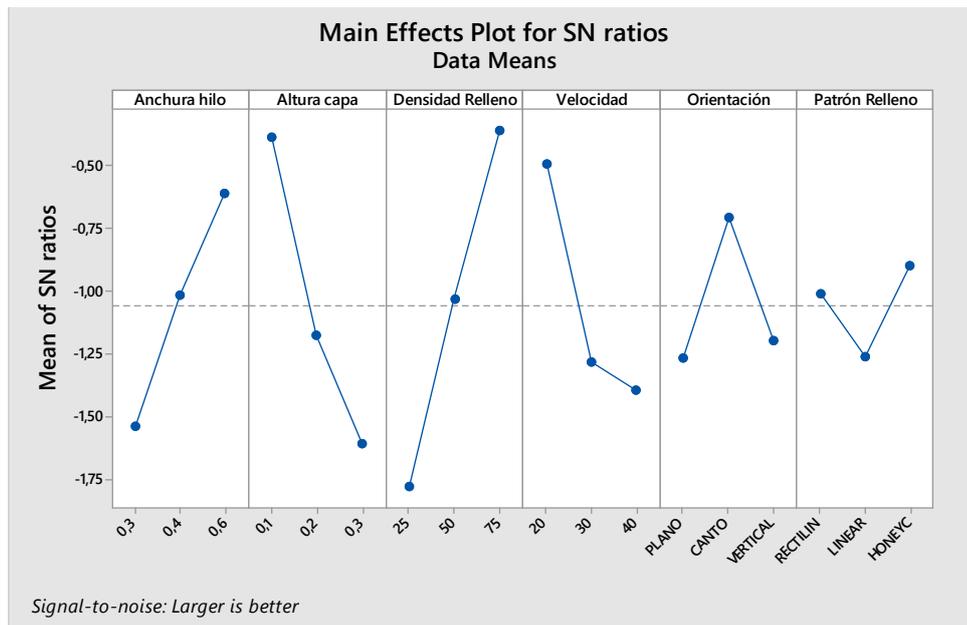


Figura 4.19. Efectos principales para relaciones SN, densidad

Respecto al valor de señal–ruido, los parámetros con más influencia son la densidad de relleno y la altura de capa. El ratio SN aumenta con el incremento de la densidad y con el decrecimiento de la altura de capa.

La anchura de capa y la velocidad muestran una influencia notable. El ratio SN aumenta con el incremento de la anchura de capa y con el decrecimiento de la velocidad.

La orientación y el patrón de relleno tienen poca influencia.

Para verificar la influencia de los parámetros se define el nivel de significación igual al 5%,  $\alpha=0,05$ .

Tabla 4.13. P valores para relacionar señal–ruido de los parámetros de impresión respecto a la densidad.

Parámetro	P valor
Anchura hilo	0,091
Altura capa	0,053
Densidad Relleno	0,041
Velocidad	0,082
Orientación	0,188
Patrón Relleno	0,390

Considerando el nivel de significación, el único valor que tiene influencia sobre la relación señal-ruido es la densidad de relleno.

**Densidad. Residuos para medias y para relaciones SN**

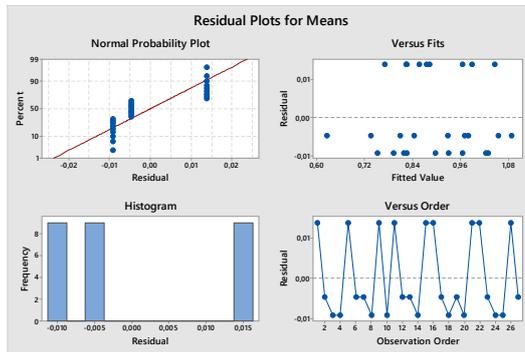


Figura 4.20. Residuos de medias.  $\rho$

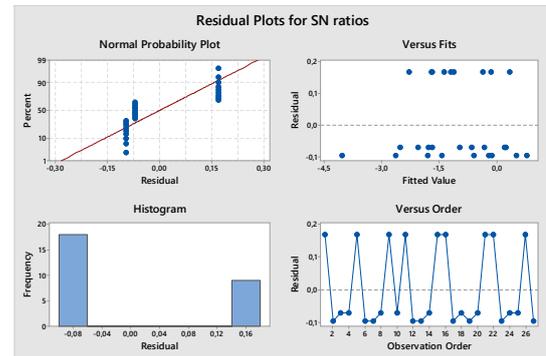


Figura 4.21. Residuos de medias.  $\rho$

Las conclusiones de los gráficos de residuos, son las mismas que en los anteriores apartados. Los valores no son aleatorios, sino que hay agrupaciones y no muestran normalidad.

La justificación de este resultado ha sido explicada en el apartado 4.2.1. Módulo de Young.

4.2.6. Resultado del análisis.

Para tener una visión global del análisis, los valores de significancia de cada parámetro se muestran en la tabla 4.12.

Tabla 4.14. Valor de la significancia de los parámetros respecto las respuestas.

Factor	Respuesta				
	Módulo de Young (E)	Límite elástico (Rp <sub>0,2</sub> )	Tensión máxima (σ <sub>máx</sub> )	Alargamiento máximo (ε)	Densidad (ρ)
<b>Anchura hilo</b>	✓ ✓	✓	✓ ✓	✗	✗
<b>Altura capa</b>	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓	✗	✓ ✓
<b>Densidad Relleno</b>	✗	✗	✗	✗	✓ ✓
<b>Velocidad</b>	✓	✓	✓	✗	✗
<b>Orientación</b>	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✗
<b>Patrón Relleno</b>	✗	✗	✗	✗	✗

La orientación es el parámetro más influyente en la rigidez y resistencia a flexión, seguido de la altura de capa y de la anchura de hilo. Por último, la velocidad.

No se encuentra esto en términos de deformación, en que la orientación es el único parámetro influyente. Finalmente, la densidad es solo dependiente de la altura de capa y la densidad del relleno, como era de esperar.

Con el objetivo de maximizar la respuesta, se muestran los niveles óptimos de cada parámetro en la tabla 4.13.

Tabla 4.15. Nivel de los parámetros para maximizar la respuesta.

Factor	Respuesta				
	Módulo de Young (E)	Límite elástico (Rp <sub>0,2</sub> )	Tensión máxima (σ <sub>máx</sub> )	Alargamiento máximo (ε)	Densidad (ρ)
<b>Anchura hilo</b>	0,6 mm	0,6 mm	0,6 mm	0,2 mm	0,6 mm
<b>Altura capa</b>	0,1 mm	0,1 mm	0,1 mm	0,2 mm	0,1 mm
<b>Densidad Relleno</b>	75%	75%	75%	75%	75%
<b>Velocidad</b>	20mm/min	20mm/min	20mm/min	30mm/min	20mm/min
<b>Orientación</b>	Canto (Y)	Canto (Y)	Canto (Y)	Plano (X)	Canto (Y)
<b>Patrón Relleno</b>	HoneyC.	HoneyC.	HoneyC.	Rectil.	HoneyC

Para maximizar la rigidez y la resistencia a flexión, la orientación de capa debe ser *Canto* (Y), la anchura de hilo 0,6 mm, la altura de capa 0,1 mm, la densidad de relleno del 75 % con el patrón Honeycom, y la velocidad 20 mmm/min.

Tabla 4.16. Combinación óptima de parámetros para maximizar la rigidez y resistencia a flexión.

Parámetro	Nivel	Valor
<b>Anchura hilo</b>	+	0,6 mm
<b>Altura capa</b>	-	0,1 mm
<b>Densidad de relleno</b>	+	75 %
<b>Velocidad</b>	-	20 mm/min
<b>Orientación</b>	Canto (Y)	Canto (Y)
<b>Patrón de relleno</b>	Honeycomb.	Honeycomb

Teniendo en cuenta el nivel de los parámetros de la tabla 4.14 los parámetros de nivel y el valor el grado de significancia de la tabla 4.12, se llega a la conclusión que la combinación óptima para maximizar la rigidez y resistencia a la flexión es:

*Tabla 4.17. Combinación óptima y significativa de parámetros para maximizar la rigidez y resistencia a flexión*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Anchura hilo</b>	0,6 mm
<b>Altura capa</b>	0,1 mm
<b>Velocidad</b>	20 mm/min
<b>Orientación</b>	Canto (Y)

## 5. Discusión de los resultados del ensayo de flexión en cuatro puntos

En este apartado se discutirá la influencia de los parámetros en las propiedades mecánicas y físicas de las probetas. Las conclusiones serán apoyadas por fotografía de microscopio de las secciones de rotura. Las conclusiones solo podrán ser aplicadas en probetas impresas con las mismas dimensiones y los mismos parámetros de impresión dentro del rango del estudio.

### 5.1. Orientación de impresión

El principal factor que determina la resistencia de las probetas es la orientación del apilamiento de las capas. En las siguientes figuras se compara el comportamiento de las probetas impresas verticales (z) con las probetas planas (x) o de canto (y).

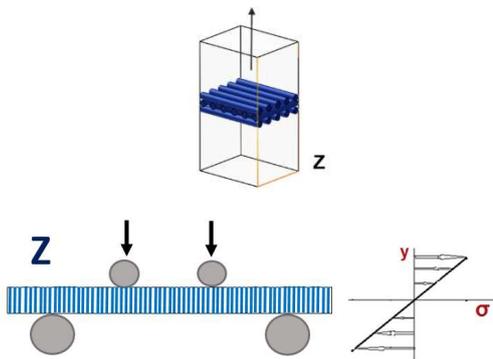


Figura 5.1. Diagrama orientación de capas en Z.

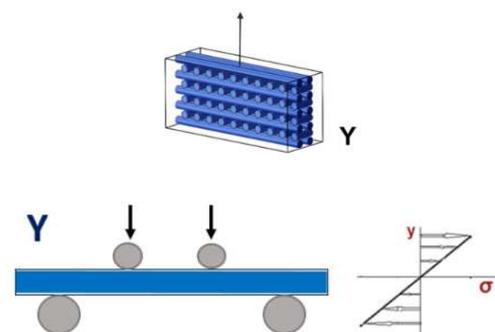


Figura 5.2. Diagrama orientación de capas en Y.

Las probetas impresas en dirección *Vertical* (z) tienen un comportamiento frágil y poca deformación, baja resistencia a flexión y baja rigidez. Su comportamiento se debe a que las capas están orientadas perpendicularmente a las tensiones que se generan en la probeta (figura 5.1). La resistencia de las probetas verticales depende totalmente de la débil unión intercapa, menos resistente que la unión molecular existente entre las cadenas de polímero (unión intracapa). Se trata de la orientación que pone de manera más evidente esta diferencia entre ambos mecanismos resistentes que conforman las piezas fabricadas por FFF.

Las probetas impresas en orientación plana (x) o de canto (y) tienen un comportamiento dúctil con gran alargamiento, buena resistencia a flexión y alta rigidez. El comportamiento se debe a que las capas están alineadas con las tensiones, (figura 5.2 y 5.5). La resistencia depende de la fuerte unión intracapa y de la propia resistencia de los filamentos.

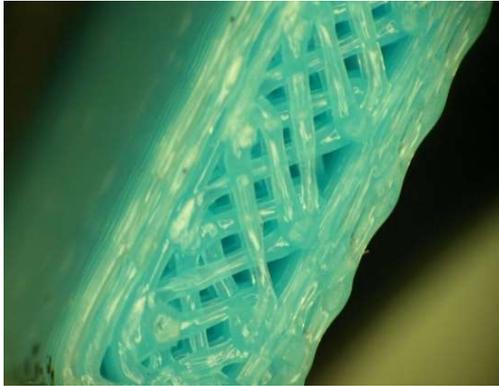


Figura 5.3 Sección de rotura, probeta con orientación Z. Probeta 17\_2. Fotografía microscópica

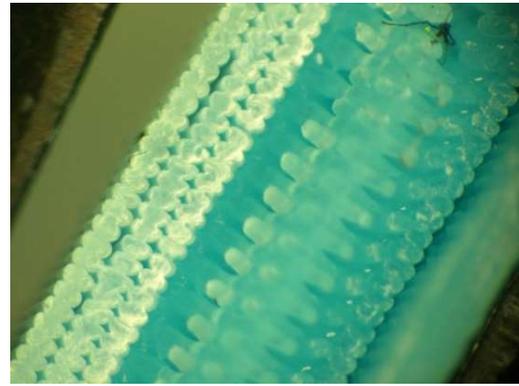


Figura 5.4. Sección de rotura, probeta con orientación Y. Probeta 14\_3. Fotografía microscópica

En la figura 5.3 se muestra la sección de rotura de una probeta impresa en orientación *Vertical* (Z). La rotura se ha producido en la soldadura débil intercapa sin que la integridad de los hilos haya sido afectada.

En la figura 5.4 se muestra la sección de rotura de una probeta impresa en dirección *Canto* (Y). La rotura de la probeta se ha producido por el fallo de los filamentos de la fibra externa. Se puede observar la sección de los filamentos.

Respecto la orientación *Canto* y *Plano*. La rigidez y la resistencia a flexión son ligeramente superiores con la orientación *Canto*.

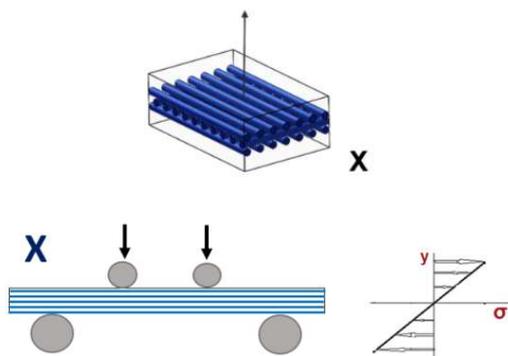


Figura 5.5. Diagrama orientación de capas en X.

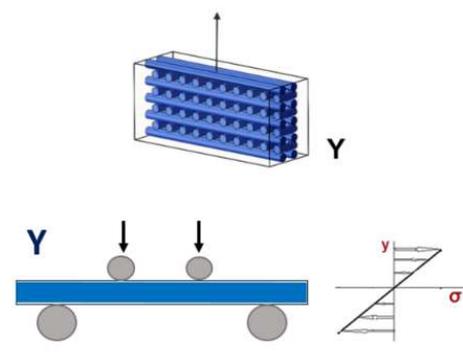


Figura 5.6. Diagrama orientación de capas en Y.

La causa vuelve a ser la disposición de capas. Aunque las dos orientaciones tienen las capas paralelas a la dirección de las tensiones, las probetas impresas plana (x) pueden llegar a laminarse cuando son flexionadas (figura 5.8).

La laminación se produce por la rotura de las uniones débiles intercapa. La probeta se vuelve flexible y es incapaz de resistir el esfuerzo de flexión, aunque las uniones intracapa permanezcan intactas.

Por otro lado, si las uniones intercapa son suficientemente fuertes, la rotura se produce en los filamentos exteriores, (figura 5.7).

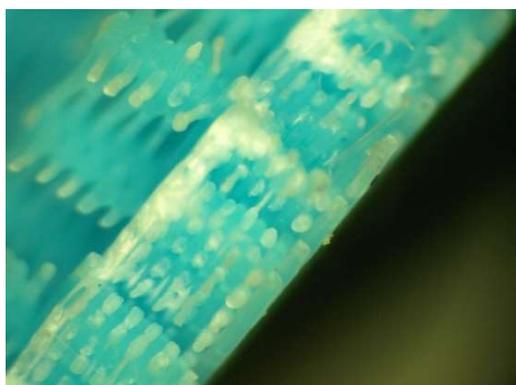


Figura 5.7. Sección de rotura, probeta con orientación X, fallo por rotura. Probeta 1\_2  
Fotografía microscópica



Figura 5.8. Fotografía de probeta con orientación X, fallo por laminación.  
Probeta D\_1, D\_2.

Las probetas impresas de Canto (Y) tienen las capas orientadas perpendicularmente a la flexión (figura 5.6), por lo que no pueden laminarse. Su resistencia depende directamente de las fuertes uniones intracapa y la resistencia de los hilos. En la figura 5.9 se observa que el fallo es debido a la rotura de los hilos.

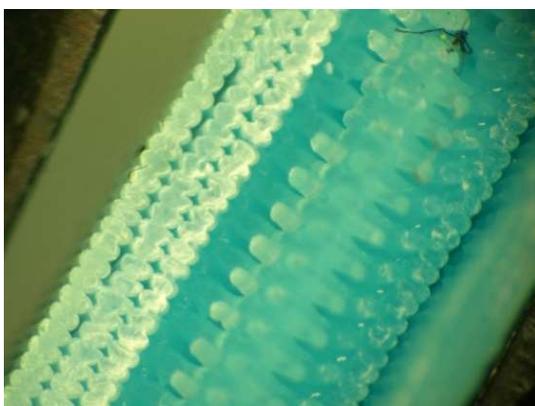


Figura 5.9. Sección de rotura, probeta con orientación Y. Probeta 14\_3.  
Fotografía microscópica

## 5.2. Altura de capa y anchura de hilo

El segundo factor más decisivo es la altura de capa, seguido de la anchura de hilo. Cuanta más pequeña ha sido la altura de capa y más grande la anchura de hilo, más rígida y resistente a la flexión ha sido la probeta. Esto está directamente relacionado con la compactación de los hilos y la soldadura entre hilos.

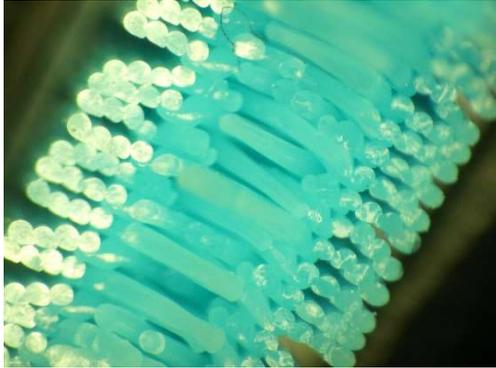


Figura 5.10. Probeta con altura de capa 0,3 mm y anchura de hilo 0,3mm. Probeta 9\_2.  
Fotografía microscópica

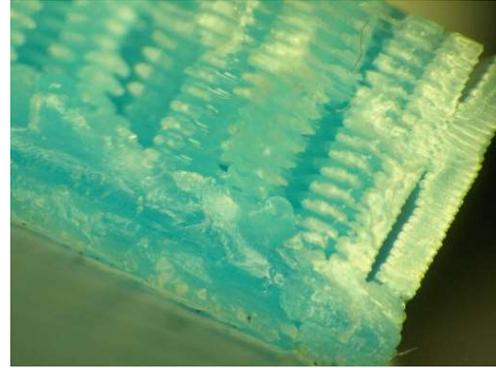


Figura 5.11. Probeta con altura de capa 0,1 mm y anchura de hilo 0,6mm. Probeta 21\_3.  
Fotografía microscópica

En la figura 5.10 se muestra el caso extremo con la altura máxima de capa 0,3 mm y la anchura mínima de hilo 0,3 mm. Con estas dimensiones, los hilos son cilíndricos y producen una baja compactación y una débil soldadura debido a la escasa superficie de contacto entre hilos. En cambio, a medida que disminuye la altura de capa y aumenta la anchura de hilo, los hilos tienen una forma elíptica, con mucha superficie de soldadura. En la figura 5.11 se muestra el caso óptimo con una altura de capa mínima de 0,1mm y la anchura de hilo máxima de 0,6mm.

En conclusión, la superficie de soldadura de los hilos, donde se produce el microsinterizado entre las cadenas del polímero depositado al principio y las del filamento que luego se deposita sobre él, es determinante en el comportamiento mecánico. A mayor superficie de soldadura, mayor rigidez y resistencia de la pieza.

## 5.3. Velocidad

La velocidad de impresión parece tener menor efecto en la rigidez y resistencia a flexión. La posible causa de este efecto sería la pérdida de rendimiento en la deposición del filamento, ya que observando las gráficas de densidad, se constata

que al aumentar la velocidad hay una pérdida de densidad en la probeta, lo que quiere decir que no se deposita la cantidad de material teóricamente prevista.

La velocidad es un parámetro que habitualmente se desprecia, no obstante, en nuestro estudio hemos sido capaces de encontrar una influencia notable de este parámetro con un rango de valores de velocidad pequeño.

#### 5.4. Densidad de relleno y patrón

La densidad de relleno y el patrón de relleno utilizados muestran un impacto muy poco significativo en las propiedades mecánicas en los experimentos que se han llevado a cabo. Posiblemente la poca relevancia de estos parámetros no es debida al parámetro en sí, sino a la geometría interna de las probetas y a que la orientación ha tenido un efecto muy grande, que ha actuado como un alias de estos otros dos, ocultando parcialmente su influencia real.

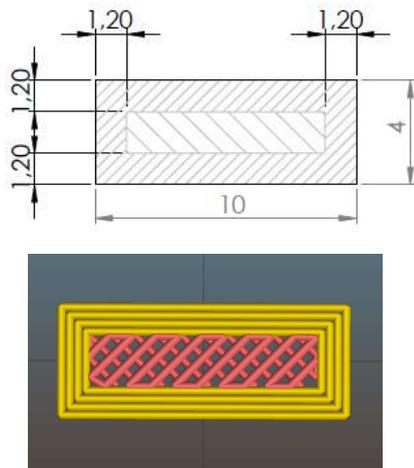


Figura 5.12. Dimensiones y detalle de la sección de las probetas. Fuente Slic3r.

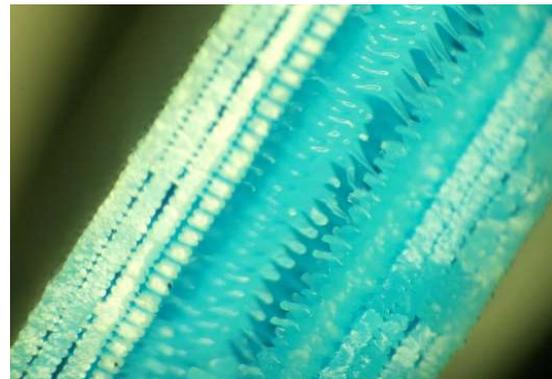


Figura 5.13. Sección de la probeta 2\_2. Fotografía microscópica

La capacidad de resistir fuerzas de flexión viene dada por la resistencia de la propia materia y la inercia. La inercia de una figura plana rectangular viene dada por la ecuación siguiente:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (5)$$

Dónde:

I= Inercia (mm<sup>4</sup>)

h= Altura de la sección (4 mm)

b= Anchura de la sección (10 mm).

Observando la ecuación 5, la altura es la variable que tiene más peso en la inercia de una figura plana. Por lo tanto, son las capas exteriores (contornos), las que tienen el valor fundamental en la resistencia a la flexión y no las capas interiores formadas por el relleno. De aquí, la poca influencia de la densidad o patrón de relleno.

Aunque la influencia de estos dos parámetros es baja, se puede apreciar una tendencia: a mayor densidad de relleno las probetas son más rígidas y resistentes a flexión. El patrón de relleno Honeycomb es el que da el mejor resultado en las propiedades mecánicas.

## 6. Validación de la combinación óptima de parámetros de impresión en flexión con resultados de fatiga

Para completar este estudio, se propone validar los resultados óptimos encontrados en el rango de niveles estudiado, aplicándolos en un ensayo de fatiga rotativa. Esto también nos permitirá compararlos con otros valores obtenidos anteriormente por el grupo DEFAM en este tipo de ensayos, mediante un estudio por matriz ortogonal de Taguchi. En este capítulo se evaluarán los niveles óptimos de impresión a flexión en cuatro puntos obtenidos en nuestro estudio y se compararán con los parámetros de impresión óptimos a la resistencia a la fatiga, encontrados en un proyecto anterior.

### 6.1. Descripción del estudio de la resistencia a la fatiga de especímenes impresos en 3D

En el año 2016 y dentro del grupo de investigación DEFAM de la UPC, se llevó a cabo un estudio de resistencia a la fatiga respecto a parámetros de impresión 3D. Este trabajo, se titulaba “Resistencia mecánica de piezas fabricadas mediante FDM” y el autor principal fue Daniel Puig. De ahora en adelante, éste trabajo se nombrará como *Fatiga 2016*.

La estructura del estudio de fatiga sigue la misma línea que la utilizada en el presente trabajo. Se analizaron cinco parámetros de impresión a tres niveles cada uno, a través de una matriz de experimentos de Taguchi L27 compactando el número de ensayos. Por consiguiente se realizaron 27 experimentos diferentes con 5 repeticiones cada uno, necesitando un total de 135 probetas impresas en 3D.

Se realizaron ensayos a fatiga a las probetas, con el objetivo de conocer los parámetros más resistentes contra este fenómeno.

Tabla 6.1. Parámetros y niveles de estudio del proyecto *Fatiga. 2016*.

<i>Fatiga 2016</i>	Nivel			
Factor	1	2	3	Unidad
Altura de capa	0.1	0.2	0.3	mm
Ancho del hilo	0.3	0.4	0.5	mm
Densidad de relleno	25	50	75	%
Velocidad	25	30	35	mm/min

Los resultados del estudio mostraron que la velocidad de impresión tiene muy poca influencia, por lo cual se descartó. Los demás factores, altura de capa, ancho de hilo y densidad de relleno tuvieron una importante influencia en la resistencia a fatiga; ésta mejoraba substancialmente con los valores más altos de cada parámetro. En la siguiente tabla se muestran los valores óptimos encontrados:

Tabla 6.2. Combinación de niveles óptimos para maximizar la resistencia a fatiga. Proyecto Fatiga 2016.

Parámetro	Nivel óptimo para mayor resistencia a fatiga
Densidad de relleno	75 %
Anchura de hilo	0,5 mm
Altura de capa	0,3 mm
Patrón de relleno	Honeycomb

Se debe tener en cuenta que, en el proyecto de *Fatiga 2016* no se aplicó la restricción de espesor de contornos constante, sino que fue variable siendo proporcional al valor de la altura de capa y anchura de hilo.

## 6.2. Metodología de evaluación

Para validar y corroborar los resultados encontrados en el estudio de flexión en cuatro puntos, se cruzarán dos estudios de análisis del comportamiento mecánico de probetas impresas en 3D (figura 6.1.).

En primer lugar se imprimirán probetas con los niveles óptimos encontrados a partir del estudio de *Fatiga 2016* y se ensayarán a flexión en cuatro puntos. De esta manera se evaluará cuál es la mejor combinación de parámetros para maximizar la resistencia y rigidez a flexión.

En segundo lugar se realizarán ensayos a fatiga, con probetas impresas con los parámetros óptimos encontrados en el presente estudio de flexión en cuatro puntos, (*Flexión 2017*). Con ambos resultados se evaluará, la mejor combinación de parámetros respecto a la resistencia a fatiga.

Tabla 6.3. Combinación Flexión 2017.

Parámetro	Combinación óptima Flexión 2017
Anchura hilo	0,6 mm
Altura capa	0,1 mm
Velocidad	20 mm/min
Orientación	Canto (Y)

Tabla 6.4. Combinación Fatiga 2016.

Parámetro	Combinación óptima Fatiga 2016
Densidad de relleno	75 %
Anchura de hilo	0,5 mm
Altura de capa	0,3 mm
Patrón de relleno	Honeycomb



Figura 6.1. Diagrama metodología de evaluación de la combinación de niveles óptimos.

## 6.1 Comparación niveles óptimos con ensayos a flexión en cuatro puntos

En esta apartado se quiere validar los niveles óptimos de impresión de nuestro estudio comparándolos con los niveles óptimos de impresión del trabajo de *Fatiga 2016*.

Con este objetivo se han vuelto a imprimir probetas de ensayo a flexión. Cuatro probetas se han imprimido siguiendo los niveles óptimos conseguidos en el trabajo

de *Fatiga 2016* y otras cuatro con los parámetros óptimos obtenidos en los experimentos del presente estudio.

Las probetas han sido ensayadas siguiendo la misma pauta que en el capítulo 3. Los resultados de cada uno de los ensayos se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 6.5. Resultados ensayo de flexión 4 puntos con combinación de parámetros *Fatiga 2016*.

<i>Fatiga 2016</i>		PLA-0,6-0,3-75-20-CANTO-HONEYC			
#	E	Rp0,2	Máx. tensión	Alargamiento	Densidad
D_1	3,06	90,6	96,6	6,5	1,025
D_2	2,98	90,3	95,8	6,7	1,017
D_3	2,90	69,3	69,4	2,5	1,019
D_4	3,20	97,3	102,6	4,6	1,022
<b>Promedio</b>	<b>3,04</b>	<b>86,9</b>	<b>91,1</b>	<b>5,1</b>	<b>1,021</b>
<b>Desv. Std</b>	0,080	12,1	14,8	1,952	0,0037

Tabla 6.6. Resultados ensayo de flexión 4 puntos con combinación de parámetros *Flexión 2017*.

<i>Flexión 2017</i>		PLA-0,6-0,1-75-20-CANTO-HONEYC			
#	E	Rp0,2	Máx. tensión	Alargamiento	Densidad
O_1	3,45	110,9	114,3	5,3	1,097
O_2	3,54	104,9	118,1	4,6	1,095
O_3	3,67	99,8	124,2	6,0	1,091
O_4	3,53	103,0	114,6	5,3	1,094
<b>Promedio</b>	<b>3,55</b>	<b>104,7</b>	<b>117,8</b>	<b>5,0</b>	<b>1,094</b>
<b>Desv. Std</b>	0,111	4,641	4,594	0,736	0,0027

En la tabla 6.4 se muestra un resumen de los resultados de ambos estudios para facilitar su comparación:

Tabla 6.7. Comparación de resultados.

Propiedad	<i>Fatiga 2016</i>	<i>Flexión 2017</i>	Variación %
<b>Módulo Young</b>	3,04	3,55	+16,8
<b>Rp0,2</b>	86,9	104,7	+20,5
<b>Máx. tensión</b>	91,1	117,8	+29,3
<b>Alargamiento</b>	5,1	5,0	-2,0
<b>Densidad</b>	1,021	1,094	+7,1

Como se puede observar, las probetas impresas con los parámetros encontrados en nuestro proyecto mejoran las propiedades mecánicas respecto al proyecto realizado el año anterior.

- La rigidez o módulo de Young ha aumentado un 16,8%
- El límite elástico ha aumentado un 20,5% (parámetro esencial en piezas mecánicas).
- La máxima tensión soportable del material ha sido un 29,3% superior (se aprecia el mayor incremento).
- El alargamiento ha disminuido un 2% (siendo un valor muy bajo).
- La densidad ha aumentado un 7,1%, (por consiguiente la compacidad de los hilos es superior).

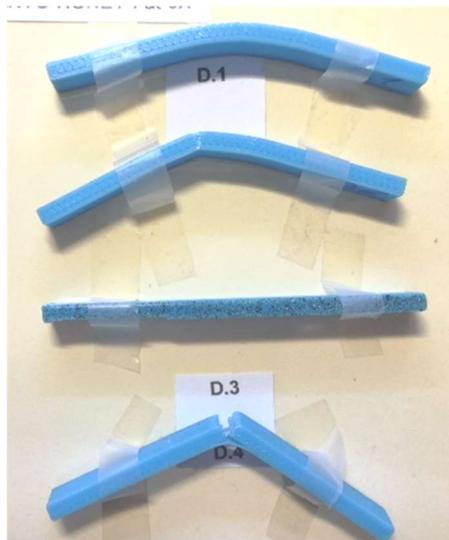


Figura 6.2. Probetas impresas con parámetros Fatiga 2016

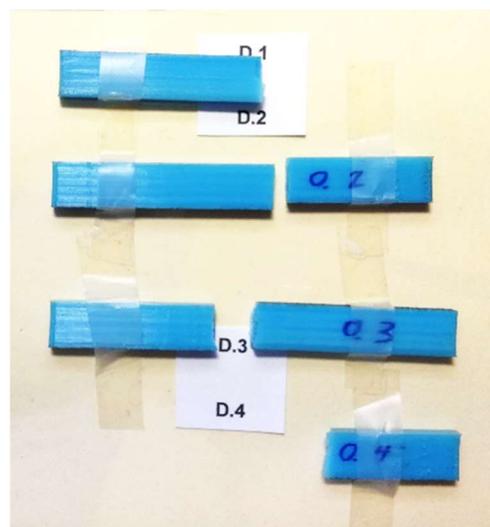


Figura 6.3. Probetas impresas con parámetros Flexión 2017

En la figura 6.2., se observa que la mayoría de probetas impresas según los parámetros de *Fatiga 2016*, han fallado por laminación (rotura intracapa) y no por la rotura de fibras. En consecuencia la probeta no ha podido emplear toda su capacidad resistente debido a que ha fallado por laminación.

Por otro lado, en la figura 6.3, el fallo se ha producido por la rotura de todas las fibras, por lo que la probeta ha empleado toda su capacidad resistente.

### 6.1.1. Comparación de los resultados

Las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de flexión con los parámetros del presente proyecto han sido superiores a las obtenidas con los parámetros del proyecto anterior. El incremento de rigidez es del 16,8%, mientras el límite elástico y la tensión máxima han mejorado un 20,5% y un 29,3% respectivamente.

El incremento de las propiedades se debe a la compactibilidad de los hilos, especialmente en las capas exteriores, a mayor compactibilidad hay una mayor área resistente en las probetas.

Se valida que las alturas de capa más pequeñas mejoran la compactación de los hilos, incrementando la superficie de soldadura. La diferencia de compactación y de superficie de soldadura determina el modo de fallo, se observa que las probetas que fallan por laminación son menos resistentes que las que fallan por rotura de fibras.

## 6.2. Comparación niveles óptimos con ensayo de fatiga

En este apartado se estudiarán los parámetros de impresión óptimos del estudio de flexión en ensayos de fatiga con el objeto de evaluar su comportamiento comparándolos con los parámetros de impresión del estudio de *Fatiga 2016*.

### 6.2.2. Fenómeno de la fatiga

La fatiga en los materiales es un fenómeno que ocurre cuando los materiales son expuestos a ciclos de carga dinámicos, provocando tensiones en el material de forma alternativa en el tiempo. De manera simplificada, podríamos decir que, los esfuerzos debilitarán la pieza hasta que en la estructura interna o el acabado aparezca una pequeña grieta que se propage por toda la sección resistente del material. Es en este momento cuando se produce la rotura de la pieza.

La importancia de este fenómeno recae en que las piezas que lo sufren, se acaban rompiendo bajo un esfuerzo mucho menor del que podrían soportar con cargas estáticas. La fatiga debilita las piezas con el tiempo, por lo que pierden resistencia hasta que rompen bajo esfuerzos relativamente pequeños.

### 6.2.3. Ensayo de fatiga

Para estudiar este fenómeno se utiliza el test de fatiga de flexión rotatorio. Este test, consiste en aplicar un momento sobre una probeta circular de dimensiones conocidas que rota sobre su propio eje. De esta manera se generan esfuerzos de tracción y compresión alternativos en las fibras externas en cada rotación (figura 6.4).

La vida o resistencia a fatiga es igual al número de rotaciones que la probeta hace soportando la carga sin presentar rotura en sus fibras.

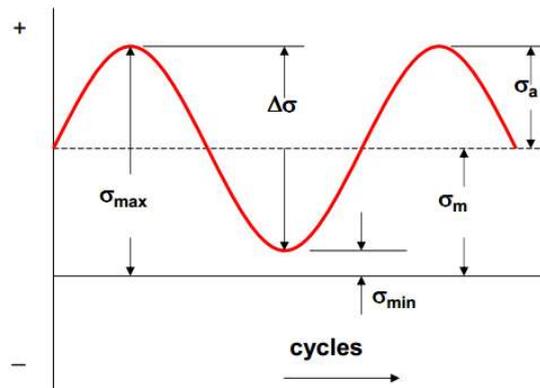


Figura 6.4. Tensiones alternativas. Fuente: [www.pricoltech.com](http://www.pricoltech.com)

#### 6.2.4.1 Probetas

El ensayo consistirá en imprimir probetas cilíndricas como la que se muestra en la figura 6.5.

Para la fabricación de las probetas de fatiga, se ha utilizado el mismo modelo de impresora 3D, *Pyramid3Dstudio*.

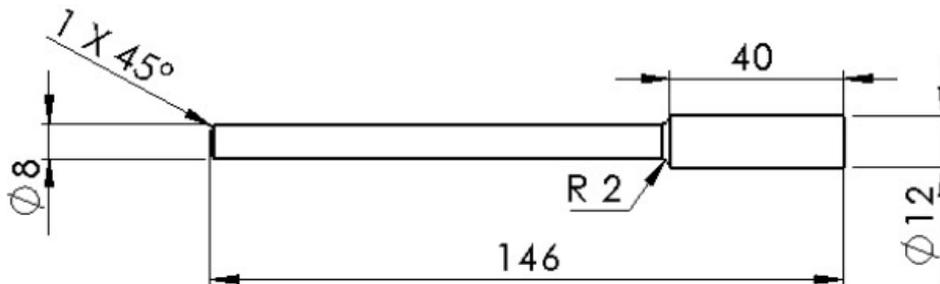


Figura 6.5. Dimensiones de las probetas para el ensayo de fatiga.

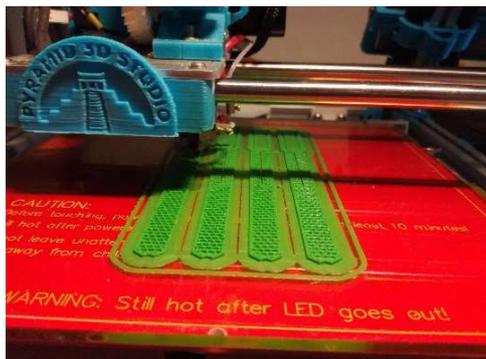


Figura 6.6. Proceso de impresión.

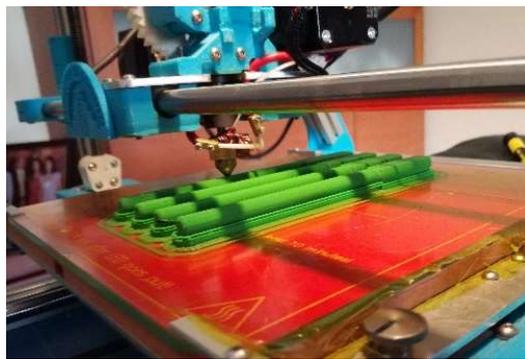


Figura 6.7. Figura 6.8. Proceso de impresión.

#### 6.2.4.2. Máquina de fatiga

El equipo utilizado para los ensayos de fatiga es una maquina rotativa GUN WP 140. El equipo está formado por un motor eléctrico asíncrono de 2 pares de polos, que gira a una velocidad nominal de 2800 RPM. La carga se aplica a través de un muelle tarado, la lectura de este valor se hace a través de una célula de carga.

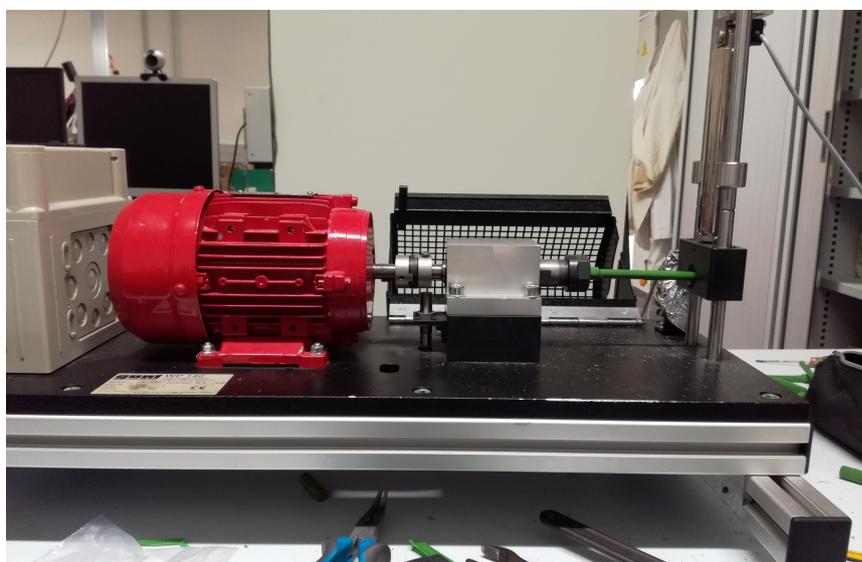


Figura 6.9. Máquina de ensayos de fatiga. Laboratorio de mecánica de EEBE

La carga aplicada en el extremo provocará un momento flector creciente, en dirección a la sujeción de la probeta.

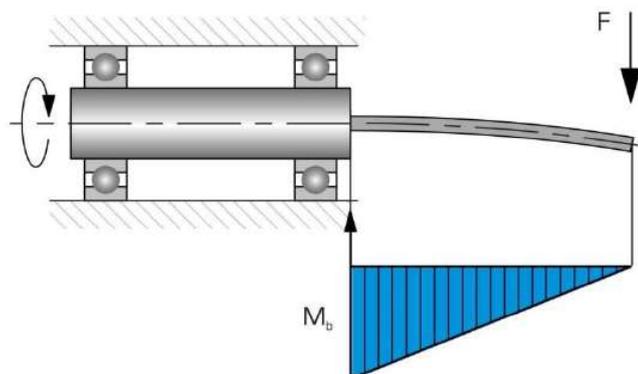


Figura 6.10. Esquema del funcionamiento de la máquina de ensayos de fatiga.  
Fuente: Otero, J.

#### 6.2.4.3. Metodología

Para conocer el comportamiento de las probetas de resistencia a fatiga se aplican seis niveles de carga, de entre 10 N y 22 N, se hace girar la probeta y se cuentan los ciclos (rotaciones de la probeta) hasta que ocurre la falla en el material. Los valores de carga provocan un esfuerzo flector que genera en tensiones de compresión y tracción en las fibras de la probeta, las cuales debilitan la probeta en cada ciclo.

Los niveles de carga escogidos, son los mismos que en el estudio anterior de *Fatiga 2016*. Para que los resultados sean comparables con nuestro estudio, se aplican los mismos valores de la tabla 6.8.

Tabla 6.8. Niveles de fuerza aplicada.

Fuerza (N)
22
20
18
15
13
10

Con los resultados se creará la curva de S-N (figura 6.11), y la curva de *Wöhler* (figura 6.12) correlacionando los valores de tensiones alternas con el número de ciclos asociado al fallo.

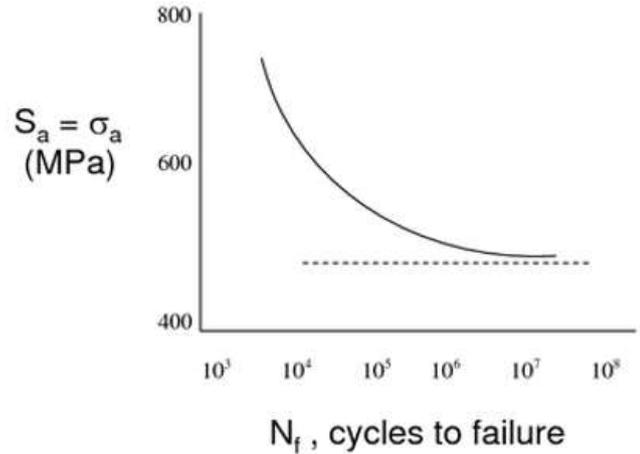


Figura 6.11. Curva S-N, tensión respecto número de ciclos .Fuente: [www.pricoltech.com](http://www.pricoltech.com)

La curva de Wöhler se grafica aplicando escalas logarítmicas, para poder diferenciar dos zonas de comportamiento.

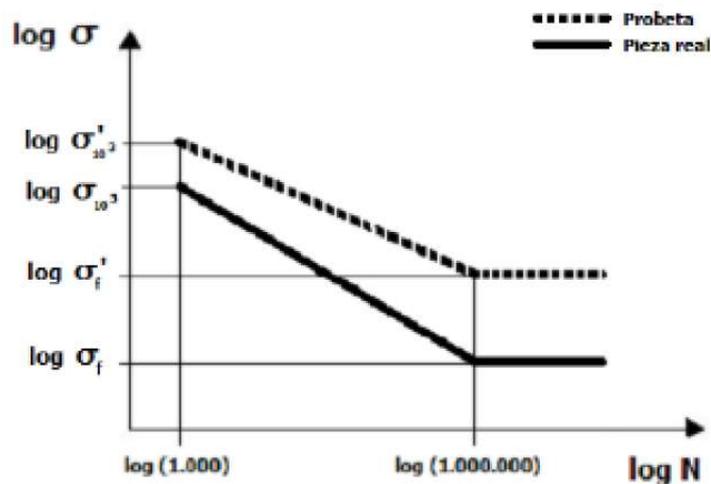


Figura 6.12. Curva de Wohler. Fuente: [www.comsol.com/blogs/fatigue](http://www.comsol.com/blogs/fatigue).

- En el punto inicial de la primera zona, correspondiente entre los 1.000 y 1.000.000 de ciclos, la tensión soportada es un 90% de la tensión máxima del material ( $\log(10^3)$ ,  $\sigma'$ ). En el punto final, correspondiente a 1.000.000 de ciclos la tensión es igual a la tensión límite de fatiga del material ( $\log(10^6)$ ,  $\sigma'_f$ ).
- La segunda zona, referida a la recta horizontal, que se inicia en 1.000.000, ( $\log(10^6)$ ,  $\sigma'_f$ ) y no tiene fin, corresponde a la vida infinita, o de no afectación de la fatiga.

La conclusión más evidente es que cuando menor es la tensión sufrida por el material, mayor es la vida a fatiga. Además, si el valor de tensión es inferior a la tensión límite de fatiga, el material no romperá nunca, no sufrirá fatiga.

La ecuación que grafica la curva de *Wöhler* con escala logarítmica es la siguiente:

$$\log \sigma = -\frac{1}{3} \log \left( \frac{\sigma'_{10^3}}{\sigma'_f} \right) \log N + \log \left( \frac{(\sigma'_{10^3})^2}{\sigma'_f} \right) \quad (6)$$

$\sigma'_{10^3}$  = Tensión a  $10^3$  ciclos

$\sigma'_f$  = Tensión límite de fatiga

$N$  = Número de ciclos

El límite de fatiga teórico  $\sigma'_f$  decrece notablemente si se tienen en cuenta las siguientes características de la pieza real:

- Acabado superficial
- Tamaño
- Tipo de carga
- Temperatura
- Confiabilidad
- Reducción de la sección resistente

Cada una de las características corresponde a los factores ( $k_n$ ) ordenados respectivamente.

$$\sigma_f = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot \frac{1}{K_f} \cdot \sigma'_f \quad (7)$$

Debido a las características de las probetas de estudio, el único factor que se tendrá en cuenta es  $k_f$ . Este factor depende de la reducción de la sección y del radio de redondeo en este punto. En el caso de estudio, la reducción es de 12 mm a 8 mm con un radio de redondeo de 2 mm.

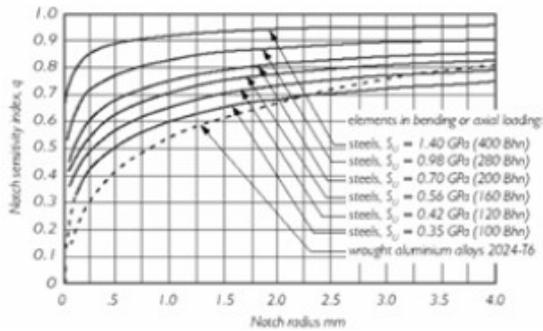


Figura 6.13. Factor  $q$  respecto del radio de redondeo y el material.

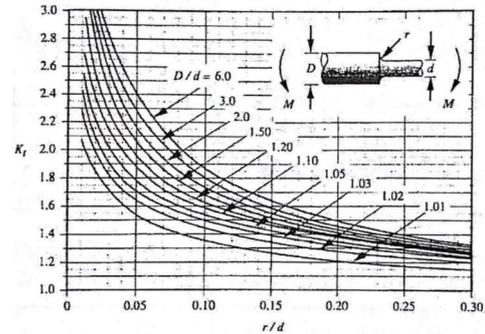


Figura 6.14. Factor  $K_t$  respecto el cambio de sección.

Con el gráfico de la figura 6.13 se encuentra el factor  $q$ . Conociendo el radio de redondeo en el cambio de sección y con el gráfico de la figura 6.14 se encuentra el factor  $K_t$  conociendo el cambio de sección.

Con estos parámetros se procede, a calcular el factor  $K_f$  con la ecuación siguiente:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0.3(1,3411 - 1) = 1,1023 \quad (8)$$

Donde:

$q$  = factor ratio material radio de redondeo

$K_t$  = factor radio de redondeo respecto cambio de sección

$K_f$  = factor de entalla.

Por otro lado, la sección crítica (justo donde empieza el cambio de sección), tiene una área total de  $53.75 \text{ mm}^2$ , y una área de resistente de  $42,36 \text{ mm}^2$  debido a que la pieza no es totalmente maciza, sino que tiene un 75% de densidad.

Se ha considerado que la inercia de la sección es equivalente a una sección circular maciza de  $42,36 \text{ mm}^2$ .

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{resistente}}{\pi}} = 7,345 \text{ mm} \quad (9)$$

Donde:

$A_{resistente}$  = Área de la sección resistente (mm<sup>2</sup>)

$D_{eq}$  = Diámetro eq a sección resistente (mm)

Por lo tanto la inercia se describe como:

$$I_x = \pi \cdot \frac{D_{eq}^4}{64} \quad (10)$$

Donde:

$I_x$  = Inercia de la sección resistente (mm<sup>4</sup>)

La tensión máxima se produce en las fibras exteriores de la probeta donde se maximiza el efecto del momento flector. El efecto cortante se considera despreciable debido a que las tensiones generadas son muy bajas respecto a las generadas por el momento flector.

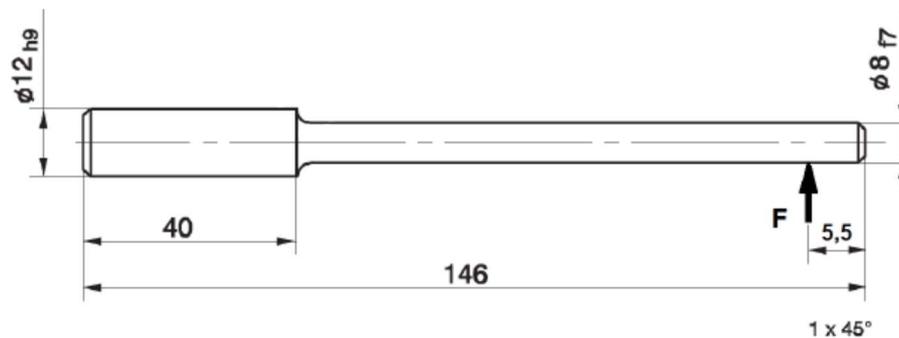


Figura 6.15. Dimensiones de la probeta y aplicación de la carga. Fuente: Otero. J

La carga se aplica a 100,5 mm de distancia respecto a la sección crítica.

El momento aplicado es igual a:

$$M_f = 0,1005 \cdot F \quad (11)$$

Donde:

$M_f$  = Momento flector (N·mm)

Finalmente se llega a la ecuación:

$$\sigma_{m\acute{a}x} (kPa) = K_f \cdot \frac{M_f \cdot y_{m\acute{a}x}}{I_x} = 3,5828 \cdot F \quad (12)$$

Donde:

$y_{m\acute{a}x}$  = Distancia entre la fibra externa y fibra neutra (mm)

Los cálculos mostrados, resultan en la conversión de los niveles de fuerza a niveles de tensión máxima. Se aplicarán en el ensayo de fatiga.

Tabla 6.9. Niveles de fuerza y tensión en el ensayo de fatiga.

Fuerza (N)	$M_{m\acute{a}x}$ (N·mm)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ Tensión máxima (MPa)
22	1040	78,8
20	1352	71,7
18	1560	64,5
15	1872	53,7
13	2080	46,6
10	2288	35,8

#### 6.2.4. Comparación de los resultados.

Los resultados de las dos combinaciones a resistencia a la fatiga, se muestran en las curvas características siguientes:

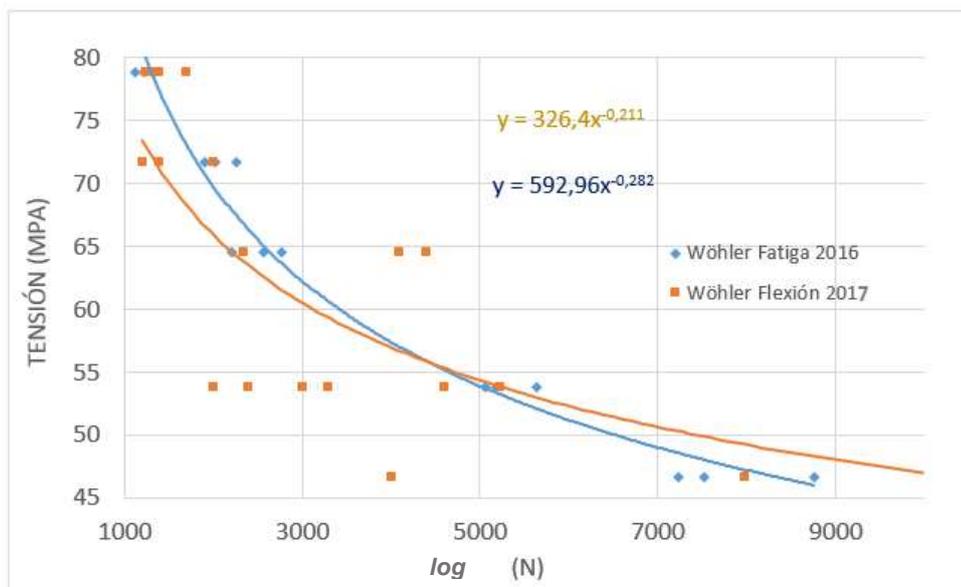


Figura 6.16. Curva SN, de la combinación Fatiga 2016 y Flexión.

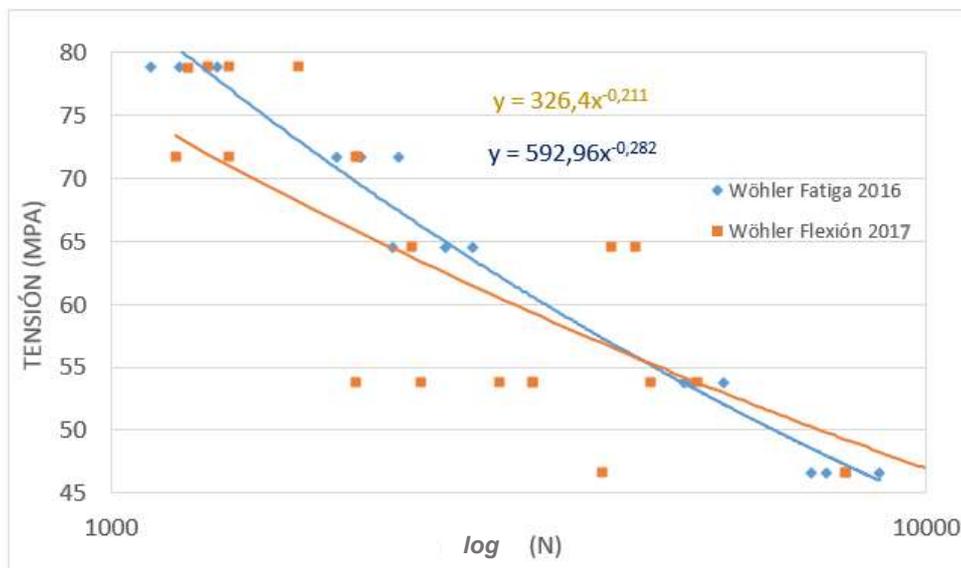


Figura 6.17. Curva de Wöhler, de la combinación Fatiga 2016 y Flexión.

Las dos combinaciones de parámetros muestran comportamientos diferentes respecto a la resistencia a fatiga.

Las curvas de combinaciones óptimas de impresión se cruzan en los gráficos. La curva con combinación de parámetros *Fatiga 2016* muestra más resistencia a ciclos bajos, mientras la curva con combinación *Flexión 2017* muestra mayor resistencia a ciclos altos. El parámetro que marca más la diferencia entre ambas combinaciones de parámetros es la altura de capa, siendo 0,1 mm para *Flexión 2017* y 0,3 mm para *Fatiga 2016*. Parece ser, que hay una relación entre los supuestos siguientes: cuando hay una altura de capa grande mejora la resistencia a ciclos bajos y cuando hay una altura de capa pequeña mejora la resistencia a ciclos altos.

## 7. Conclusiones

A continuación se enuncian las conclusiones finales que se han deducido a lo largo de este proyecto:

### Respecto a los parámetros:

- La orientación de apilamiento de capas es el parámetro más influyente en la rigidez, en la resistencia a la flexión y en la deformación máxima.
- La orientación no ha tenido significancia en la densidad.
- La altura de capa y la anchura de hilo han tenido una notable significancia en la rigidez y en la resistencia a la flexión y ninguna influencia en la deformación máxima. En cambio, en la densidad, solo ha influido la altura de capa de una manera notable.
- La velocidad ha tenido un efecto pequeño, aunque significativo en la rigidez y en la resistencia a la flexión y ninguna influencia en la deformación máxima ni en la densidad.
- La densidad y el patrón de relleno no han tenido ningún efecto en las propiedades mecánicas estudiadas.
- La orientación de apilamiento de capas en canto (y), la altura de capa de 0,1mm, la anchura de hilo de 0,6mm y la velocidad de impresión de 20 mm/min, ha sido la combinación óptima obtenida que permitirá maximizar la rigidez y la resistencia a flexión.
- La orientación dirección Canto (Y) ha demostrado el mejor comportamiento mecánico debido a que su resistencia depende de la fuerte unión intracapa.
- Las anchura de hilo grande, la altura de capa pequeña y la velocidad baja, han formado probetas con mejor compactación, mejor soldadura entre hilos, generando una mejor rigidez y resistencia a flexión.

## Respecto a la validación de la combinación óptima de parámetros de los estudios comparados:

### Ensayos a flexión:

- Las propiedades mecánicas obtenidas con los parámetros en los ensayos de flexión de este estudio han sido superiores a las obtenidas con los parámetros de fatiga del estudio anterior, obteniendo un incremento de rigidez del 16,8% superior, una mejora del límite elástico del 20,5% y un aumento de la tensión máxima del 29,3%.
- El incremento de las propiedades se debe a la compactibilidad de los hilos, especialmente en las capas exteriores. Mayor compactibilidad implica una mayor área resistente en las probetas.
- Se valida que las alturas de capa más pequeñas mejoran la compactación de los hilos, incrementando la superficie de soldadura.
- La diferencia de compactación y de superficie de soldadura determina el modo de fallo. Las probetas que fallan por laminación son menos resistentes que las que fallan por rotura de fibras.

### Ensayos de fatiga:

- Las dos combinaciones de parámetros muestran comportamientos diferentes respecto a la resistencia a fatiga.
- La curva con combinación de parámetros *Fatiga 2016* con altura de capa grande muestra más resistencia a ciclos bajos. La curva con combinación de parámetros *Flexión 2017* con altura de capa pequeña muestra mayor resistencia a ciclos altos.

## 8. Prospectiva y trabajos futuros

El presente proyecto forma parte de la línea de investigación del grupo DEFAM, donde se desarrolla un proyecto global sobre estudio del efecto de los parámetros de impresión en las propiedades mecánicas de piezas fabricadas por FDM.

Con el objetivo de continuar con la línea de investigación se volverá a realizar una validación de la combinación de parámetros óptima conseguida en este proyecto mediante la comparación de resultados.

Paralelamente a este trabajo, otro estudio está analizando los parámetros de impresión con ensayos de tracción.

Cuando se hayan finalizado los ensayos a tracción, se cruzaran ambos estudios: tracción y flexión, para conocer la mejor combinación de parámetros que puedan maximizar la resistencia y rigidez del material.

Finalmente, cuando se termine este último estudio, se efectuará un estudio global que permitirá averiguar el modelo de comportamiento de las piezas impresas frente a los diferentes tipos de carga, flexión, fatiga, tracción, etc. Los resultados que se obtengan del estudio global podrán aplicarse en la fabricación de piezas para optimizar su rendimiento.

ACTIVIDAD	INICIO	DURACIÓN	Set 17	Oct 17	Nov 17	Dic 17	En 17
Preparación	1	2	█				
Propósito y justificación	1	1	█				
Objetivos	1	1	█				
Alcance	1	1	█				
Descripción del proyecto	1	1	█				
Elaboración del presupuesto	1	1	█				
Diseño del experimento	2	1		█			
Fabricación de las probetas	2	1		█			
Preparación del equipo de ensayos	2	1		█			
Preparación del procesado de datos	2	1		█			
Simulacros de ensayos	2	1		█			
Realización experimentos	3	1			█		
Realización experimentos	3	1			█		
Procesado de datos	4	1				█	
Toma de fotografías con microscopio	4	1				█	
Explotación	4	1					█
Discusión de resultados	4	1					█
Planificación trabajo futuro	4	1					█
Entrega del proyecto	4	1					█

## 9. Bibliografía

Ajoku, U., Saleh, N., Hopkinson, N., Hague, R., and Erasenthiran, P. (2006), "Investigating mechanical anisotropy and end-of-vector effect in laser-sintered nylon parts", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220 No. 7, pp. 1077-1086

Domingo-Espin, M., Puigoriol-Forcada, J.M., Garcia-Granada, A.A., Llumà, J., Borros, S., and Reyes, G. (2015), "Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts", *Materials & Design*, Vol. 83, pp. 670-677.

Bellehumeur, C., Li, L., Sun, Q., and Gu, P. (2004), "Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 6 No. 2, pp. 170-178.

Fontrodona, J y Blanco, R. "Estado actual y perspectivas de la impresión en 3D" Barcelona, diciembre de 2014. Departamento de Empresa y Empleo Generalitat de Catalunya [Consulta: 23 mayo 2017]. Disponible en: [http://empresa.gencat.cat/web/.content/19\\_industria/documents/economia\\_industrial/impressio3d\\_es.pdf](http://empresa.gencat.cat/web/.content/19_industria/documents/economia_industrial/impressio3d_es.pdf)

Gurralla Regalla S. "Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling. Virtual and Physical Prototyping". 2014;9(3):141-149. doi:10.1080/17452759.2014.913400.

Gray, R.W., Baird, D.G. and Helge Bøhn, J. (1998), "Effects of processing conditions on short TLCP fiber reinforced FDM parts", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 4 No. 1, pp. 14-25.

Hubscher, B. Open for Business: 3-D Printer Creates First Object in Space on International Space Station. Noviembre 2014. Actualizado 31 julio 2015. [Consulta: 7 mayo 2017]. Disponible en: <https://www.nasa.gov/content/open-for-business-3-d-printer-creates-first-object-in-space-on-international-space-station/>

- Hodgson, G. "Slic3r Manual - Infill Patterns and Density. Manualslic3rorg" .2016. [Consulta: 21 mayo 2017]. Disponible en: <http://manual.slic3r.org/expert-mode/infill>
- Kellner, T. "Jet Engine With 3D-Printed Parts Powers Next-Gen Boeing 737 MAX For The First Time". Febrero 2016. [Consulta: 7 mayo 2017]. Disponible en: <http://www.gereports.com/jet-engine-with-3d-printed-parts-powers-next-en-boeing-737-max-for-the-first-time/>
- Kira. "Japanese medical insurance to cover cost of 3D printed organ models" Enero 2016. [Consulta: 15 mayo 2017]. Disponible en: <http://www.3ders.org/articles/20160127-japanese-medical-insurance-to-cover-cost-of-3d-printed-organ-models.html>
- Olivier, D., Travieso-Rodríguez, J. A., Borros, S., Reyes, G. and Jerez-Mesa, R. (2017), "Influence of building orientation on the flexural strength of laminated object manufacturing specimens", *Journal of mechanical science and technology*, Vol. 31 No. 1, pp. 133-139.
- Quintana, R., Choi, J.W., Puebla, K. and Wicker, R. (2010), "Effects of build orientation on tensile strength for stereolithography-manufactured ASTM D-638 type I specimens", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46 No. 1, pp. 201-215.
- Sood, A.K., Ohdar, R.K. and Mahapatra, S.S. (2010), "Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts", *Materials and Design*, Vol. 31 No. 1, pp. 287-295.
- Wang, T., Xi, J. and Jin, Y. (2007), "A model research for prototype warp deformation in the FDM process", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 33 No. 11, pp. 1087-1096.
- Zhong, W., Li, F., Zhang, Z., Song, L. and Li, Z. (2001), "Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 301 No. 2, pp. 125-130.

## 10. Anexo

### I: Presupuesto

En el siguiente presupuesto se ha tenido en cuenta el coste de los:

- Recursos materiales empleados
  - PLA consumido en el estudio
  - Recambios de piezas estropeadas
- Recursos técnicos
  - Maquinaria e instrumentación
  - Programas informáticos (software)
  - Energía
- Recursos humanos
  - Ingeniero
  - Técnico superior

Para realizar este proyecto de ingeniería se han tenido que realizar diferentes tareas, tanto previas al estudio como posteriores al mismo.

El tiempo que se ha empleado desde la concepción del proyecto hasta el inicio del diseño de éste, no puede concretarse de manera exacta ni tenerse en cuenta en el presupuesto ya que forma parte del objetivo y motivación que ha permitido llevarlo a cabo.

El resto del proyecto se presupuestará y se dividirá en cinco partidas relacionadas directamente con los procesos o fases de desarrollo del mismo.

Partidas:

- a) Diseño del ensayo
- b) Fabricación de probetas
- c) Preparación de maquinaria, instrumentación y simulacros de ensayo
- d) Realización de experimentos
- e) Procesado y discusión de resultados

El coste de material, maquinaria, energía y mano de obra se ha valorado con los impuestos incluidos.

Tabla 10.1. Diseño del ensayo.

Descripción	Recursos	Horas	€/h	Coste (€)
Elección de los parámetros	Horas ingeniero	12	20,00	240,00
	Software Excel	8	0,75	6,00
Preparación de las matrices	Ordenador 4 Core 3,40 GHz	8	2,00	16,00
	<b>Total</b>			<b>262,00</b>

Tabla 10.2. Fabricación de probetas

Descripción	Recursos	Material Energía Tiempo	Material Energía Tiempo (€)	Coste €
188 Probetas Precio material <b>27 €/ Kg PLA</b> Tiempo fabricación <b>0,3 h/probeta flexión</b> <b>2,75 h/probeta fatiga</b>	108 (ensayo flexión) 3,15 g/u*	0,876 Kg  148,4 h	27 €/ Kg PLA  (contabilizado en impresora 3D)	23,65  -----
	32 (ensayo fatiga) 10,25 g/u*			
	8 (validación flexión) 3,15 g/u*			
	20 (flexión pruebas previas) 3,15g/u*			
	12 (flexión invalidadas) 3,15 g/u*			
	8 (fatiga invalidadas) 10,25 g/u*			
	Boquillas de extrusión	3 u	6	18,00
	Impresora 3D	148,4 h	3	445,20
Energía	Consumo medio <b>150 W/h x 148,4 h</b>	22,260 kWh	0.185 €/kWh	4,12
	Horas Técnico	11 h	8	88,00
<b>Total</b>				<b>578,97</b>

\*Promedio de la masa de las probetas

Tabla 10.3. Preparación de maquinaria, instrumentación y simulacros de ensayo

Descripción	Material Energía Tiempo	Material Energía Tiempo (€)	Coste €
Maquinaria – Instrumentación Prensa – Equipo fotográfico – Galga extensiométrica (incluido coste energía)	15 h	15,00	225,00
Software y creación de plantilla	Matlab - Excel	(contabilizado en la partida de procesado de datos)	
Hardware Ordenador 4 Core 3,40 GHz	15 h	2,00	30,00
Horas Ingeniero	15 h	20,00	300,00
<b>Total</b>			<b>555,00</b>

Tabla 10.4. Realización de experimentos

Descripción	Material Energía Tiempo	Material Energía Tiempo (€)	Coste €
Maquinaria – Instrumentación - Flexión	16 h/ flexión	15,00	240,00
Maquinaria – Instrumentación - Fatiga Prensa - Equipo fotográfico – Galga extensiométrica - Microscopio (incluido coste energía)	5 h/ fatiga	15,00	75,00
Software y creación de plantilla	Matlab - Excel	(contabilizado en la partida de procesado de datos)	
Hardware Ordenador 4 Core 3,40 GHz	21 h	2,00	42,00
Horas Técnico 15 h realización experimentos 2 h toma de fotogramas microscopio	17 h	8,00	136,00
<b>Total</b>			<b>493,00</b>

Tabla 10.5. Procesado y discusión de resultados

Descripción	Material Energía Tiempo	Material Energía Tiempo (€)	Coste €
Software y creación de plantilla - Scrip de sincronización - Scrip de flexiones - Scrip de deformaciones - Plantilla Excel de curva d de flexiones	<b>Software</b> Matlab, Excel	24 h	0,75
	<b>Hardware</b> Ordenador 4 Core 3,40 GHz	24 h	2,00
	<b>Horas Ingeniero</b>	24 h	20,00
<b>Total</b>			<b>546,00</b>

Tabla 10.6 presupuesto total del proyecto (impuestos incluidos)

<b>Partida</b>	<b>Presupuesto / Coste €</b>
<b>Diseño del ensayo</b>	262,00
<b>Fabricación de probetas</b>	578,97
<b>Preparación de maquinaria e instrumentación y simulacros</b>	555,00
<b>Realización de experimentos</b>	493,00
<b>Procesado y discusión de resultados</b>	546,00
<b>Total</b>	<b>2.434,97 €</b>

## II: Recopilación fotográfica

### PLA – 0,3 – 0,1 – 25 – 20 – PLANO RECTILÍNEO

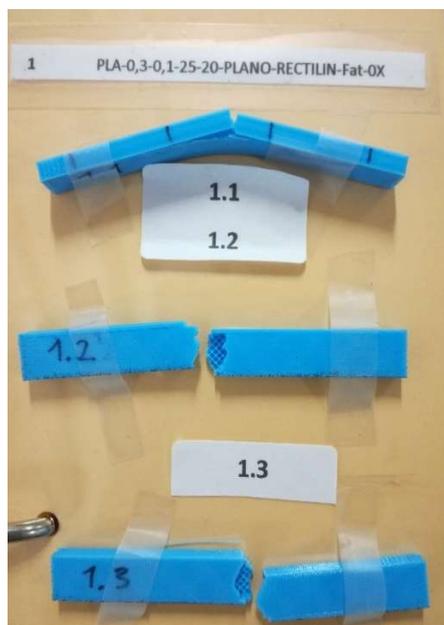


Figura 10.1 Probetas ensayadas

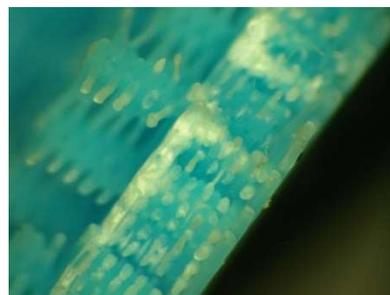


Figura 10.2 Fotografía sección rotura

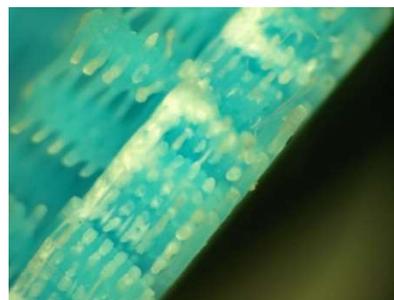


Figura 10.3 Fotografía sección rotura

### PLA – 0,3 – 0,1 – 50 – 300 – PLANO RECTILÍNEO



Figura 10.4 Probetas ensayadas

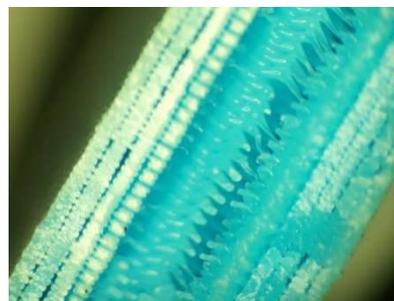


Figura 10.5 Fotografía sección rotura

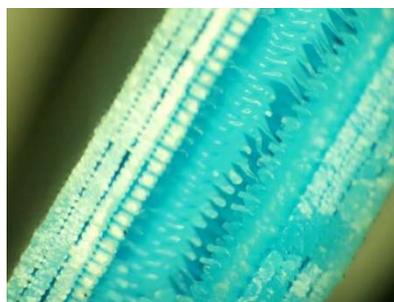


Figura 10.6 Fotografía sección rotura

### PLA – 0,3 – 0,1 – 75 – 40 – VERTICAL- HONEYCOMB

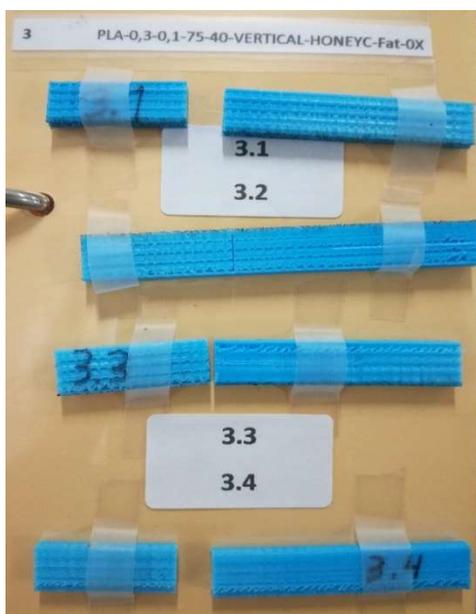


Figura 10.7 Probetas ensayadas

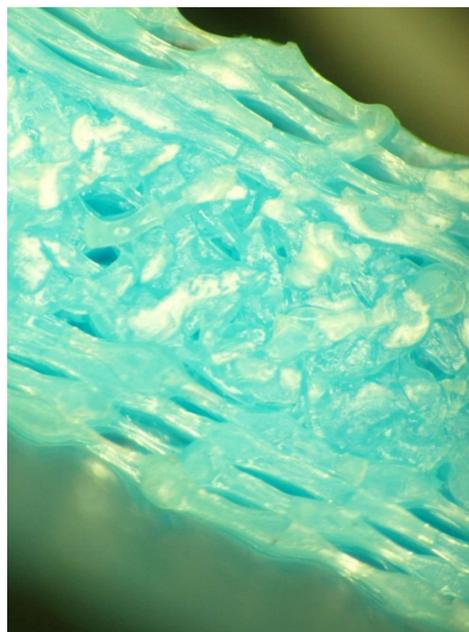


Figura 10.8 Fotografía sección rotura

### PLA – 0,3 – 0,2 – 25 – 30 – CANTO - HONEYCOMB



Figura 10.9 Probetas ensayadas

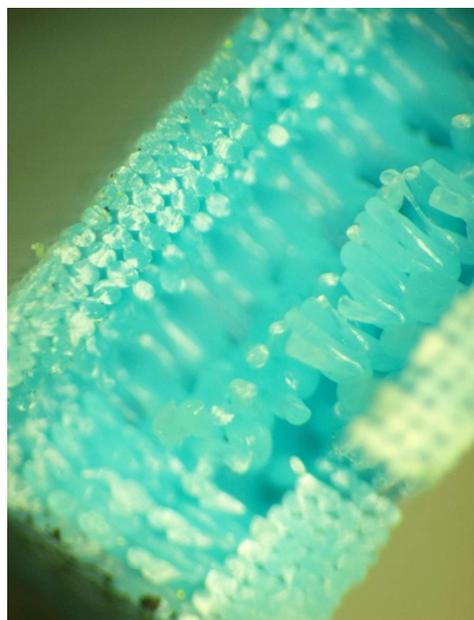


Figura 10.10 Fotografía sección rotura

### PLA – 0,3 – 0,2 – 50 – 40 – VERTICAL- RECTILÍNEO

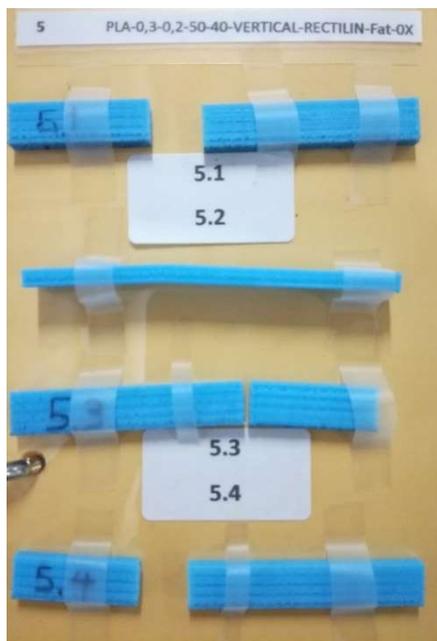


Figura 10.11 Probetas ensayadas

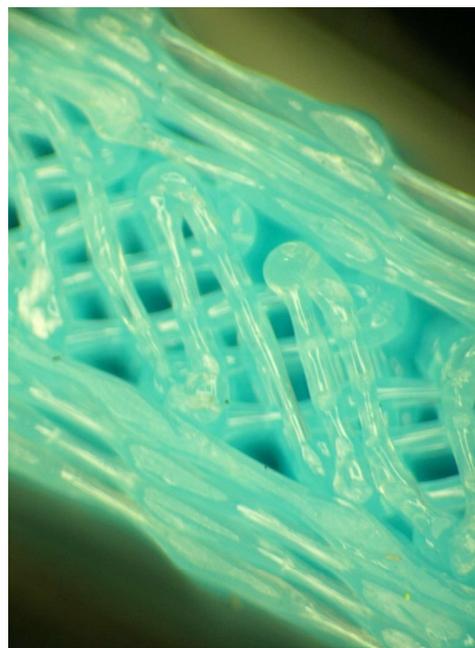


Figura 10.12 Fotografía sección rotura

### PLA – 0,3 – 0,2 – 75 – 20 – PLANO – LINEAR

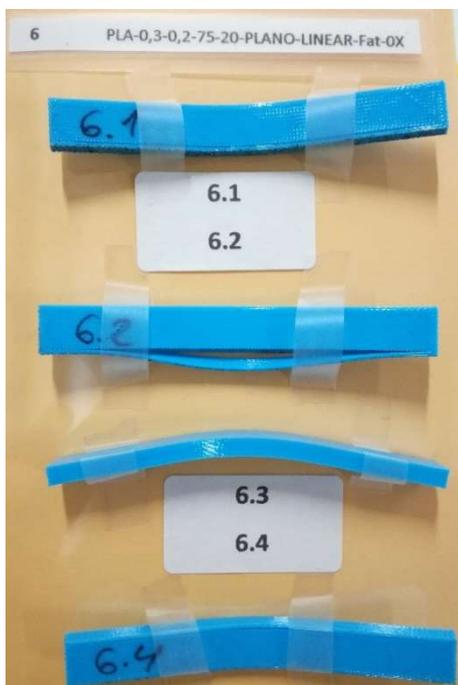


Figura 10.13 Probetas ensayadas

**No rotura**

### PLA – 0,3 – 0,2 – 25 – 40 – VERTICAL- LINEAR

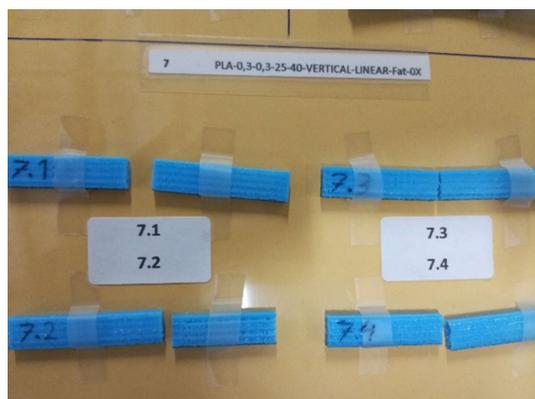


Figura 10.14 Probetas ensayadas

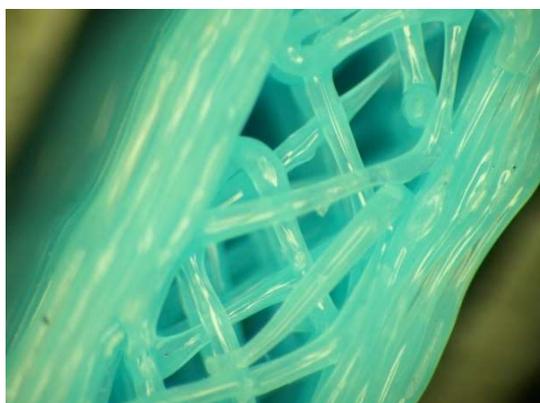


Figura 10.15 Fotografía sección rotura

### PLA – 0,3 – 0,3 – 50 – 20 – PLANO-HONEYCOMB



Figura 10.16 Probetas ensayadas

**No rotura**

### PLA – 0,3 – 0,3 – 75 – 30 – CANTO-RECTILÍNEO



Figura 10.17 Probetas ensayadas

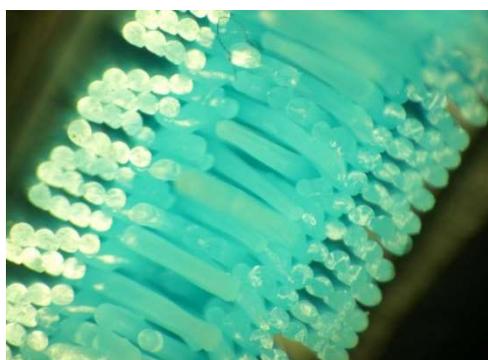


Figura 10.18 Fotografía sección rotura

### PLA – 0,4 – 0,1 – 25 – 30 – VERTICAL- LINEAR

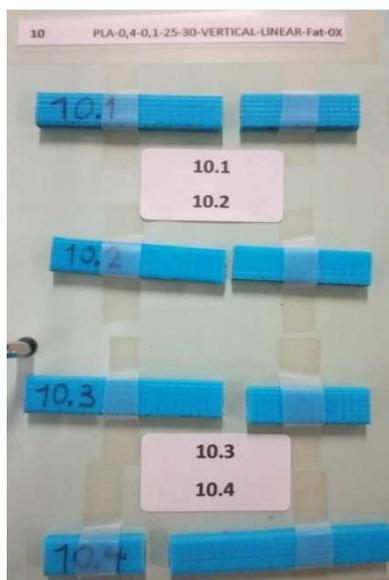


Figura 10.19 Probetas ensayadas

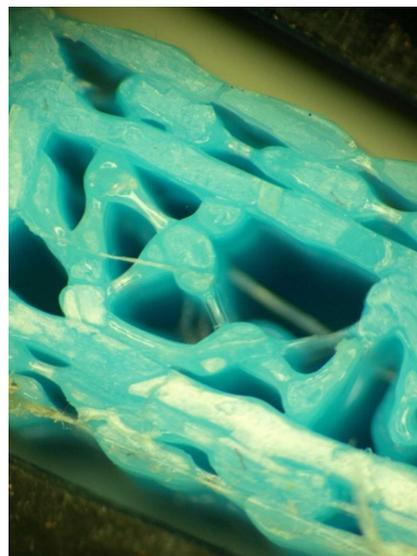


Figura 10.20 Fotografía sección rotura

### PLA – 0,4 – 0,1 – 50 – 40 – PLANO - HONEYCOMB

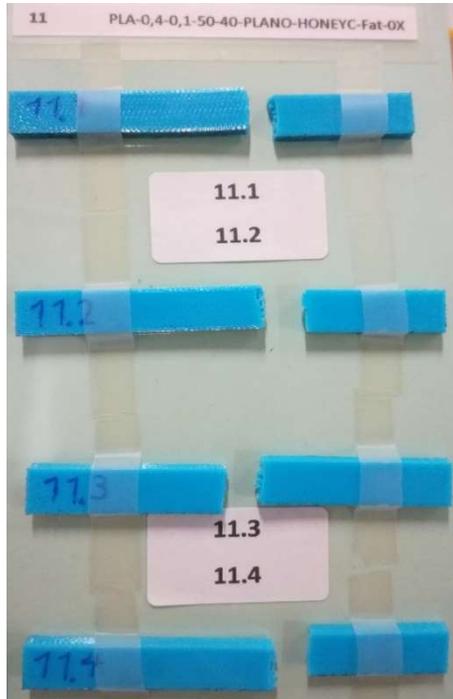


Figura 10.21 Probetas ensayadas

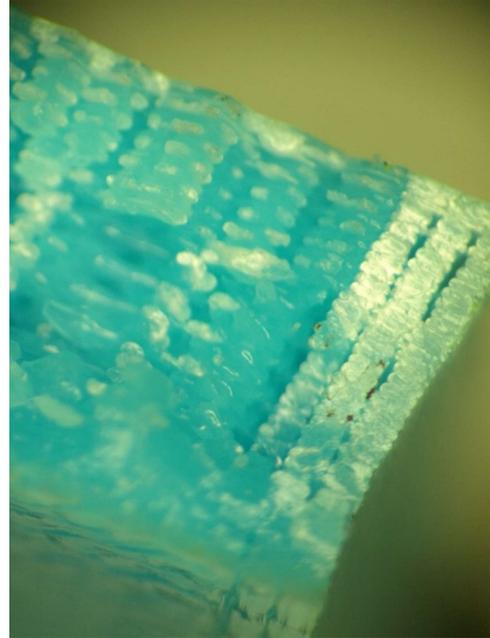


Figura 10.22 Fotografía sección rotura

### PLA – 0,4 – 0,1 – 75 – 20 – CANTO-RECTILÍNEO



Figura 10.23 Probetas ensayadas

**No rotura**

### PLA – 0,4 – 0,2 – 25 – 40 – PLANO- RECTILÍNEO

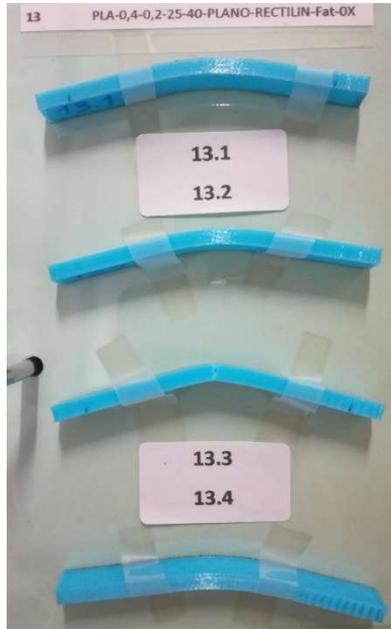


Figura 10.244 Probetas ensayadas

**No rotura**

### PLA – 0,4 – 0,2 – 50 – 20 – CANTO – LINEAR



Figura 10.25 Probetas ensayadas

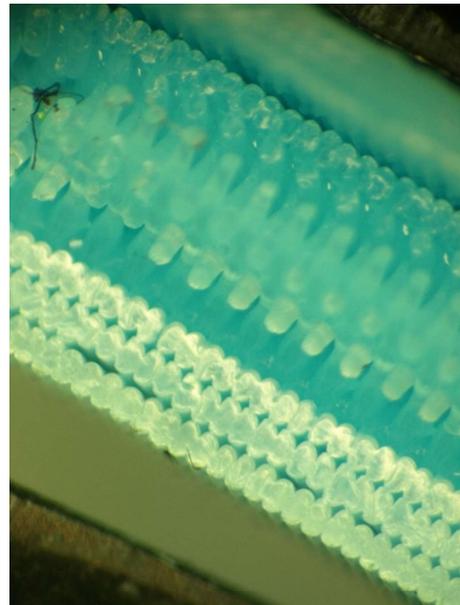


Figura 10.26 Fotografía sección rotura