



**industriales**  
etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Industrial

## Estudio de la resistencia mecánica al impacto de materiales compuestos de grafeno en procesos de fabricación aditiva

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

**Autor:** D. Óscar Victorio Puche  
**Director:** D. Félix Faura Mateu  
**Codirector:** D. Rosendo Zamora Pedreño

Cartagena, 19 de Septiembre de 2018



## Índice

1.	Introducción.....	10
1.1.	Fabricación aditiva: fundamentos.....	10
1.2.	Desarrollo y proceso.....	11
1.3.	<i>Fused Deposition Modelating</i> .....	13
1.3.1.	Definición.....	13
1.3.2.	Evolución histórica.....	13
1.3.3.	Proceso.....	13
1.3.4.	Parámetros de impresión.....	16
1.3.5.	Tipos de materiales usados.....	21
1.3.6.	Ventajas y limitaciones del proceso <i>FDM</i> .....	21
1.4.	Otros procesos.....	22
1.4.1.	<i>Estereolitografía</i> .....	22
1.4.2.	<i>Binder Jetting</i> .....	23
1.4.3.	<i>Polyjet 3D</i> .....	25
1.4.4.	<i>LOM</i> .....	26
1.4.5.	<i>Sinterización Selectiva por Láser</i> .....	27
1.4.6.	<i>Direct Metal Deposition</i> .....	28
1.5.	Objetivos y planificación del TFG.....	29
2.	Metodología del TFG.....	31
2.1.	Material.....	31
2.2.	Software.....	32
2.3.	Equipos.....	35
2.4.	Resiliencia.....	39
2.5.	Ensayo.....	41
2.5.1.	Probeta.....	41
2.5.2.	Cálculo de la resiliencia.....	43
2.6.	Organización estudio.....	43
2.6.1.	Porcentaje de relleno.....	43
2.6.2.	Ángulo de tramado.....	44
2.6.3.	Número de perímetros.....	45
2.6.4.	Parámetros fijos.....	45
2.6.5.	Organización definitiva del ensayo.....	46

3.	Resultados y discusión. ....	48
3.1.	Influencia del porcentaje de relleno. ....	49
3.2.	Influencia del número de perímetros. ....	51
3.3.	Influencia del ángulo de tramado. ....	60
3.4.	Relación variables de impresión-tiempo. ....	67
3.4.1.	Porcentaje de relleno-tiempo. ....	68
3.4.2.	Número de perímetros-tiempo. ....	70
3.4.3.	Ángulo de tramado-tiempo. ....	73
3.5.	Relación entre el tiempo y la masa estimados por <i>Simplify 3D</i> y sus valores reales. ....	75
3.6.	Estudio técnico-económico del proyecto. ....	77
3.7.	Discusión sobre una posible combinación de parámetros que maximice la rentabilidad del proceso. ....	79
3.7.1.	Relación $\eta$ -porcentaje de relleno. ....	79
3.7.2.	Relación $\eta$ -número de perímetros. ....	81
3.7.3.	Relación $\eta$ -ángulo de tramado. ....	84
3.8.	Comparación con otros ensayos: Estudio del material. ....	87
4.	Conclusiones. ....	90
4.1.	Influencia de los parámetros en la resiliencia. ....	90
4.2.	Influencia de los parámetros en el tiempo de impresión. ....	90
4.3.	Comprobación de las estimaciones de <i>Simplify 3D</i> y estudio técnico-económico. ....	91
4.4.	Optimización de la rentabilidad del proceso. ....	91
4.5.	Comparación del material. ....	91
4.6.	Estudios futuros. ....	92
5.	Bibliografía. ....	94

## Índice de figuras.

Figura 1-1. Implante realizado mediante fabricación aditiva [20].	10
Figura 1-2. Etapas de diseño de un objeto obtenido por fabricación aditiva [3].	11
Figura 1-3. Diferentes pesos del archivo STL según la resolución del mallado [4].	12
Figura 1-4. Impresora <i>LEMONBOT</i> .	12
Figura 1-5. Esquema de funcionamiento <i>FDM</i> [22].	14
Figura 1-6. Zonas del cabezal o extrusor [23].	16
Figura 1-7. Diferentes patrones de relleno [24].	16
Figura 1-8. Ángulo de tramado 0°.	17
Figura 1-9. Diferentes porcentajes de relleno [25].	17
Figura 1-10. Detalle del número de perímetros (2 perímetros).	18
Figura 1-11. Detalle del número de perímetros (3 perímetros).	18
Figura 1-12. Detalle de la altura de capa [26].	19
Figura 1-13. Detalle de capa sólida superior.	19
Figura 1-14. Pieza con material de soporte [27].	20
Figura 1-15. Bobinas de material para impresión 3D [28].	21
Figura 1-16. Esquema de proceso de <i>estereolitografía</i> [29].	22
Figura 1-17. Fabricación de un objeto mediante <i>estereolitografía</i> [7].	23
Figura 1-18. Esquema de proceso de <i>Binder Jetting</i> [30].	24
Figura 1-19. Cobre en polvo para procesar mediante <i>Binder Jetting</i> [31].	25
Figura 1-20. Esquema de proceso <i>Polyjet 3D</i> [32].	26
Figura 1-21. Esquema de proceso <i>LOM</i> [13].	27
Figura 1-22. Esquema de proceso <i>SLS</i> [33].	27
Figura 1-23. Esquema de proceso <i>DMD</i> [34].	28
Figura 2-1. Bobina de <i>Grafylon 3D</i> [14].	31
Figura 2-2. Características de la bobina de <i>Grafylon 3D</i> [14].	32
Figura 2-3. Portada del software de diseño <i>SolidWorks</i> [35].	33
Figura 2-4. Entorno de diseño de <i>SolidWorks</i> [17].	33
Figura 2-5. Entorno gráfico de <i>Simplify 3D</i> .	34
Figura 2-6. Estimaciones realizadas por <i>Simplify 3D</i> .	34
Figura 2-7. Detalle de falda en la simulación de <i>Simplify 3D</i> .	35
Figura 2-8. Báscula de precisión del departamento de Fabricación de la UPCT.	36
Figura 2-9. Características técnicas de la impresora <i>LEMONBOT</i> [18].	37
Figura 2-10. Interior de la impresora <i>LEMONBOT</i> .	38
Figura 2-11. Zona de colocación de la bobina de material en la impresora <i>LEMONBOT</i> .	38
Figura 2-12. Péndulo <i>Zwick Roell 5113E</i> perteneciente a la UPCT.	39
Figura 2-13. Curva tensión deformación [15].	40
Figura 2-14. Tipos de probetas y dimensiones [16].	41
Figura 2-15. Dimensiones de la probeta según si tiene entalla o no [16].	41
Figura 2-16. Tipo de probeta utilizada en este estudio [16].	42
Figura 3-1. Valores de "k" para aplicación del criterio de rechazo de <i>Chauvenet</i> [36].	48
Figura 3-2. 40%2p45.	49

Figura 3-3. 60% 1p45. ....	49
Figura 3-4. 80% 1p45. ....	49
Figura 3-5. Resiliencia en función del porcentaje de relleno. ....	50
Figura 3-6. Gráfica Resiliencia- Porcentaje de relleno.....	51
Figura 3-7. Detalle de probeta con un perímetro.....	52
Figura 3-8. 60% 1p0. ....	52
Figura 3-9. Detalle de probeta con 2 perímetros. ....	52
Figura 3-10. 60% 2p0. ....	52
Figura 3-11. Detalle de probeta con 3 perímetros. ....	52
Figura 3-12. 60% 3p0. ....	53
Figura 3-13. Resiliencia en función del número de perímetros con 60% de relleno y ángulo 0°.....	53
Figura 3-14. Resiliencia en función del número de perímetros con 60% de relleno y ángulo 23°.....	53
Figura 3-15. Resiliencia en función del número de perímetros con 60% de relleno y ángulo 45°.....	54
Figura 3-16. Resiliencia en función del número de perímetros con 60% de relleno y ángulo 68°.....	54
Figura 3-17. Resiliencia en función del número de perímetros con 60% de relleno y ángulo 90°.....	55
Figura 3-18. Influencia del número de perímetros con ángulo de tramado 0° y 60% de relleno. ....	56
Figura 3-19. Influencia del número de perímetros con ángulo de tramado 23° y 60% de relleno. ....	56
Figura 3-20. Influencia del número de perímetros con ángulo de tramado 45° y 60% de relleno. ....	57
Figura 3-21. Influencia del número de perímetros con ángulo de tramado 68° y 60% de relleno. ....	57
Figura 3-22. Influencia del número de perímetro con ángulo de tramado 90° y 60% de relleno. ....	58
Figura 3-23. Representación conjunta de los resultados del estudio resiliencia-número de perímetros. ....	59
Figura 3-24. Resiliencia en función del ángulo de tramado con 60% de relleno y 1 perímetro.....	60
Figura 3-25. Resiliencia en función del ángulo de tramado con 60% de relleno y 2 perímetros. ....	61
Figura 3-26. Resiliencia en función del ángulo de tramado con 60% de relleno y 3 perímetros. ....	61
Figura 3-27. 60% 1p0. ....	62
Figura 3-28. 60% 1p90. ....	62
Figura 3-29. Ajuste exponencial de la relación resiliencia-ángulo de tramado con 60% de relleno y 1 perímetro.....	63
Figura 3-30. Influencia del ángulo de tramado con 1 perímetro y 60% de relleno. ....	64
Figura 3-31. Influencia del ángulo de tramado con 2 perímetros y 60% de relleno. ....	64

Figura 3-32. Influencia del ángulo de tramado con 3 perímetros y 60% de relleno. ....	65
Figura 3-33. 60%2p90. ....	65
Figura 3-34. 60% 1p23. ....	66
Figura 3-35. Representación conjunta de los resultados del estudio resiliencia-ángulo de tramado. ....	66
Figura 3-36. Relación tiempo- porcentaje de relleno con 1 perímetro y 45°. ....	69
Figura 3-37. Relación tiempo-porcentaje de relleno con 2 perímetros y 45°. ....	69
Figura 3-38. Relación tiempo-porcentaje de relleno conjunta. ....	70
Figura 3-39. Relación tiempo-número de perímetros con ángulo de tramado 0° y 60% de relleno. ....	70
Figura 3-40. Relación tiempo-número de perímetros con ángulo de tramado 23° y 60% de relleno. ....	71
Figura 3-41. Relación tiempo-número de perímetros con ángulo de tramado 45° y 60% de relleno. ....	71
Figura 3-42. Relación tiempo-número de perímetros con ángulo de tramado 68° y 60% de relleno. ....	72
Figura 3-43. Relación tiempo-número de perímetros con ángulo de tramado 90° y 60% de relleno. ....	72
Figura 3-44. Relación tiempo-número de perímetros conjunta. ....	73
Figura 3-45. Relación ángulo de tramado-tiempo con 1 perímetro y 60% de relleno. ..	73
Figura 3-46. Relación ángulo de tramado-tiempo con 2 perímetros y 60% de relleno. ..	74
Figura 3-47. Relación ángulo de tramado-tiempo con 3 perímetros y 60% de relleno. ..	74
Figura 3-48. Relación ángulo de tramado-tiempo conjunta. ....	75
Figura 3-49. Relación $\eta$ -% de relleno. ....	80
Figura 3-50. Relación $\eta$ -número de perímetros con 60% de relleno y 0°. ....	81
Figura 3-51. Relación $\eta$ -número de perímetros con 60% de relleno y 23°. ....	82
Figura 3-52. Relación $\eta$ -número de perímetros con 60% de relleno y 45°. ....	82
Figura 3-53. Relación $\eta$ -número de perímetros con 60% de relleno y 68°. ....	83
Figura 3-54. Relación $\eta$ -número de perímetros con 60% de relleno y 90°. ....	83
Figura 3-55. Relación $\eta$ -número de perímetros conjunta. ....	84
Figura 3-56. Relación $\eta$ -ángulo de tramado con 60% de relleno y 1 perímetro. ....	84
Figura 3-57. Relación $\eta$ -ángulo de tramado con 60% de relleno y 2 perímetros. ....	85
Figura 3-58. Relación $\eta$ -ángulo de tramado con 60% de relleno y 3 perímetros. ....	85
Figura 3-59. Relación $\eta$ -ángulo de tramado conjunta. ....	86
Figura 3-60. Probeta con 6 perímetros fabricada con PLA tradicional. ....	87
Figura 3-61. Probeta con un perímetro fabricada con <i>Grafylon 3D</i> . ....	87
Figura 3-62. Probeta con 2 perímetros fabricada con <i>Grafylon 3D</i> . ....	87

## Índice de tablas.

Tabla 2.1. Organización del estudio del porcentaje de relleno.....	44
Tabla 2.2. Organización inicial del estudio del ángulo de tramado. ....	44
Tabla 2.3. Organización inicial del estudio del número de perímetros. ....	45
Tabla 2.4. Organización definitiva del proyecto. ....	46
Tabla 3.1. Resultados del estudio del porcentaje de relleno.....	50
Tabla 3.2. Resultados del estudio del número de perímetros. ....	55
Tabla 3.3. Resultados del estudio del ángulo de tramado. ....	62
Tabla 3.4. Tiempo de impresión de cada serie. ....	68
Tabla 3.5. Obtención del error cometido por <i>Simplify 3D</i> en la estimación de tiempos de impresión. ....	76
Tabla 3.6. Estimaciones y valores reales de masa y coste.....	78
Tabla 3.7. Mínimos en la función $\eta$ -% de relleno .....	81
Tabla 3.8. Mínimos de la relación $\eta$ -ángulo de tramado.....	86

# *Capítulo 1.*

## *Introducción*

## 1. Introducción.

Antes de comenzar a explicar los estudios que abarcan este proyecto, es necesario ponerlo en contexto. Para ello, se explica brevemente el concepto de fabricación aditiva ó *Additive Manufacturing* (AM), así como la estructura de proceso de este tipo de tecnologías. Posteriormente, se profundiza en la tecnología utilizada en este proyecto (FDM) y también se exponen otras técnicas, con el fin de observar las similitudes y diferencias que existen entre ellas. Finalmente, se fijan los objetivos del TFG.

### 1.1. *Fabricación aditiva: fundamentos.*

La fabricación aditiva es un método de producción a través del cual el material que forma el producto es depositado capa a capa según se precise [1]. Esta tecnología se basa en la fabricación de componentes por aporte de material a partir de un modelo desarrollado en CAD 3D mediante la utilización de una fuente de alta concentración de energía. Se han desarrollado otras tecnologías para la fabricación de piezas por aporte de material, pero todas ellas son muy parecidas; se fundamentan en la consolidación de un material termoplástico que se suministra en forma de polvo, filamento o láminas [2].

Es una tecnología que disminuye la cantidad de acciones intermedias desde que se obtiene la materia prima hasta que finalmente se tiene el producto, por lo que permite producir hasta un 90% más rápido que con otros procesos de fabricación convencionales. Además, al ser un proceso que se realiza de manera directa, es decir, en un único paso, elimina prácticamente los desechos y por tanto es una forma de producción sostenible [1].



Figura 1-1. Implante realizado mediante fabricación aditiva [20].

Esta tecnología es utilizada en numerosas industrias de gran calado en nuestra sociedad, como son la industria sanitaria y la aeroespacial, que, a su vez, con este uso, contribuyen al desarrollo y la potenciación de este proceso de fabricación. Mediante la fabricación aditiva se pueden conseguir implantes personalizados a las necesidades del paciente, así como piezas reales que componen barcos, aviones (anteriormente esta técnica solo se usaba para fabricación de prototipos), automóviles, etc. [1].

## 1.2. Desarrollo y proceso.

A continuación, se profundizará en el conocimiento de esta tecnología, a través de la descripción de la estructura general del proceso. Como se expondrá más adelante, aunque existen numerosos tipos de fabricación aditiva (estereolitografía, FDM, etc.), todos estos procesos poseen una estructura similar conformada por los siguientes pasos:

- I. Generación del modelo en CAD: esta primera etapa tiene por objetivo la creación de un modelo en un programa CAD del producto que se desea obtener. A través de la herramienta de CAD se pueden generar numerosos diseños muy variados, que permiten crear formas que hasta hace poco tiempo se creía imposible obtenerlas. Esta tarea se está simplificando cada vez más, pues mediante escáner 3D se pueden obtener archivos de CAD con la geometría deseada, pudiendo modificarla con gran facilidad para obtener las directrices necesarias del producto a realizar [4].



Figura 1-2. Etapas de diseño de un objeto obtenido por fabricación aditiva [3].

- II. Generación del archivo STL: tras la obtención del diseño CAD se genera un archivo STL que es el que posteriormente se introducirá a un software de seccionado para obtener el *G-Code*. El archivo STL se obtiene mediante el guardado del diseño CAD en un archivo del tipo STL, en el que el programa

divide en triángulos (más o menos en función de la resolución exigida) la forma que se le ha pasado en CAD. A mayor resolución requerida mayor peso tendrá el archivo STL [4].



Figura 1-3. Diferentes pesos del archivo STL según la resolución del mallado [4].

- III. Separación de capas: Una vez obtenido el archivo STL es necesario obtener el *G-Code* del archivo, un lenguaje de control numérico que proporciona las instrucciones que la impresora interpreta y ejecuta. En este punto del diseño es donde se pueden realizar las modificaciones necesarias para una buena impresión (impresión de falda, ajuste de temperatura de cama, etc.) que finalmente se introducirán en la máquina de impresión a través del *G-Code*.
- IV. Impresión: Tras obtener el archivo *G-Code*, este se envía a la impresora y se ejecuta. Será necesario que la impresora se encuentre en buenas condiciones para la impresión: precalentamiento, correcta colocación del material y de la cama, etc. que en función del tipo de proceso tendrá unos requisitos particulares [4].

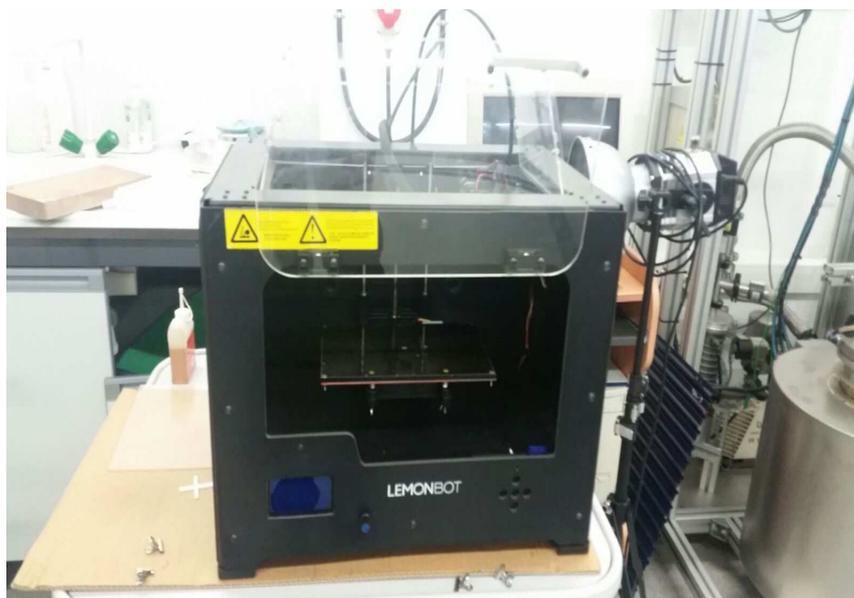


Figura 1-4. Impresora LEMONBOT.

- V. Acabado superficial: dependiendo del tipo de proceso que se use será necesario algún tratamiento superficial para obtener la pieza final. Por ejemplo, en la estereolitografía es necesario curar la pieza con rayos UV para que ésta quede finalizada. Sin embargo, si el proceso utilizado es FDM la pieza se encuentra finalizada una vez se deposite la última capa de material, a no ser que se utilice material de soporte, en cuyo caso éste ha de ser retirado [4].

### ***1.3. Fused Deposition Modelating.***

#### ***1.3.1. Definición.***

A continuación, se expone el método de impresión 3D utilizado en este proyecto: *Fused Deposition Modelating (FDM)* es una técnica que se basa en la extrusión de un material, generalmente polímeros termoplásticos, a través de una boquilla que se desplaza en el plano XY creando capas de la pieza sobre el lecho o cama de la máquina, y que con el desplazamiento en el eje Z finalmente crea la pieza [5]. Suele existir otra boquilla que extruye material de soporte cuando la estructura a conformar así lo precisa, siendo este material distinto del material principal de la pieza, y no con excesiva dureza o consistencia, pues posteriormente será necesario eliminarlo mediante una lima o con otros métodos, como disolventes [6].

#### ***1.3.2. Evolución histórica.***

Esta tecnología surgió de las investigaciones de Scott Crump [9] hacia 1989, aunque no es hasta 1991 cuando la tecnología está desarrollada completamente y la compañía *Stratasys* la patenta en el año 1992 [6]. La idea del *FDM* se le ocurrió a Scott Crump mientras intentaba fabricar una rana de juguete con pegamento, polietileno y cera derretida. Crump observó que podía generar un sistema automático de impresión 3D si unía la pistola de pegamento a un sistema pórtico XYZ robótico, y a partir de esta idea, Crump funda la empresa citada anteriormente “*Stratasys*” donde desarrolla y finalmente patenta la tecnología FDM. Desde 1992 hasta 2006, el desarrollo y la explotación de esta tecnología corrió a cargo de *Stratasys*, hasta que se decidió liberar la patente para que otros fabricantes pudieran desarrollar prototipos de estos sistemas de impresión. Esta liberación conllevó un gran desarrollo y una gran expansión de esta tecnología.

#### ***1.3.3. Proceso.***

Como ya se expuso en el apartado 1.2, un proceso de impresión 3D comienza con la obtención de un archivo STL a partir del CAD, que posteriormente genera, a través de un *slicer* o software de impresión, el archivo *G-Code* que la impresora finalmente interpreta y ejecuta.

Una vez la pieza ya se encuentra lista para ser impresa, el material principal se extruirá a través d un primer extrusor, y si es necesario material de aporte éste saldrá a través de un segundo extrusor. Normalmente las impresoras cuentan con 2 extrusores como mínimo y en caso de tener más, éstos sirven para imprimir en distintos materiales ó colores. Ahora bien, por muchos cabezales que posea una impresora de FDM, nunca habrá más de un cabezal funcionando, es decir, las combinaciones anteriormente citadas se desarrollan de manera secuencial, una detrás de otra. La figura 1-5 presenta el esquema de proceso.

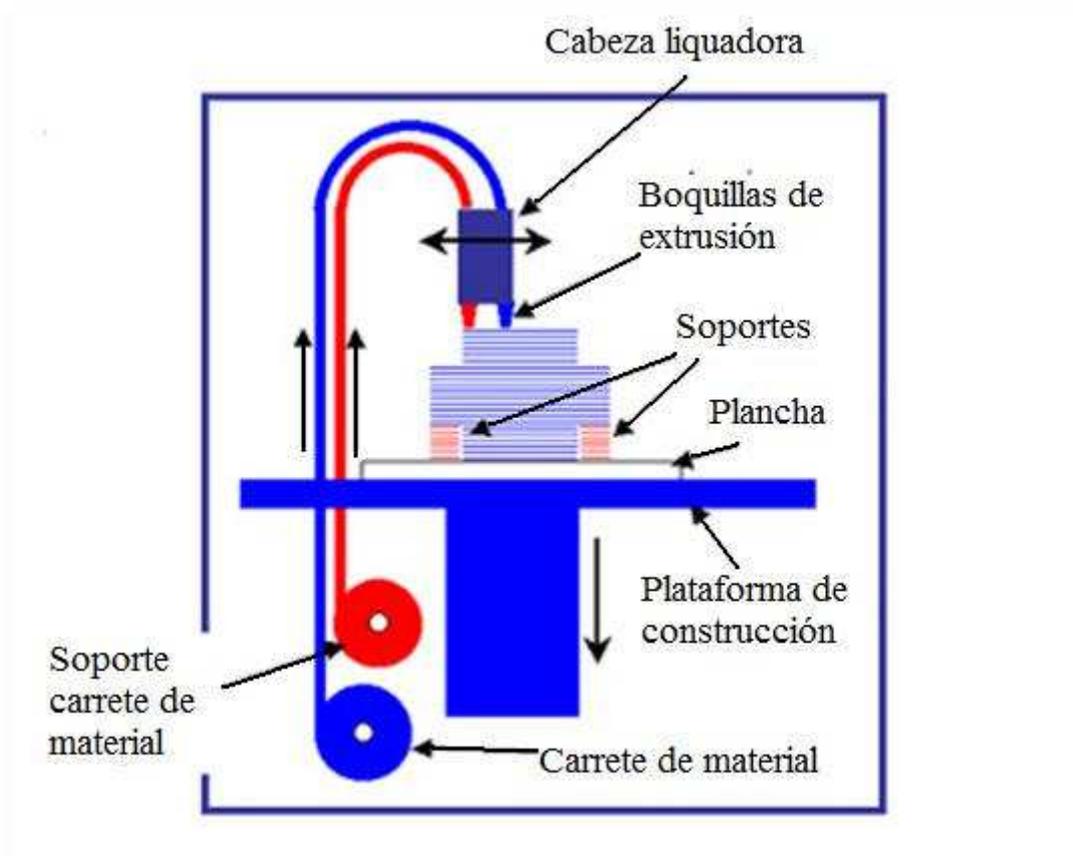


Figura 1-5. Esquema de funcionamiento FDM [22].

El filamento de material es extruido a través de la boquilla mediante un motor que hace pasar al filamento por una zona de calentamiento, que se encuentra entre 150°C y 250°C aproximadamente, según la velocidad de extrusión que se precise. El filamento aparece a través de la boquilla con una textura viscosa y se va depositando sobre la cama o plataforma de construcción, que también deberá estar a una temperatura determinada (entre 40°C y 60°C). Finalmente, con el desplazamiento de la boquilla en el plano XY se van formando las capas y con el desplazamiento en el eje Z la suma de capas acaba conformando la pieza final. Este desplazamiento XYZ se realiza a través de la combinación de tres ejes que posicionan el cabezal tal y como sea preciso en cada instante.

El motor empuja al filamento sobre el extrusor con una fuerza denominada fuerza de extrusión. Esta fuerza dependerá de la temperatura y la velocidad de impresión. Suponiendo temperatura constante, a mayor velocidad de impresión se precisará mayor fuerza de extrusión, y a medida que aumenta la temperatura de extrusión, la fuerza disminuye.

Esta fuerza se puede calcular considerando comportamiento newtoniano, pseudoplástico, flujo laminar, y una boquilla perfectamente circular, a través de la siguiente fórmula:

$$F = \frac{8\mu L}{\pi R^2}$$

Esta fuerza alcanza un máximo en 59 N, independientemente de la velocidad y la temperatura de extrusión, según estudios realizados por el MIT.

Asimismo, teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente supuestas, también es posible calcular el caudal extruido a través de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\mu L}$$

Anteriormente se ha hablado sobre el paso del filamento a través de una zona caliente, pero, ésta no es la única por la que pasa. Existen tres zonas en el cabezal del extrusor según la temperatura [21]:

- Zona fría o zona I: Esta zona mantiene el equilibrio de temperaturas del cabezal, evitando que el calor se expanda por todo el cabezal. Normalmente esta zona es enfriada mediante un ventilador acoplado al cabezal.
- Zona de transición o zona II: Esta es la zona de conexión entre la zona fría y la zona caliente. Generalmente posee un estrechamiento denominado garganta donde comienza el cambio de estado del material, dando forma al filamento que compondrá la pieza.
- Zona caliente o zona III: Es la última zona del cabezal, donde la garganta se hace más estrecha para terminar desembocando en el extrusor, y donde el cambio de estado finaliza y el material es extruido. Esta zona aumenta y mantiene su temperatura mediante una plataforma calefactora adosada al cabezal, siendo la temperatura controlada por un termistor que informa sobre la temperatura alcanzada. La temperatura y la velocidad de impresión están directamente relacionadas, de una manera creciente, pues, a mayor velocidad de impresión, mayor fluidez del filamento será necesaria y por tanto una mayor temperatura (suponiendo fuerza de extrusión constante).

En la figura 1-6 se pueden observar las tres zonas anteriormente descritas.



Figura 1-6. Zonas del cabezal o extrusor [23].

#### 1.3.4. Parámetros de impresión.

- Patrón de relleno.

Este parámetro define la forma en la que se deposita el relleno de la pieza. Existen desde los simples patrones lineales hasta complejas formas poligonales. En función del software empleado se podrán usar unos u otros. En la figura 1-7 aparecen algunos tipos de patrón.

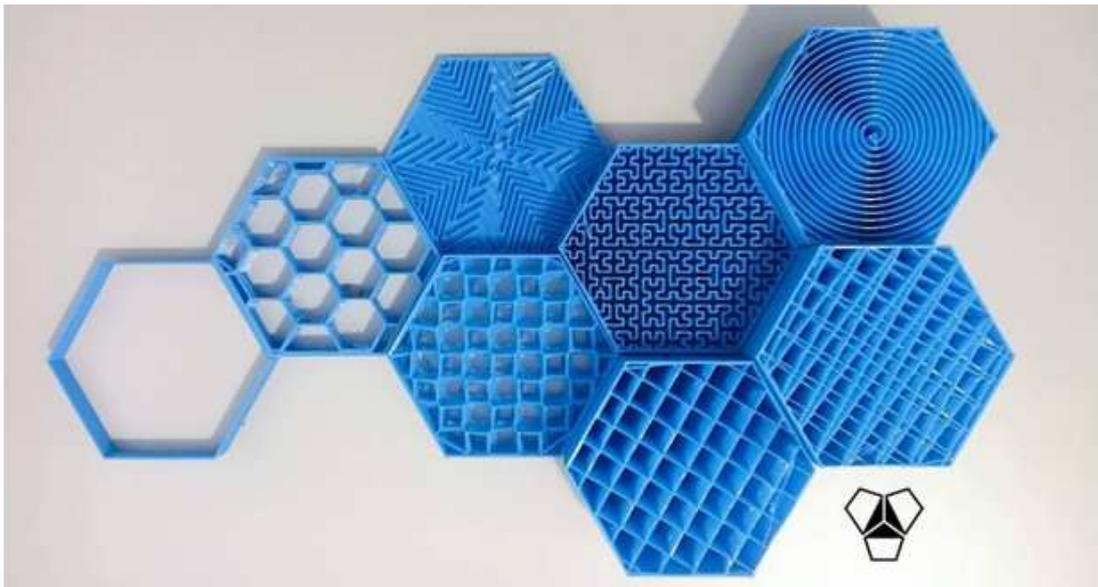


Figura 1-7. Diferentes patrones de relleno [24].

- Ángulo de tramado.

El ángulo de tramado define la orientación del filamento en el interior de la pieza. En función del ángulo, las propiedades de la pieza variarán. Por ejemplo, cuando se aplica un esfuerzo de tracción, la máxima resistencia a la tracción se tendrá cuando las fibras estén orientadas en la misma dirección que el esfuerzo, mientras que, en un ensayo de resiliencia, se conseguirá que ésta sea máxima cuando las fibras estén orientadas perpendicularmente al impacto.

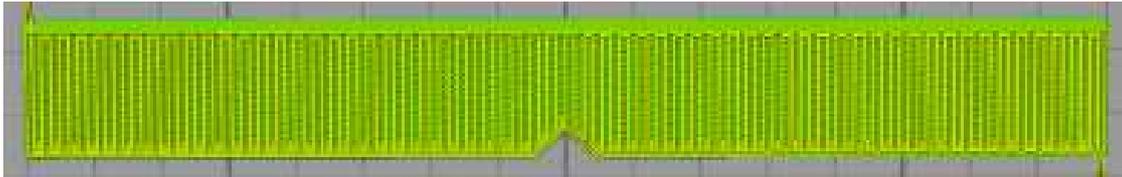


Figura 1-8. Ángulo de tramado 0°.

- Porcentaje de relleno.

La forma de una pieza se define por uno o más perímetros, quedando el interior de la pieza a merced de este parámetro. El porcentaje de relleno es la cantidad de material que compondrá el interior de la pieza. Este concepto permite obtener pieza con una forma aparentemente sólida sin necesidad de que sea maciza. Con un porcentaje de relleno del 40% se consigue una pieza con la suficiente ergonomía como para ser usada en determinadas aplicaciones. En la figura 1-9 se observan distintos porcentajes de relleno para una misma pieza.

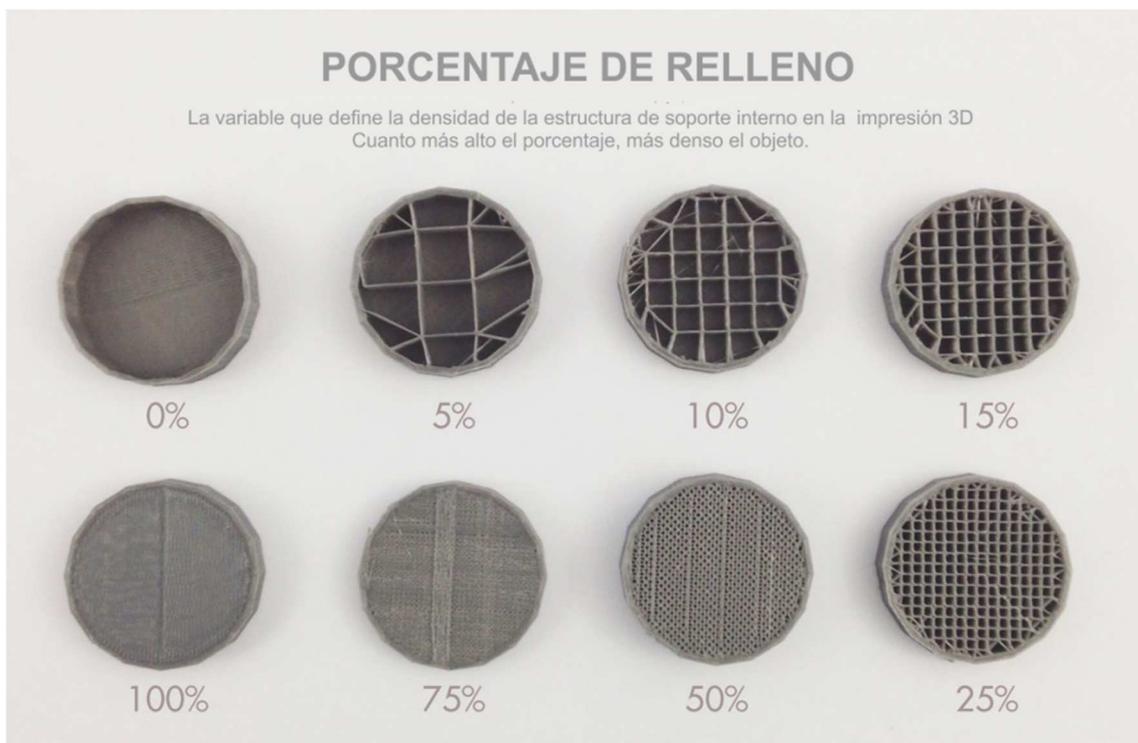
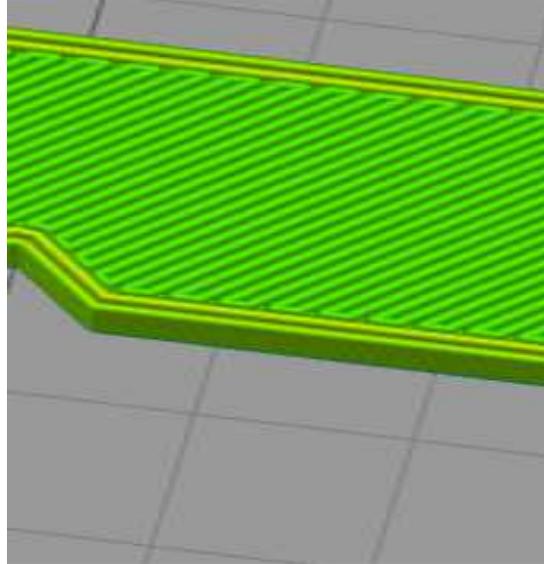


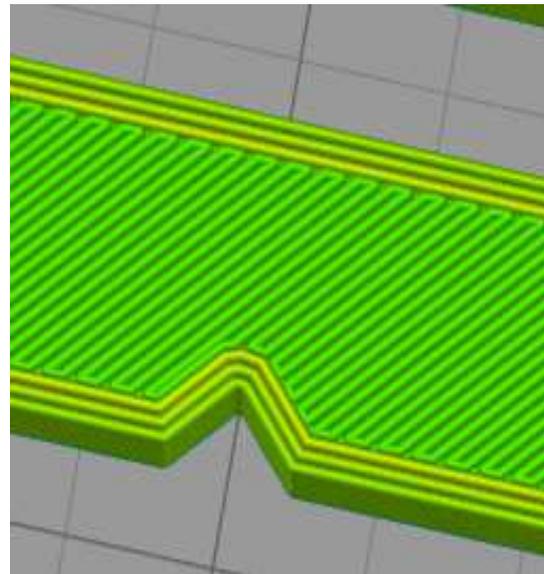
Figura 1-9. Diferentes porcentajes de relleno [25].

- Número de perímetros.

Es el número de contornos sólidos que forman el borde de la pieza. Proporcionan la forma básica de la pieza, y, a medida que aumentan, aumenta la rigidez de la pieza. Las figuras 1-10 y 1-11 muestran una misma pieza con diferentes números de perímetros.



*Figura 1-10. Detalle del número de perímetros (2 perímetros).*

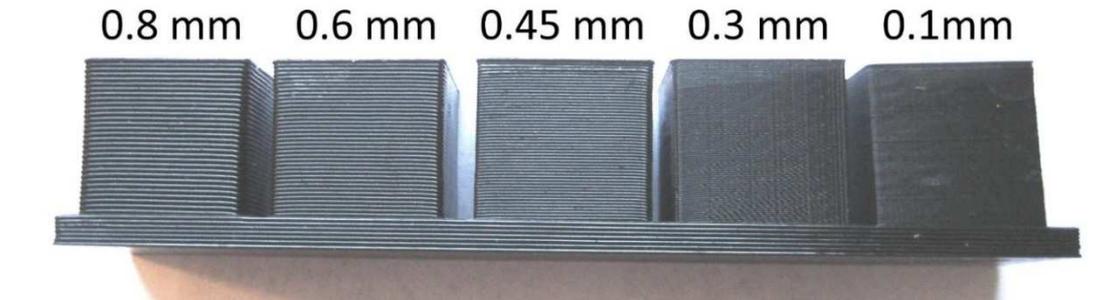


*Figura 1-11. Detalle del número de perímetros (3 perímetros).*

- Altura de capa.

La altura de capa define el salto que da el extrusor al terminar una capa y comenzar la siguiente. Por tanto, define en parte la consistencia de la pieza fabricada y condiciona los demás parámetros de impresión. Cuanto menor sea la altura de capa, mayor será la consistencia del producto, y viceversa.

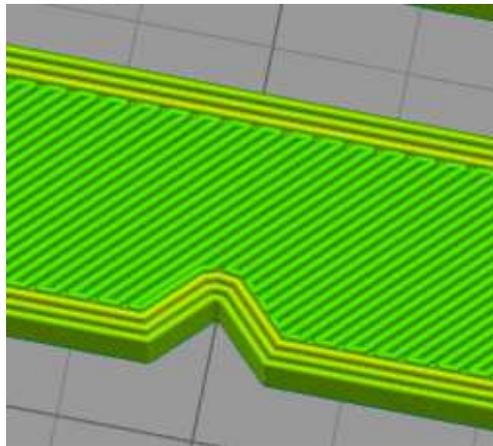
Este parámetro es muy importante, pues puede marcar la diferencia entre una pieza consistente y ergonómica y otra que no sea válida para unas determinadas especificaciones. En la figura 1-12 se aprecia como una mayor altura de capa muestra las distintas capas que existen, mientras que una menor altura de capa hace pensar si la pieza ha sido construida en una impresora 3D o por otro método, pues parece totalmente maciza.



*Figura 1-12. Detalle de la altura de capa [26].*

- Número de capas sólidas.

Antes de empezar a extruir relleno, es necesario imprimir al menos una capa sólida que sirva de apoyo al relleno. De la misma forma, al final de la pieza también es necesario. Estas capas sólidas pueden ser más o menos en función de la rigidez de la que se quiera dotar a la pieza.



*Figura 1-13. Detalle de capa sólida superior.*

- Velocidad de extrusión.

La velocidad de extrusión o impresión se define por su propio nombre. Este parámetro es fundamental en el grado de precisión que se quiere en la pieza. Normalmente, a velocidades bajas la definición será mejor que a velocidades altas. Aunque velocidades excesivamente bajas pueden dar lugar a acumulaciones de material no deseadas e incluso colapsos en la boquilla. Es por ello que, en función de la pieza a construir, será necesario ajustar la velocidad de impresión para obtener una calidad óptima del producto final.

- Temperatura de extrusión.

La temperatura y la velocidad de extrusión están directamente relacionadas, pues a mayor temperatura, mayor fluidez y por tanto la velocidad de impresión podrá ser mayor. Por tanto, si la velocidad tenía un punto óptimo, lo mismo ocurrirá con la temperatura. Temperaturas muy altas fluidifican mucho el filamento y pueden dar lugar a goterones innecesarios, y temperaturas bajas pueden provocar que la boquilla no extruya. Es necesario ajustar la temperatura antes de comenzar a imprimir.

- Soporte.

Cuando se quiere fabricar una pieza con voladizos y formas que no se sostengan hasta la solidificación, será necesario construir una estructura de soporte, la cual deberá ser de un material distinto al de la pieza y fácil de eliminar.



*Figura 1-14. Pieza con material de soporte [27].*

- Ángulo de soporte.

Es el ángulo de pared a partir del cual el software genera soportes. Dicho ángulo se mide desde la mesa hasta la pared y si es menor del establecido, el software de impresión añadirá el soporte.

- Temperatura de cama.

Esta temperatura ayuda a la buena adherencia de las primeras capas a la cama, de manera que no surjan imperfecciones en ellas. Una vez impresa la pieza, tras enfriarse, se pueden despegar, aunque es común agregar a la cama antes de la impresión algún material como laca para favorecer que las piezas se despeguen de la cama y no se rompan las piezas.

### 1.3.5. Tipos de materiales usados.

En cuanto a los materiales que pueden usarse en esta tecnología destacan los polímeros termoplásticos, aunque también es posible utilizar materiales metálicos e incluso cerámicos. Entre los polímeros usados destacan [28]:

- ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno).
- PLA (Ácido poliláctico).
- ASA (Acrilonitrilo estireno acrilato).
- PET (Polietileno tereftalato).
- PC (Policarbonato)

Actualmente, estos materiales están evolucionando por medio de la inclusión de aditivos como el grafeno, con el fin de dotar al objeto final de mejores propiedades mecánicas.



Figura 1-15. Bobinas de material para impresión 3D [28].

### 1.3.6. Ventajas y limitaciones del proceso FDM.

Este tipo de impresión 3D presenta numerosas ventajas frente a otros procesos:

- Alta velocidad de fabricación.
- Capacidad de creación de formas complejas.
- Gran precisión dimensional y gran acabado superficial.
- Gran aprovechamiento de material.
- Bajo coste de producción y mantenimiento.
- Obtención directa del objeto acabado sin necesidad de tiempos de curado.

Por otro lado, presenta algunas desventajas, tales como:

- Gran coste inicial de la máquina.
- Necesidad de post-proceso cuando se utiliza material de soporte.
- En ocasiones, el material de impresión suele tener un alto coste.

En definitiva, si se hace balance de ventajas y desventajas, éste es favorable, ya que se trata de un proceso rápido y limpio que, una vez amortizado el gasto inicial, proporciona numerosos beneficios a los usuarios de esta tecnología.

## 1.4. Otros procesos.

### 1.4.1. Estereolitografía.

La estereolitografía, proceso también como SLA o SL, es una tecnología de fabricación patentada por Chuck Hull en 1986, quien fundó la compañía *3D Systems Inc* para comercializar las primeras impresoras 3D basadas en esta técnica.

Esta tecnología fundamenta en lo siguiente: mediante un láser ultravioleta incide sobre una capa de resina que cura y mediante la adición de estas capas se obtiene el objeto [10]. El láser ultravioleta fija la resina en la zona requerida y la segunda luz ultravioleta la cura, fijando la capa al objeto creado. Una vez se ha fijado la capa, la plataforma de elevación del dispositivo desciende una distancia igual al grosor de la capa fundida, tras lo cual, una hoja pasa por encima de la pieza depositando en ella una nueva capa de resina lista para ser adherida a la pieza. Una vez la pieza ha sido terminada, es necesario sumergirla en un baño químico que elimina la resina sobrante, y finalmente la pieza es curada en un horno de luz ultravioleta.

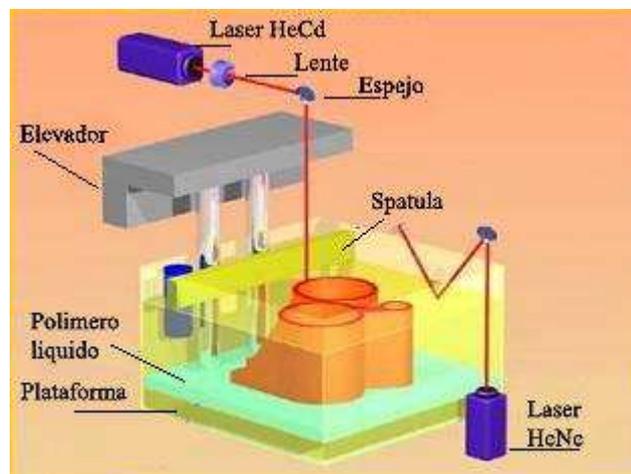


Figura 1-16. Esquema de proceso de estereolitografía [29].

Esta tecnología necesita normalmente estructura de apoyo o soporte, pues la resina se encuentra líquida en gran parte del proceso. Las estructuras auxiliares se generan automáticamente durante la preparación del archivo CAD, aunque, si éstos no se ajustan a nuestras especificaciones, se pueden incluir manualmente. Estos soportes deben ser de un material distinto al principal, y que sea fácil de retirar, como ya se vio en el apartado del FDM [10].

Las resinas que se utilizan en este tipo de procesos son [10]:

- Resina blanca opaca tipo ABS.
- Resina blanca ABS Especial con infiltraciones para mejorar sus propiedades mecánicas.
- Resina translúcida.

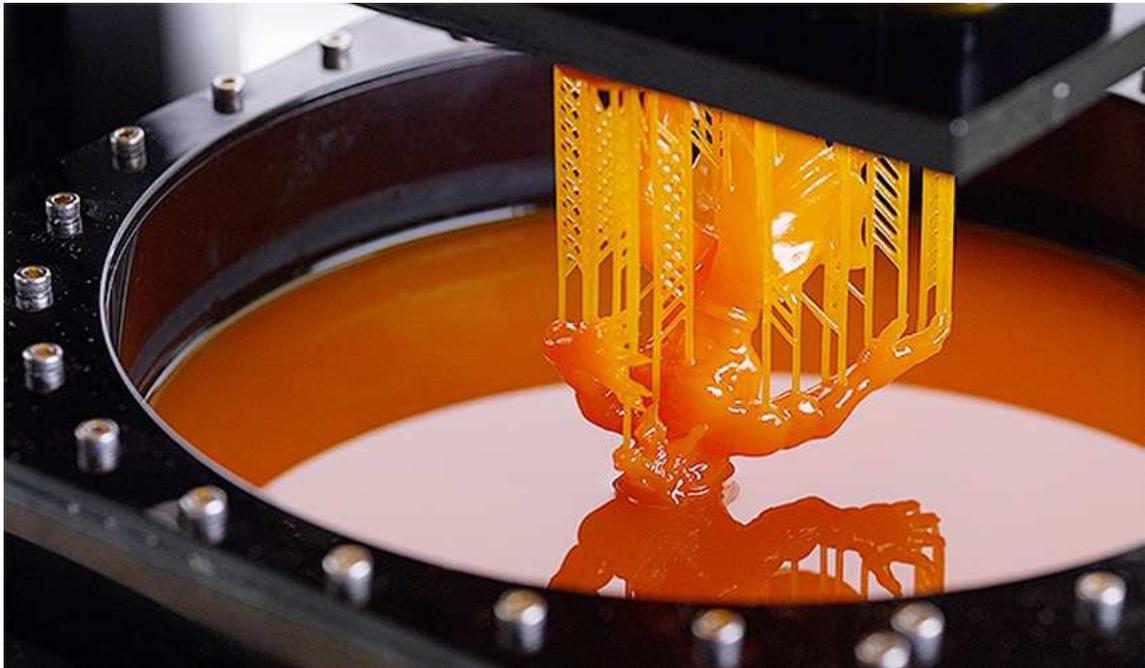


Figura 1-17. Fabricación de un objeto mediante estereolitografía [7].

Como ventajas de esta tecnología se pueden destacar:

- Rapidez.
- Gran acabado superficial, y gran limpieza.
- Gran dureza, lo que permite a estas piezas ser mecanizadas y crear moldes para moldeo por inyección, procesos de forja...
- Las piezas no son porosas.

Como inconvenientes aparecen:

- Objetos sensibles a la humedad y a la temperatura, por lo que serán necesario tratamientos posteriores para paliar estos efectos.
- Tiene un coste elevado. La resina utilizada tiene un coste de entre 60€ y 90€ el litro, mientras que los equipos cuestan entre 75000€ y 400000€.

#### 1.4.2. Binder Jetting.

También conocida como *3DP*, esta tecnología se desarrolló en el MIT (instituto Tecnológico de Massachusetts en 1993, siendo explotada posteriormente por la empresa *Z Corporation* a partir de 1995, cuando obtuvo la licencia.

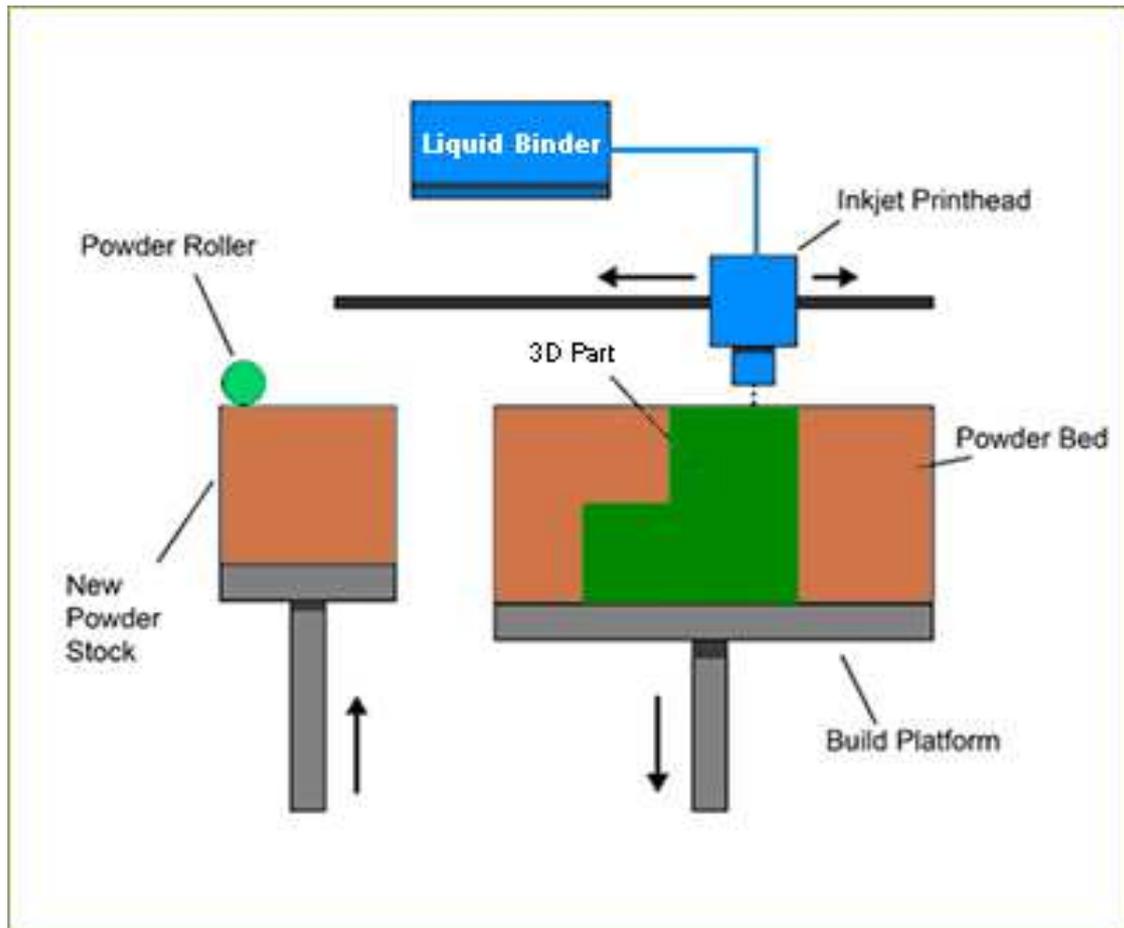


Figura 1-18. Esquema de proceso de Binder Jetting [30].

Este proceso consiste en la pulverización de aglutinante líquido sobre un lecho de polvo, que posteriormente solidifica transversalmente. Una vez solidifica la capa, la cama sobre la que se posa el objeto desciende e inyecta otra capa, y así hasta finalizar el objeto [11]. Tras la finalización de la impresión, el objeto debe curarse en un horno para asegurar la solidez de la pieza. Finalmente, se cepilla la pieza con el fin de eliminar el polvo que haya podido aparecer.

Este proceso se suele llevar a cabo en la obtención de piezas metálicas, aunque también es posible obtener objetos a partir de polímeros.



Figura 1-19. Cobre en polvo para procesar mediante Binder Jetting [31].

Esta tecnología presenta como ventajas:

- No son necesarias estructuras de soporte.
- Gran flexibilidad geométrica debido a la combinación polvo aglutinante.
- Gran control en la composición.

Los inconvenientes de este proceso son:

- Suelen obtenerse objetos porosos.
- No permite la creación de aristas rectas o puntiagudas, pues debido a la combinación metal aglutinante, dichas aristas acabarán desprendiéndose de la pieza final.

#### 1.4.3. Polyjet 3D.

La impresión *PolyJet 3D*, que fue patentada por la sociedad *Objet Ltd.* en 1999 (que se unió a *Stratasys* en 2012), combina la tecnología *Inkjet* y el uso de foto-polímeros [12]. Consiste en la inyección de capas de fotopolímero sobre una plataforma de construcción, necesitando curar la pieza. En este caso, justo al inyectarse la pequeña gota (de solo 16  $\mu\text{m}$  de grosor) de fotopolímero sobre la cama o bandeja, ésta es curada por medio de rayos ultravioleta. Realizando este proceso de manera continua se van formando las capas y finalmente se obtiene el objeto deseado. Al igual que en otras tecnologías, en caso de que la pieza este conformada por salientes, voladizos o formas complejas, será necesario utilizar un material de soporte que sea fácil de eliminar tras finalizar el proceso. Normalmente se utilizan materiales con una textura similar al gel, que se retiran después disolviéndolos con agua o con la propia mano. Al curarse el material durante la inyección, no es necesario realizar un curado posterior, a no ser que se busque mejorar o dar al objeto alguna propiedad [8].

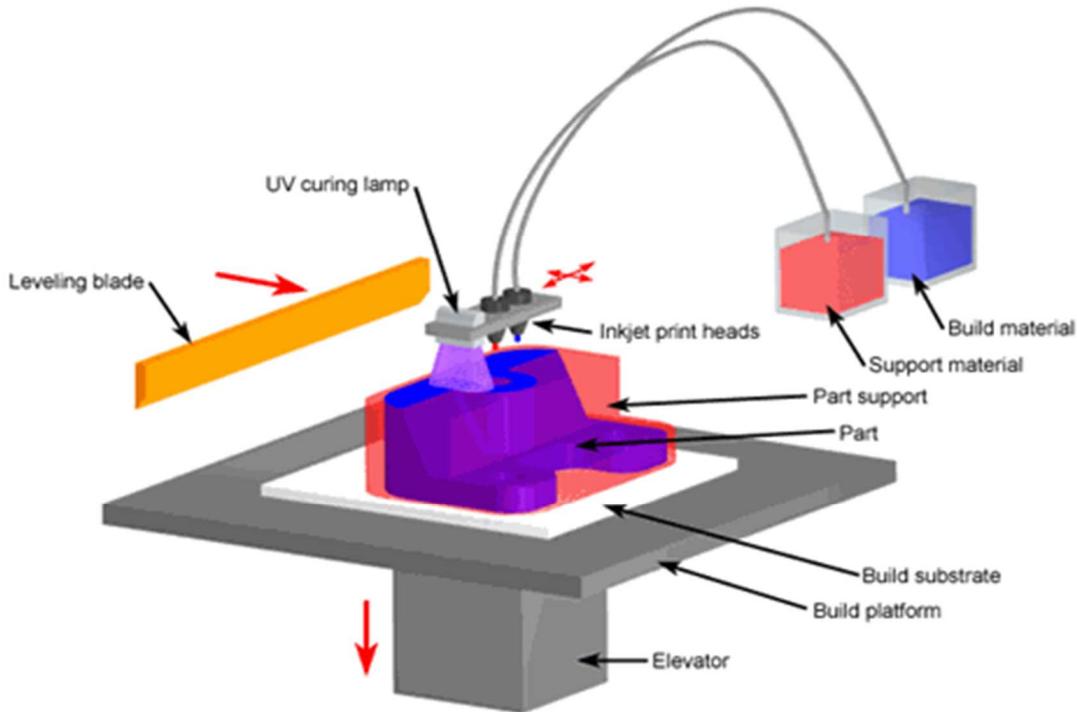


Figura 1-20. Esquema de proceso Polyjet 3D [32].

Presenta numerosas ventajas frente a los demás tipos de impresión 3D, debido a su gran precisión en la reproducción de formas y objetos, proporcionando además un gran acabado superficial. El mayor inconveniente de esta tecnología es que no es capaz de reproducir objetos de gran tamaño, cosa que otros métodos como la estereolitografía si pueden hacer. El *Polyjet 3D* se utiliza en prototipado médico en su mayoría.

#### 1.4.4. LOM

*Laminated Object Manufacturing* es una de las tecnologías de impresión 3D más usadas para el prototipado rápido. Fue desarrollado por *Helisys Inc.* (en la actualidad *Cubic Technologies*). Esta tecnología es diferente a las explicadas anteriormente. Una lámina de papel, plástico o materiales metálicos cubierta de adhesivo van deslizándose sobre la plataforma de construcción, y mediante una serie de sensores, se detecta por donde se debe cortar la lámina para que la forma sea la deseada. La lámina es cortada mediante un cuchillo, o, más frecuentemente, con un cortador láser, y es enrollada en un rodillo que deposita la lámina en el lugar correspondiente. Poco a poco se van uniendo capas hasta formar el objeto final. Una vez obtenido el objeto, éste puede ser mecanizado para darle un mejor acabado.

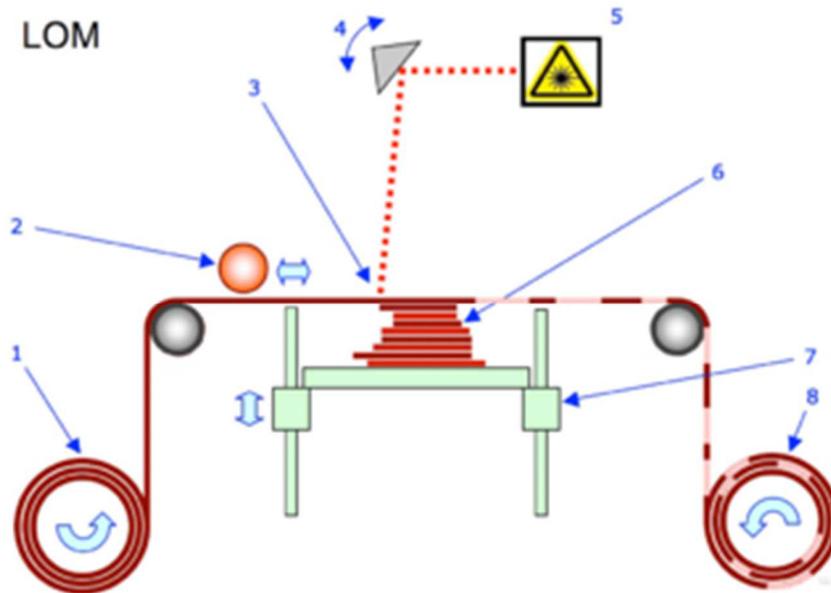


Figura 1-21. Esquema de proceso LOM [13].

#### 1.4.5. Sinterización Selectiva por Láser.

Desarrollada y patentada por Carl Deckard y Joe Beaman en la Universidad de Texas a mediados de los 80, la sinterización selectiva por láser es otro tipo de fabricación aditiva o *Additive Manufacturing* (AM). Esta técnica consiste en la deposición de una capa de polvo, de unas décimas de milímetro, en una cuba precalentada a una temperatura ligeramente por debajo del punto de fusión del polvo. A continuación, se aplica un láser de CO<sub>2</sub> sobre el polvo, sinterizándolo, es decir, fusionando y solidificando la capa. Realizando el proceso de manera continua, se obtiene finalmente el objeto.

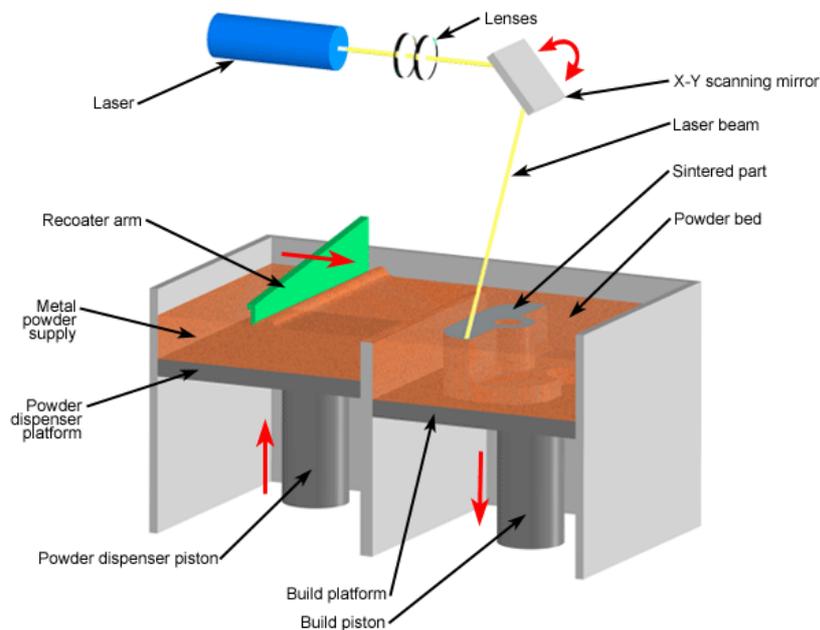


Figura 1-22. Esquema de proceso SLS [33].

La densidad de la pieza obtenida depende de la potencia del láser, que suele ser de pulso. En esta técnica no se necesita material de soporte, pues el polvo fundido está rodeado de polvo sin fundir que actúa como soporte. Se utiliza tanto con polímeros como con metales y aleaciones metálicas en un nuevo proceso denominado SLM (*Selective Laser Mating*).

#### 1.4.6. Direct Metal Deposition.

También conocido por las siglas DMD, este proceso usa el láser para fundir polvo metálico al igual que el SLS. La diferencia entre ellas radica en que, mientras que SLS toma polvo de un lecho que además sirve de soporte, el DMD alimenta la capa que se está imprimiendo a través de una boquilla que aporta el polvo, y mediante un haz de láser es fundido y adherido a la capa anterior. Otra diferencia de esta tecnología es que no se suele usar para generar objetos desde cero, sino que sirve para realizar detalles, recubrimientos y protecciones a objetos que han sido anteriormente fabricados por otros procesos. Aunque con el auge de la impresión 3D comenzó a usarse esta técnica para obtener objetos, aunque siempre es necesario partir de un objeto inicial que actúe como sustrato para originar la pieza final.

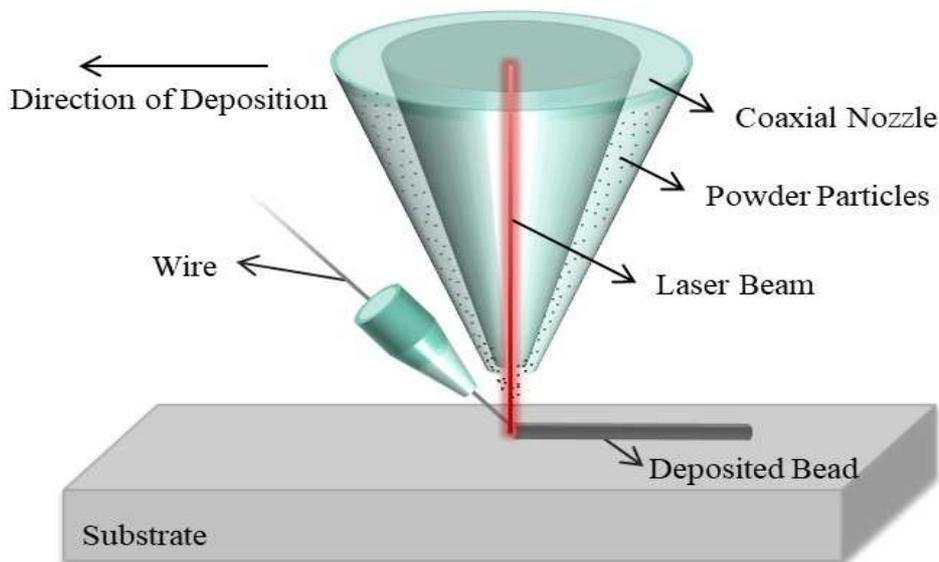


Figura 1-23. Esquema de proceso DMD [34].

El proceso se desarrolla de la siguiente manera: se inyecta el polvo sobre la superficie del sustrato, y se hace incidir un haz de laser que genera un baño fundido de metal que se adhiere a la zona deseada. Este proceso se utiliza mayoritariamente en la industria aeronáutica para reparar piezas complejas en lugar de remplazarlas. Se realizan inclusiones selectivas de metal que eliminan los defectos existentes. Esta es una técnica más reparadora que constructora.

### **1.5. Objetivos y planificación del TFG**

Los objetivos principales del presente trabajo se pueden dividir en dos áreas:

- Por un lado, se pretende estudiar la influencia de las propiedades de impresión tales como el ángulo de tramado, el porcentaje de relleno y el número de perímetros, en la resiliencia de la probeta. En función de ello se establecerán unas conclusiones acerca de que combinación de parámetros es la idónea para conseguir una mayor resiliencia.
- Por otro lado, se busca establecer una comparación entre la resiliencia del material usado, PLA con grafeno, y la resiliencia del PLA puro, con el fin de poder concluir qué material posee una mayor resiliencia o unas condiciones que se ajusten mejor a alguna aplicación.

Además de estos dos objetivos principales, será necesario realizar algunos estudios complementarios que surgen como consecuencia de los anteriores y que son:

- Estudio de la fabricación aditiva, y en particular de la impresión FDM.
- Estudio de las propiedades del material utilizado (PLA con grafeno).
- Diseño de la probeta en CAD, y posterior manipulación en Simplify.
- Revisión de la documentación sobre los ensayos de resiliencia.
- Estudio económico del proceso.
- Estudio de la rentabilidad del proceso.
- Estudio sobre la precisión de las estimaciones de masa y tiempo *de Simplify 3D*.
- Estudio de la relación entre las variables de impresión y el tiempo de impresión.

# *Capítulo 2.*

## *Metodología del TFG.*

## 2. Metodología del TFG.

En el presente TFG se han fabricado 152 probetas para ensayo de resiliencia con un material que combina PLA con una pequeña adición de grafeno. Tras introducir en los anteriores apartados las distintas formas de impresión 3D existentes, haciendo hincapié en el proceso de impresión usado en este proyecto, a continuación, se hablará acerca del material, el software utilizado para diseñar e imprimir la probeta y los equipos usados en este proyecto, así como del concepto de resiliencia y la forma de realizar el ensayo con el péndulo de Charpy. Finalmente se expondrá como ha sido organizado el estudio.

### 2.1. Material.

Las probetas han sido fabricadas con un material nuevo que acaba de llegar al mercado denominado *Grafylon 3D* [14], que ha sido creado de manera conjunta por *FILOALFA* y *Directa Plus*. Este material está compuesto por PLA con una pequeña adición de grafeno. Esta pequeña adición proporciona al material una mejora considerable en sus propiedades mecánicas respecto del PLA sin aditivos.



Figura 2-1. Bobina de Grafylon 3D [14].

En la página web del fabricante [14], aparecen las especificaciones de uso de este material, tales como el color, la masa de la bobina (neta y bruta), la temperatura de la boquilla y de la cama y la velocidad recomendada de impresión, como se ve en la figura 2-2.

Colour	Grey
Net Weight	0.700 Kg
Gross Weight	1.000 Kg
Nozzle Temperature	170 - 210°C
Recommended Print Speed	40 - 120 mm/s
Buildplate Temperature	0-50°C

Figura 2-2. Características de la bobina de Grafylon 3D [14].

La mejora en las características físicas de este material respecto de un PLA tradicional, según el fabricante, es la siguiente:

- Módulo Elástico → Aumento del 34%.
- Resistencia a la tracción → Aumento del 23%.
- Capacidad de alargamiento → Aumento del 28%.
- Conductividad térmica → Se duplica. Aumento del 100%.
- Mejor acabado superficial.
- Mayor facilidad para la impresión.
- No tóxico e inodoro.

No se indica nada sobre las mejoras en cuanto a resiliencia, por lo que al final de este proyecto se dará respuesta a esta cuestión, pues constituye uno de los objetivos del presente trabajo.

## 2.2. Software

Tal y como se ha expuesto en capítulos anteriores, las tecnologías de impresión 3D, y en particular la que compete a este proyecto, *FDM*, parten del diseño de la pieza en un entorno de diseño asistido por ordenador, es decir, un programa CAD que permita crear las formas deseadas por el diseñador para ser impresas. Este archivo STL, posteriormente debe ser procesado en otro software, denominado generalmente como *slicer*, que se encarga de obtener el archivo *G-Code* que es el que finalmente va a la máquina, proporcionando las directrices necesarias para la obtención de la pieza final.

En este proyecto se ha trabajado con dos softwares:

- Software de diseño: *SolidWorks*.

*SolidWorks* [17] constituye una herramienta de diseño asistido por ordenador, conocido comúnmente por sus siglas en inglés CAD (Computed Aided Design). El uso de esta herramienta está muy extendido en el mundo de la ingeniería, pues permite desarrollar proyectos sin necesidad de utilizar escuadra y cartabón, como se hacía no hace tanto tiempo.



Figura 2-3. Portada del software de diseño SolidWorks [35].

*Dassault Systèmes S.A.*, su creador, lanza la primera versión de este programa en 1995, y desde entonces, este programa no ha parado de crecer y desarrollarse hasta ser uno de los programas más potentes en el ámbito del diseño asistido.

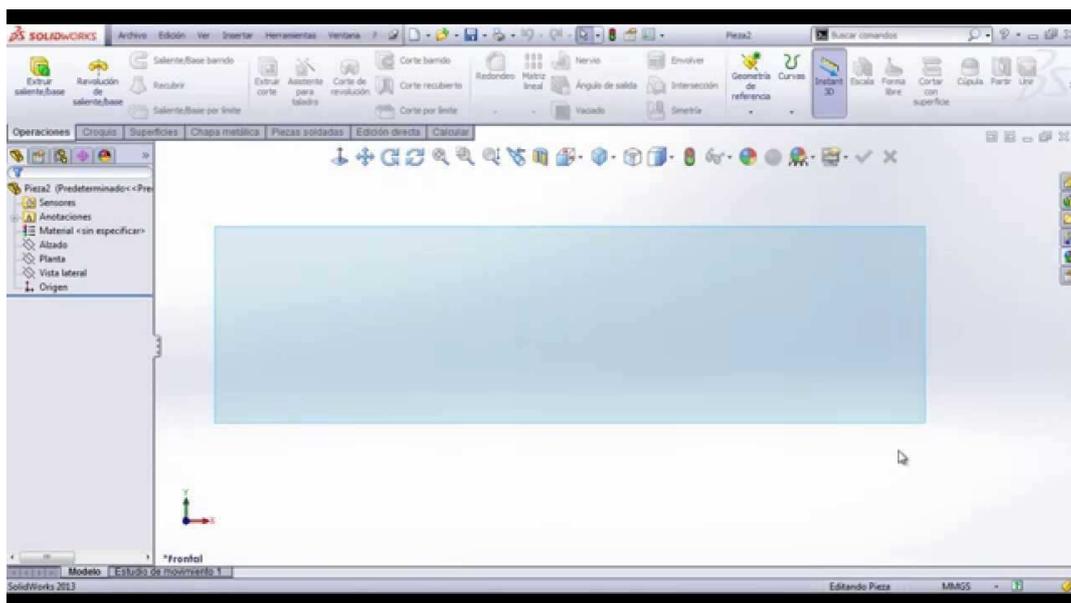


Figura 2-4. Entorno de diseño de SolidWorks [17].

Esta herramienta ha servido para obtener el diseño de la probeta, con todas las especificaciones indicadas por la norma, y finalmente el archivo STL.

- Software de seccionado o *slicer*: *Simplify 3D*.

Con esta herramienta, y a partir del archivo STL generado anteriormente, el programa *Simplify 3D* secciona la pieza y crea el *G-Code* necesario para que la impresora pueda realizar la impresión.

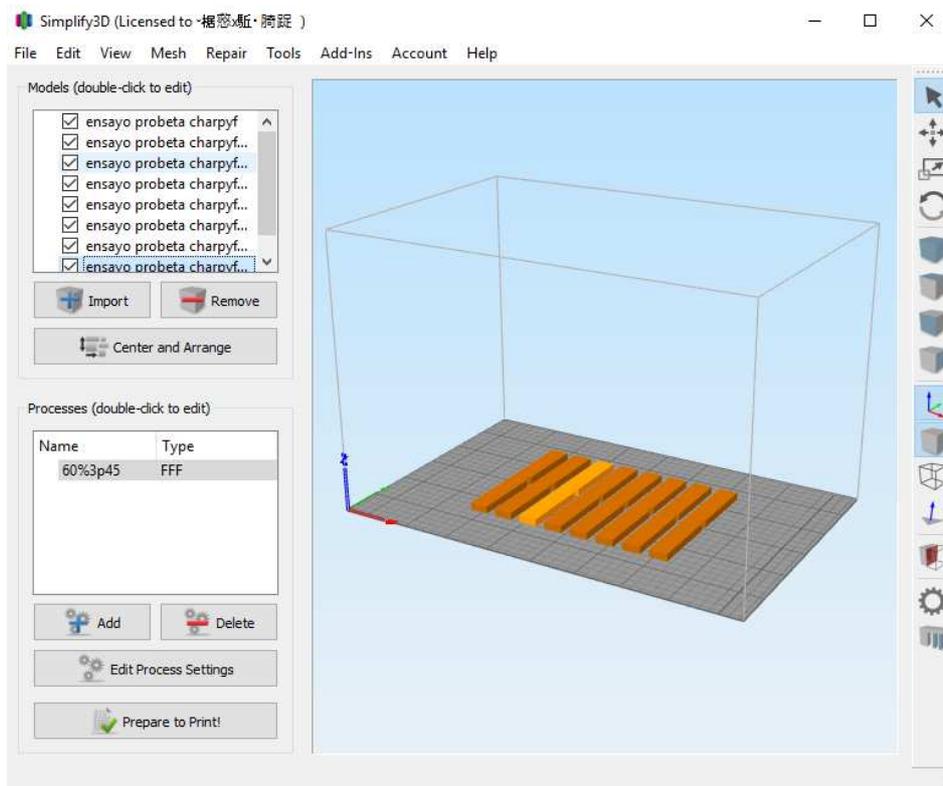


Figura 2-5. Entorno gráfico de Simplify 3D.

Este software proporciona, además de poder ajustar todos los parámetros de impresión, estimaciones sobre la cantidad de material utilizado en la impresión y su precio. Introduciendo la densidad y el precio por gramo del material, este programa estima el gasto que supondrá la impresión. También puede simularse el proceso de impresión con este programa, que es, sin duda, uno de los más completos actualmente.

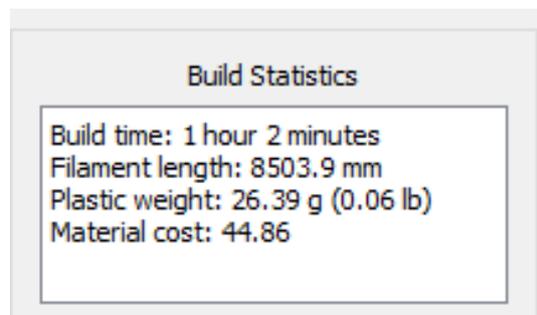


Figura 2-6. Estimaciones realizadas por Simplify 3D.

Como detalle de este proyecto, es necesario mostrar que, para una impresión correcta, se añade en cada serie una “falda” alrededor de cada serie, que sirve para que la boquilla se desatasque y comience a extruir de manera correcta antes de proceder a la impresión de las probetas. En la figura 2-7 se puede observar este detalle.

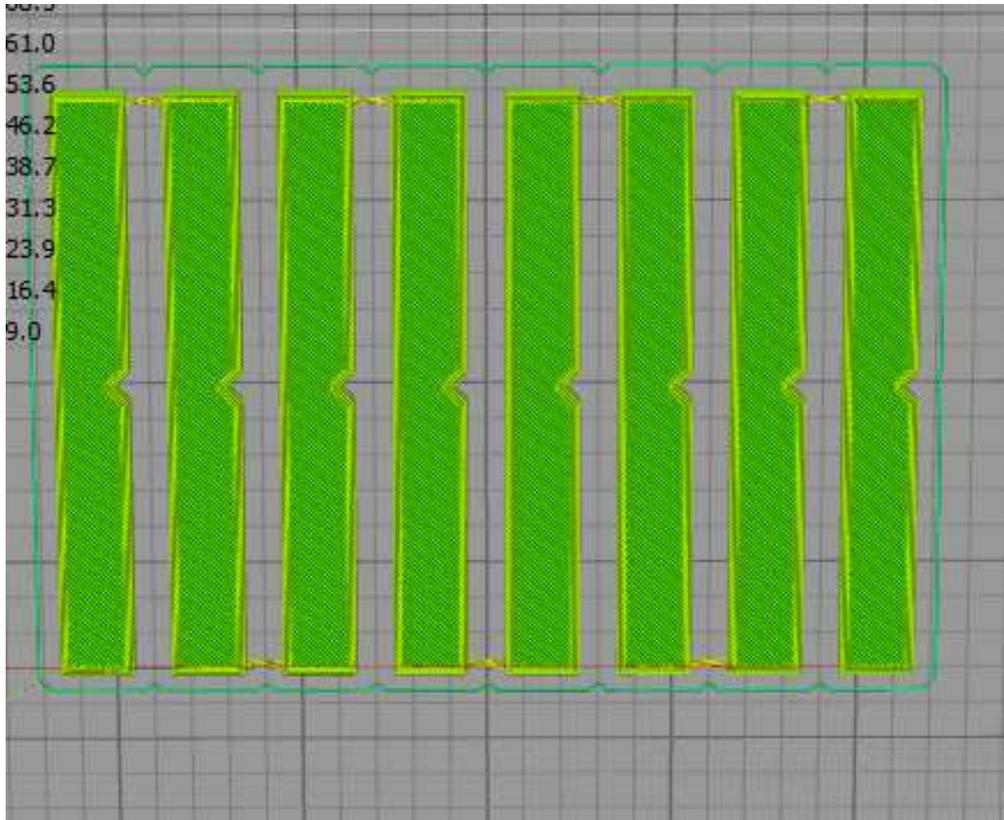


Figura 2-7. Detalle de falda en la simulación de Simplify 3D.

### 2.3. Equipos

Tres son los equipos que se han utilizado para el desarrollo de este ensayo: una báscula de precisión, la impresora FDM y el péndulo de Charpy.

#### ➤ Báscula de precisión.

La báscula de precisión, perteneciente al *Departamento de Fabricación de la Universidad Politécnica de Cartagena*, se ha utilizado para dos fines fundamentales. En primer lugar, para medir la densidad del material utilizado ( $1,27 \text{ g/cm}^3$ ), con el fin de introducir este valor en el software de seccionado *Simplify 3D* para obtener las estimaciones de gasto de masa de material durante la impresión. En segundo lugar, todas las probetas han sido pesadas en esta báscula, para poder comparar posteriormente si las estimaciones que realiza *Simplify 3D* son correctas.

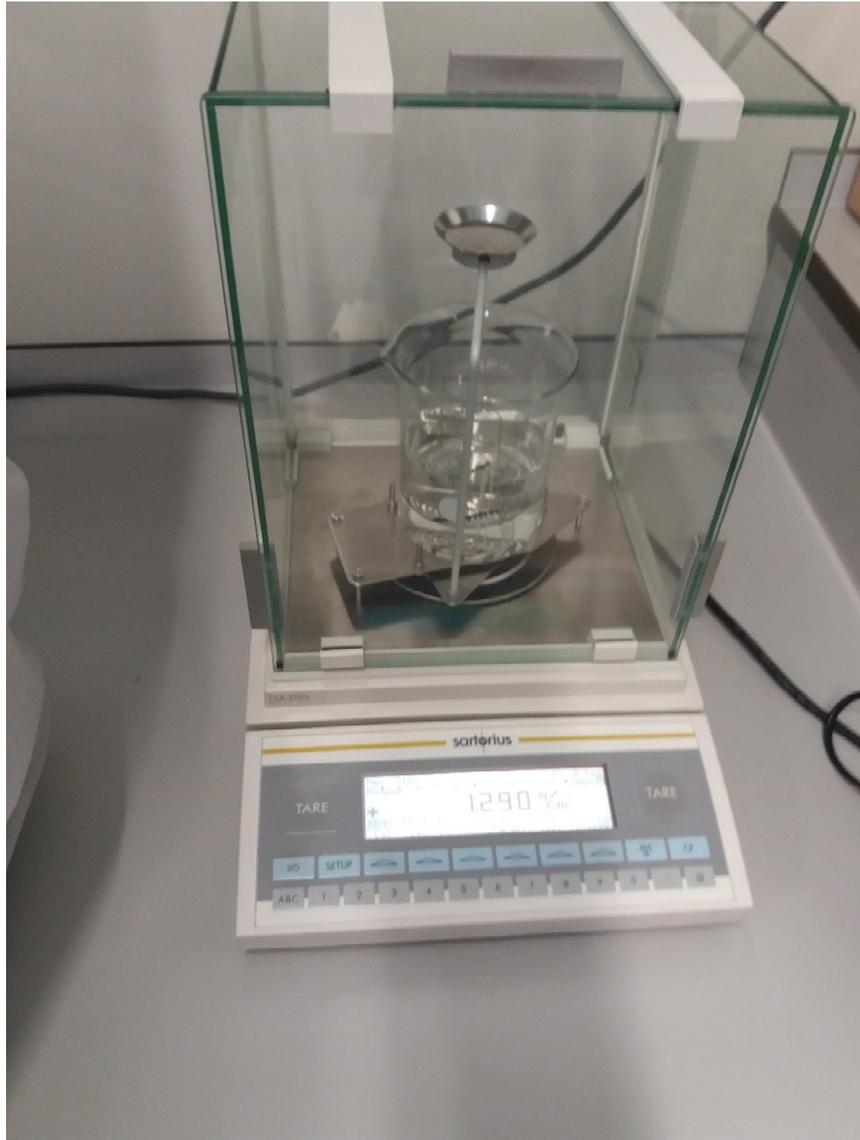


Figura 2-8. Báscula de precisión del departamento de Fabricación de la UPCT.

### ➤ Impresora

Para la obtención de las probetas se ha utilizado una impresora LEMONBOT fabricada por *LemonMaker* y que pertenece al *Departamento de Fabricación de la Universidad Politécnica de Cartagena*. En la figura 2-9 se muestran las especificaciones de esta impresora 3D.

<b>Fabricante:</b> LemonMaker
<b>Estado:</b> Available for sale
<b>Uso:</b> Doméstico
<b>Tecnología:</b> FDM - FFF
<b>Materiales:</b> PLA, ABS, PVA (Polivinil Alcohol)
<b>Tamaño máximo de impresión:</b> 225x145x150 mm
<b>Extrusor:</b> 2
<b>Tipo de 'hot end':</b> MK9
<b>Tamaño de filamento:</b> 1,75 mm
<b>Diámetro de boquilla:</b> 0,40 mm
<b>Espesor de capa:</b> 100 - 400 micras
<b>Base calefactable:</b> Yes
<b>Tipos de archivo:</b> .stl, gcode
<b>Conectividad:</b> USB, SD Card
<b>S.O. compatibles:</b> Windows, Mac, Linux
<b>Formato de entrega:</b> Plug&Play
<b>Peso:</b> 20,00 kg
<b>Tamaño de la impresora:</b> 465x320x375 mm

Figura 2-9. Características técnicas de la impresora LEMONBOT [18].

Algunas características de esta impresora han sido modificadas debido a problemas técnicos en su uso:

- Arduino Mega 2560 Rev3.
- Ramps 1.4.
- Firmware Marlin RC7.
- Drivers Pololu DRV8825 (32 micropasos).

En la figura 1-4 (apartado 1.3) aparece la impresora situada en el *Departamento de Fabricación*, en la figura 2-10 se observan los detalles interiores de la impresora, y en la figura 2-11 aparece la zona donde se sitúa la bobina con el material de impresión.

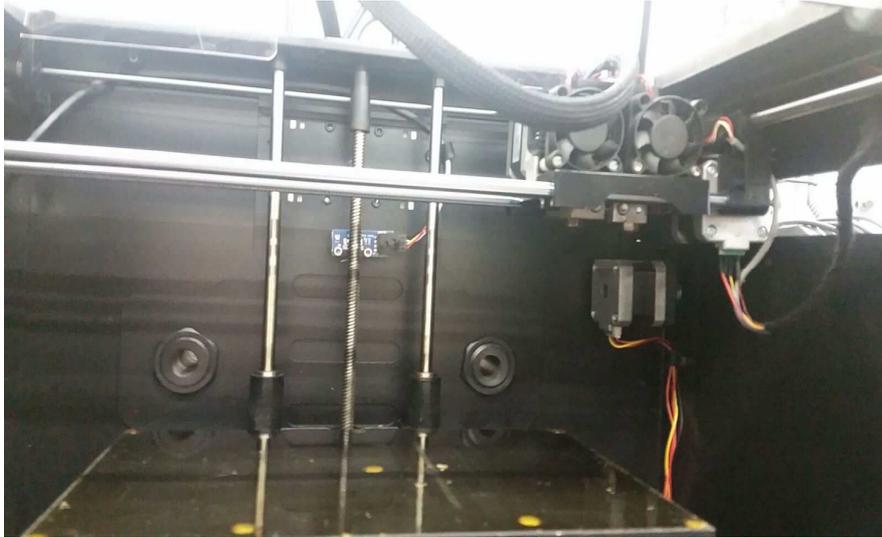


Figura 2-10. Interior de la impresora LEMONBOT.



Figura 2-11. Zona de colocación de la bobina de material en la impresora LEMONBOT.

#### ➤ Péndulo de Charpy

Finalmente, para la realización de los ensayos de resistencia al impacto, se ha utilizado el péndulo *Zwick Roell 5113E*, perteneciente a la *Universidad Politécnica de Cartagena* y situado en el *ELDI*. Las características de este aparato son las siguientes:

- Péndulo de 25 J.
- 390 mm de longitud.
- Ángulo inicial de 160°.
- Velocidad de impacto de 3,85 m/s.



Figura 2-12. Péndulo Zwick Roell 5113E perteneciente a la UPCT.

## 2.4. Resiliencia

Se define como resiliencia de un material a la energía de deformación por unidad de volumen que puede ser recuperada de un cuerpo deformado cuando el esfuerzo que causa la deformación cesa [15]. Para calcular esta energía, será necesario obtener el trabajo externo realizado para deformar el material hasta su límite elástico, es decir:

$$U_r = \int_0^{\varepsilon_y} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

Particularizando esta integral sobre una probeta de material elástico lineal sometida a tensión axial uniforme [15]:

$$U_r = \frac{W}{V} = \frac{1}{2V} (A\sigma_e) \frac{\sigma_e L}{E} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_e^2}{E}$$

Siendo:

- A: área transversal de la probeta.
- L: longitud de la probeta.
- V: volumen de la probeta.
- $\sigma_e$ : límite elástico.
- E: módulo de Young.

En cambio, si se quiere calcular la resiliencia a partir de los resultados de un ensayo, como el péndulo de *Charpy* o el método *Izod*, la ecuación, en términos de energía absorbida y dimensiones de la probeta quedaría del siguiente modo [15]:

$$U_r = \frac{E_a}{S_r}$$

Siendo:

- $E_a$  la energía absorbida por la probeta, que es igual a la energía potencial perdida por el péndulo en su caída.
- $S_r$  la sección de rotura de la probeta.

En ocasiones, el concepto de resiliencia puede confundirse con el de tenacidad. La tenacidad cuantifica la energía almacenada por el material antes de la rotura. En cambio, la resiliencia sólo tiene en cuenta la energía absorbida por el material durante la deformación elástica [15]. Esta deformación puede quedar más clara si se observan ambas magnitudes visualizándolas en la curva tensión-deformación, mostrada en la figura 2-13.

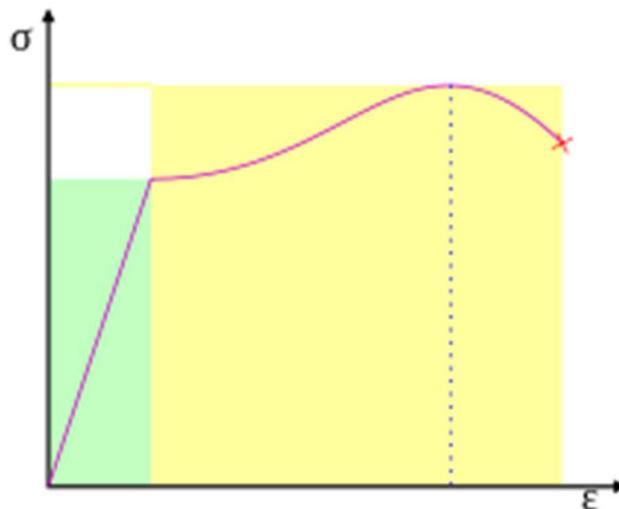


Figura 2-13. Curva tensión deformación [15].

La tenacidad es el área bajo la curva tensión-deformación, comprendida desde la deformación nula hasta el límite de rotura (zona amarilla de la figura 2-13). La resiliencia, sin embargo, abarca el área bajo la curva desde el origen hasta el límite de proporcionalidad elástica (zona verde de la figura 2-13).

Este pequeño resumen permite conocer el concepto de resiliencia y su cálculo teórico. En el siguiente apartado, se observará como la norma aporta condiciones y fórmulas específicas para la realización de los ensayos.

## 2.5. Ensayo

La norma UNE 179-1[16] proporciona las directrices necesarias sobre cómo realizar correctamente el ensayo de resistencia al impacto. Es necesario conocer dos aspectos fundamentales: forma y dimensiones de la probeta y cálculo de la resiliencia.

### 2.5.1. Probeta

Según el tipo de compuesto y el proceso de fabricación de la probeta, la norma distintos tipos de probetas con diferentes dimensiones, tal y como indica la figura 2-14.

Tipo de probeta	Longitud <sup>a</sup> <i>l</i>	Anchura <sup>a</sup> <i>b</i>	Espesor <sup>a</sup> <i>h</i>	Distancia entre apoyos <i>L</i>
1	80 ± 2	10,0 ± 0,2	4,0 ± 0,2	62 <sup>+0,5</sup> <sub>-0,0</sub>
2 <sup>b</sup>	25 <i>h</i>	10 o 15 <sup>c</sup>	3 <sup>d</sup>	20 <i>h</i>
3 <sup>b</sup>	11 <i>h</i> o 13 <i>h</i>			6 <i>h</i> u 8 <i>h</i>

<sup>a</sup> Las dimensiones de las probetas (espesor, *h*, anchura, *b* y longitud, *l*) se definen de acuerdo con:  $h < b < l$ .  
<sup>b</sup> Las probetas tipo 2 y tipo 3 únicamente deben utilizarse para los materiales descritos en el apartado 6.3.2.  
<sup>c</sup> 10 mm para materiales reforzados con estructura fina, 15 mm para estructuras de malla ancha (véase 6.3.2.2).  
<sup>d</sup> Espesor recomendado. Si la probeta se corta de una lámina o de una pieza, *h*, debe ser igual al espesor de la lámina o pieza, inferior o igual a 10,2 mm de espesor (véase 6.3.1.2).

Figura 2-14. Tipos de probetas y dimensiones [16].

En este trabajo, y atendiendo a la clasificación mostrada en la figura 2-14, al obtenerse las probetas mediante extrusión, la probeta a utilizar será del tipo 1.

Una vez establecidas las dimensiones de la probeta, es necesario establecer si la probeta tiene entalla y en caso afirmativo elegir de qué tipo y con qué dimensiones (figura 2-15).

Designación del método <sup>a</sup>	Tipo de probeta	Dirección de impacto	Tipo de entalla	Radio del fondo de la entalla $r_N$ (véase la figura 5)	Anchura remanente, $b_N$ , en la base de la entalla (véase la figura 2)
ISO 179-1/1eA <sup>b</sup>	1	cara estrecha	A	0,25 ± 0,05	8,0 ± 0,2
ISO 179-1/1eB			B	1,00 ± 0,05	8,0 ± 0,2
ISO 179-1/1eC			C	0,10 ± 0,02	8,0 ± 0,2
ISO 179-1/1eU <sup>b</sup>		sin entalla			
ISO 179-1/1fU <sup>c</sup>		cara ancha	sin entalla		

<sup>a</sup> Si las probetas se obtienen de láminas o productos, debe añadirse el espesor de la lámina o producto a la designación. Las probetas no reforzadas no deben ensayarse con la superficie mecanizada sometida a tensión.  
<sup>b</sup> Método recomendado.  
<sup>c</sup> Especialmente para el estudio de los efectos de superficie (véase 6.3.1.1.3).

Figura 2-15. Dimensiones de la probeta según si tiene entalla o no [16].

Para este proyecto, la probeta será entallada, en su cara estrecha y con una entalla del tipo A. En la figura 2-16 aparece la probeta que es necesaria para este proyecto. El parámetro  $b_N$  se denomina anchura de la base remanente, y mide la anchura que hay hasta el pico de la entalla. Este parámetro, junto a la altura, será fundamental en el cálculo de la resiliencia.

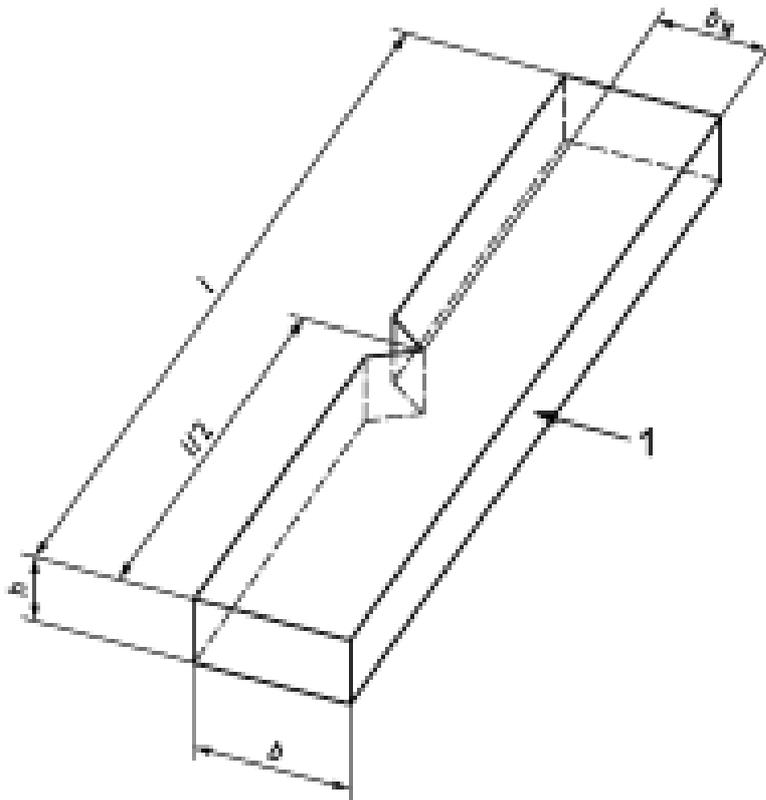


Figura 2-16. Tipo de probeta utilizada en este estudio [16].

En cuanto al número de probetas que debe ensayarse, la norma dice que será necesario ensayar un mínimo de diez probetas. En este ensayo se ha decidido realizar ocho probetas, debido al tamaño y dimensiones de la cama de la impresora, que hacen imposible obtener las diez probetas necesarias.

Una vez obtenidas las probetas, el procedimiento en el péndulo de Charpy ha de llevarse a cabo según los siguientes pasos:

- En primer lugar, ha de calcularse las pérdidas de energía por rozamiento con el aire. Para ello, se lanza el péndulo sin situar probeta alguna sobre la zona de impacto. Esta medida habrá que restarla a todos los ensayos que se realicen (obviamente, en las mismas condiciones). En este proyecto, este valor es de 0,06975 kJ.

- En segundo lugar, es necesario comprobar las dimensiones de las probetas. En este caso, al ser el FDM un proceso de gran precisión, basta con medir una probeta de cada serie para comprobar que sus dimensiones son las especificadas.
- Finalmente, se sitúa la probeta en su lugar correspondiente (62 cm entre apoyos) y se suelta el péndulo. Se registra el valor de energía y se aplica la corrección por rozamiento. Además, la norma también establece cuatro tipos de rotura en función de cómo quede la pieza tras el ensayo:
  - C: Rotura completa.
  - H: Rotura en bisagra.
  - P: Rotura parcial.
  - N: Sin rotura.

### 2.5.2. Cálculo de la resiliencia.

Obtener el valor de la resiliencia a partir de la energía es muy simple. Basta con aplicar la siguiente expresión.

$$a_{cA} = \frac{E_a}{h \cdot b_A} \cdot 10^3 \left( \frac{kJ}{m^2} \right)$$

Siendo:

- $E_a$  la energía absorbida corregida por rozamiento, en kJ.
- $h$  la altura de la probeta, en mm.
- $b_A$  la anchura de la base remanente, en mm.

Una vez obtenidos estos parámetros, la norma también especifica que se han de calcular dos parámetros estadísticos para estudiar cada serie de probetas iguales: la media y la varianza. Estos resultados estadísticos, además, permitirán aplicar a las medidas el criterio de rechazo de *Chauvenet*, con el fin de comprobar que las medidas tomadas son correctas.

## **2.6. Organización estudio.**

En este apartado se expone cómo se ha organizado este estudio para poder estudiar los tres parámetros de impresión que atañen a este proyecto: porcentaje de relleno, ángulo de tramado y número de perímetros.

### 2.6.1. Porcentaje de relleno.

Para estudiar la influencia de este parámetro en la resiliencia se han decidido, por un lado, tomar resultados o conclusiones del TFG [21], y, por otro lado, en función de dichas conclusiones, realizar series de impresión con diferentes porcentajes de relleno. Tras observar el TFG citado anteriormente, se concluye que la resiliencia es directamente proporcional al porcentaje de relleno, pero el aumento de resiliencia que se produce es prácticamente despreciable si lo comparamos con la influencia que tienen otros parámetros.

Por tanto, se decide estudiar únicamente los porcentajes 40%, 60% y 80%, a fin de corroborar la anterior afirmación. En la tabla adjunta se muestran las series de impresión realizadas para estudiar este parámetro.

% relleno	Ángulo	Número de perímetros	Probetas
40	45	1	8
60			8
80			8
40	45	2	8
60			8
80			8
			48

Tabla 2.1. Organización del estudio del porcentaje de relleno.

48 probetas serían necesarias, en principio, para corroborar las conclusiones anteriormente expuestas.

### 2.6.2. Ángulo de tramado.

Probablemente este parámetro sea el de mayor importancia en este estudio, debido a que la orientación de los filamentos depositados puede determinar la resiliencia que muestra la pieza. Es por ello que, para el estudio de este parámetro, se han elegido 5 ángulos (0, 23, 45, 68 y 90), tal y como se muestra en la tabla adjunta.

% relleno	Ángulos	Probetas
60	0	8
	23	8
	45	8
	68	8
	90	8
	0	8
	23	8
	45	8
	68	8
	90	8
	0	8
	23	8
	45	8
	68	8
	90	8
		120

Tabla 2.2. Organización inicial del estudio del ángulo de tramado.

### 2.6.3. Número de perímetros.

Este parámetro es el último que se estudia en este proyecto, en lo referente a la impresión. Se ha decidido estudiar las diferencias entre probetas con 1 perímetro, 2 y 3 perímetros. La tabla adjunta muestra la distribución de las probetas necesarias. Como es lógico, el estudio de los perímetros puede solaparse con los ángulos de tramado, a fin de reducir la cantidad de probetas a imprimir, y, a fin de cuentas, el coste final del proyecto. Es por ello por lo que cada ángulo de tramado se estudia con 1, 2 y 3 perímetros, para poder comprobar la influencia del número de perímetros en la resiliencia mientras el ángulo de tramado permanece constante.

% relleno	Ángulos	Número de perímetros	probetas
60	0	1	8
	23		8
	45		8
	68		8
	90		8
	0	2	8
	23		8
	45		8
	68		8
	90		8
	0	3	8
	23		8
	45		8
	68		8
	90		8
			120

Tabla 2.3. Organización inicial del estudio del número de perímetros.

Por tanto, esta tabla sería la que proporciona el número de probetas (120) a ensayar para conocer la influencia del ángulo de tramado y del número de perímetros.

### 2.6.4. Parámetros fijos.

Además de los parámetros de estudio, es necesario ajustar otros parámetros para poder llevar a cabo la impresión. Son los siguientes:

- Altura de capa: 0,3 mm.
- Velocidad de impresión: 60 mm/s.
- Número de capas superiores: 3.
- Número de capas inferiores: 3.
- Temperatura del cabezal: 190°C.

- Temperatura de cama o bandeja de impresión: 40°C.
- Patrón de relleno: rectilíneo.

Todos estos parámetros se ajustan en el *slicer*, es decir, en *Simplify 3D*.

### 2.6.5. Organización definitiva del ensayo.

Antes se ha comentado que es posible solapar ensayos para reducir el coste final del proyecto. Siguiendo con esta línea, si se observan las tablas anteriores, se observa que los ensayos correspondientes a 45°, tanto con 1 como con 2 perímetros y porcentaje de relleno 60%, serían realizados por duplicado. Por tanto, de las 48 probetas del estudio del porcentaje de relleno, se podrían eliminar las 2 series anteriormente mencionadas, pues ya están incluidas en las 120 probetas de la tabla 2.3. El número definitivo de probetas imprimir es 152, o lo que es lo mismo, 19 series de 8 probetas cada una, que proporcionarían la información necesaria para dar forma a este proyecto.

% relleno	Ángulo de tramado	Número de perímetros	Probetas
40%	45	1	8
	45	2	8
60	0	1	8
	23	1	8
	45	1	8
	68	1	8
	90	1	8
	0	2	8
	23	2	8
	45	2	8
	68	2	8
	90	2	8
	0	3	8
	23	3	8
	45	3	8
	68	3	8
90	3	8	
80	45	1	8
	45	2	8
Total			152

Tabla 2.4. Organización definitiva del proyecto.

# *Capítulo 3.*

## *Resultados y discusión*

### 3. Resultados y discusión.

En primer lugar, a todas las medidas obtenidas en los ensayos de resistencia al impacto se les aplica el criterio de rechazo de *Chauvenet*, ya que para el estudio se trabaja con el valor medio de cada serie. Teniendo en cuenta que al ser una muestra pequeña (menor de 10) se podrá rechazar como mucho una medida en cada serie ensayada. Una vez obtenidos los datos, éstos serán ordenados tal y como mejor convenga, para su posterior estudio.

Para una muestra de tamaño igual a 8, el criterio de rechazo de *Chauvenet* establece que las medidas correctas serán las que se encuentren en el siguiente intervalo:

$$x_{med} - 1,86 \cdot s \leq x \leq x_{med} + 1,86 \cdot s$$

<i>n</i>	<i>k(n)</i>	<i>n</i>	<i>k(n)</i>
2	1,15	15	2,13
3	1,38	20	2,24
4	1,54	25	2,33
5	1,65	30	2,40
6	1,73	40	2,48
7	1,80	50	2,57
8	1,86	100	2,81
9	1,92	300	3,14
10	1,96	500	3,29
		1000	3,48

Figura 3-1. Valores de "k" para aplicación del criterio de rechazo de *Chauvenet* [36].

En caso de rechazar una medida, el valor de k, tal y como indica la figura 3-1, sería 1,8.

Por otro lado, es necesario mencionar que prácticamente todas las probetas sufrieron durante su ensayo una rotura completa o de tipo C, a excepción de algunas, que sufrieron una rotura en bisagra o de tipo H y que posteriormente se explicará el porqué de este hecho.

### 3.1. Influencia del porcentaje de relleno.

Antes de comenzar, es necesario aclarar el sistema de nomenclatura seguido en este proyecto. Para cada probeta, en primer lugar aparece el porcentaje de relleno ( $x\%$ ), seguido del número de perímetros ( $xp$ ) y finalmente aparece el ángulo de tramado ( $\alpha$ ). Así, una pieza con ángulo con  $40\%$  de relleno, 1 perímetro y ángulo de tramado  $45^\circ$  será referida como  $40\%1p45$ .

Para observar la influencia del porcentaje de relleno en la resiliencia, se toman los datos de las probetas que posean el mismo ángulo de tramado y el mismo número de perímetros, observando la variación de la resiliencia con los distintos porcentajes de relleno usados. En las imágenes se aprecia claramente la diferencia que hay entre las probetas con menos relleno y las que más.

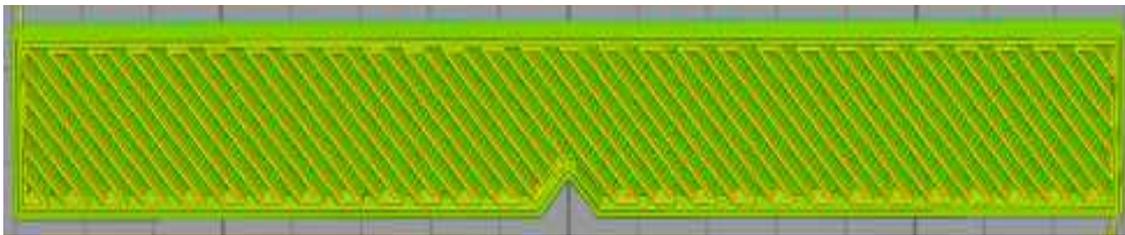


Figura 3-2.  $40\%2p45$ .

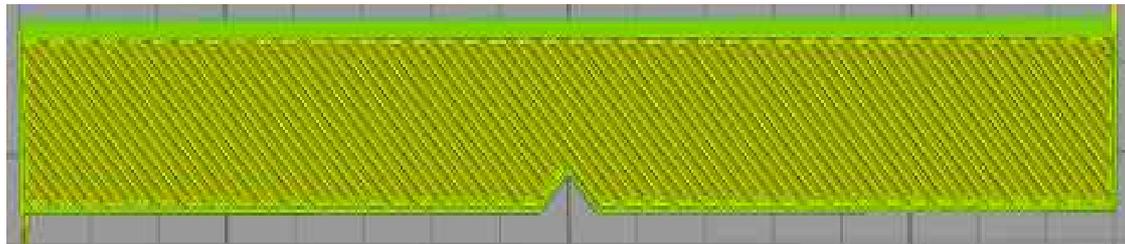


Figura 3-3.  $60\%1p45$ .

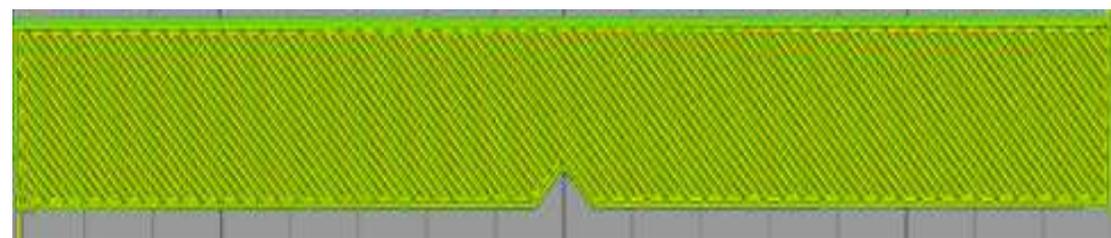


Figura 3-4.  $80\%1p45$ .

Para el estudio de la influencia del porcentaje de relleno, se toman en primer lugar un ángulo de tramado de  $45^\circ$  y 1 perímetro, a partir de los resultados se formulará una hipótesis que deberá ser refutada con el segundo caso, que consiste en el mismo ángulo de tramado, pero con 2 perímetros.

A continuación, de manera gráfica se muestran los datos obtenidos en estos 6 ensayos.

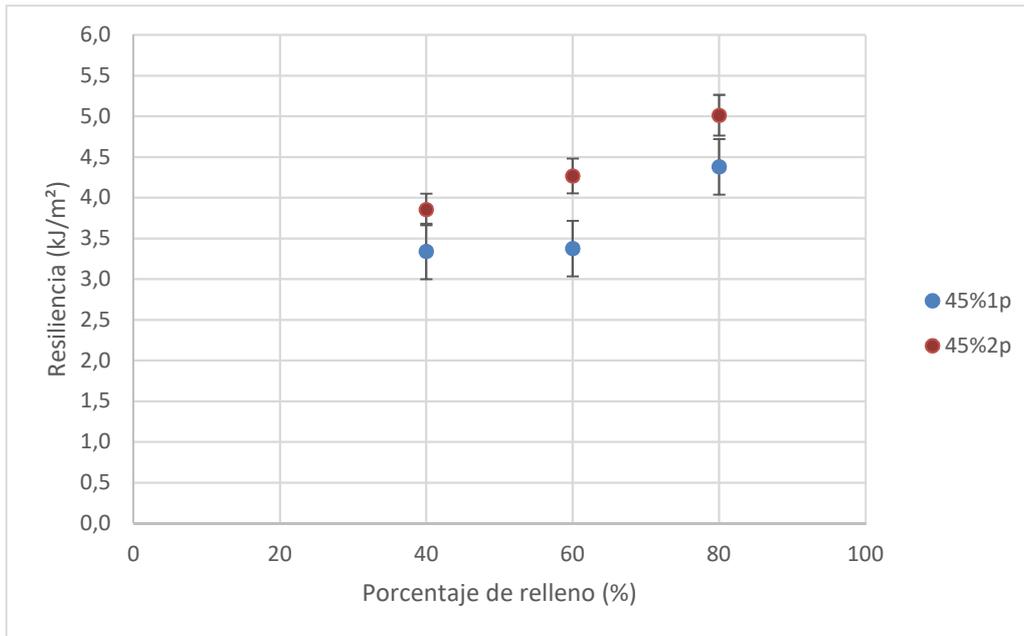


Figura 3-5. Resiliencia en función del porcentaje de relleno.

En la siguiente tabla aparecen los datos medios obtenidos en el estudio de la influencia del porcentaje de relleno. En ellos se observa que existe una variación no muy grande (alrededor de 1 kJ/m<sup>2</sup>) entre el mínimo porcentaje de relleno y el máximo.

Ángulo de tramado	Número de perímetros	% relleno	Resiliencia (kJ/m <sup>2</sup> )
45°	1	40	3,34
		60	3,38
		80	4,38
	2	40	3,86
		60	4,27
		80	5,01

Tabla 3.1. Resultados del estudio del porcentaje de relleno.

Esta variación muestra una tendencia aparentemente lineal, sobre todo en las medidas tomadas con dos perímetros, tal y como se aprecia en el siguiente gráfico.

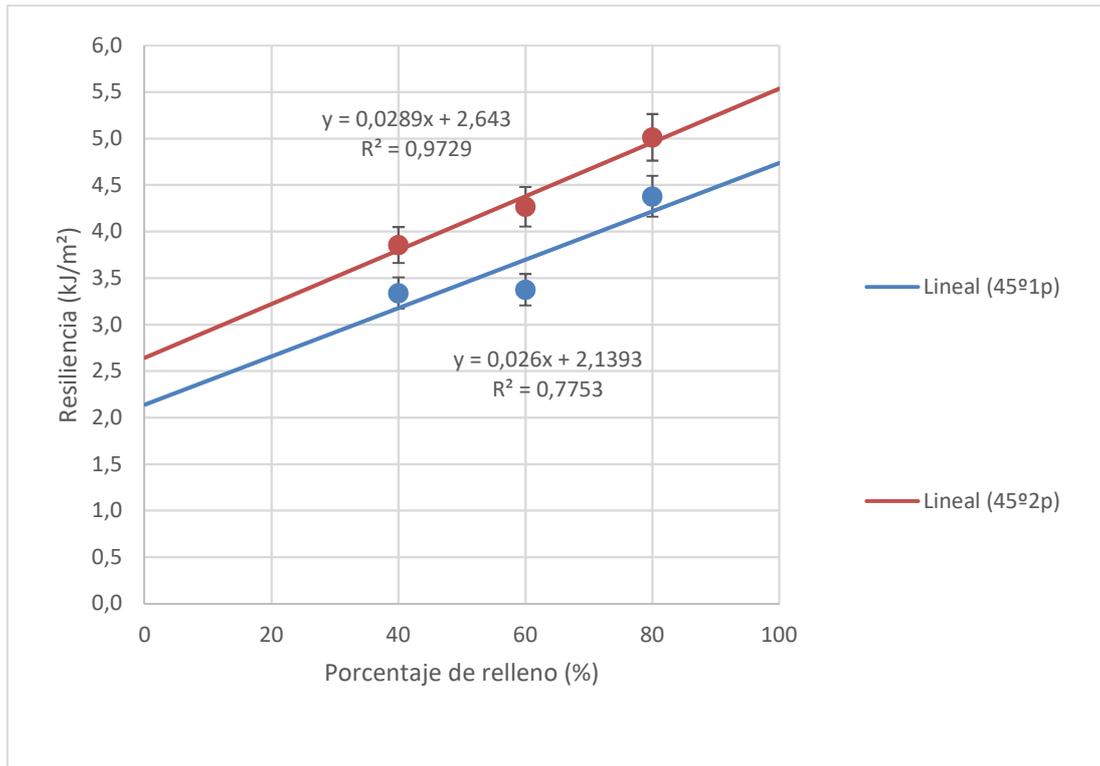


Figura 3-6. Gráfica Resiliencia- Porcentaje de relleno.

Tal y como se afirmaba anteriormente, la tendencia lineal, aunque en el primer caso no tiene un ajuste que sea demasiado bueno, en la segunda serie representada si se confirma esta tendencia lineal. En vista de estos resultados, como primera conclusión de este experimento puede concluirse que la influencia del porcentaje de relleno en la resiliencia sigue un patrón lineal ascendente, pues a medida que aumenta el porcentaje de relleno, aumenta la resiliencia.

Por otro lado, y de manera aproximada, se observa como un aumento del 20% de relleno supone una subida de resiliencia de aproximadamente 0,5 kJ/m<sup>2</sup>. También se observa como aumentar 1 perímetro supone un incremento de 0,3 kJ/m<sup>2</sup> aproximadamente. Posteriormente se comprobará este hecho. A partir de este valor se podrá concluir posteriormente cuál de los 3 parámetros estudiados es el más influyente en la resiliencia de la probeta.

### 3.2. Influencia del número de perímetros.

Para el estudio de la influencia del número de perímetros, es necesario fijar los otros dos parámetros de estudio, el ángulo de tramado y el porcentaje de relleno. El porcentaje de relleno se fija en 60%, y para cada ángulo (0°,23°,45°,68°,90) se toma el valor de resiliencia con 1, 2 y 3 perímetros. Esta distribución da lugar a 5 gráficos, que servirán para comprobar esta influencia. En las siguientes imágenes, se observa el detalle del número de perímetros en la simulación ofrecida por *Simplify 3D*.

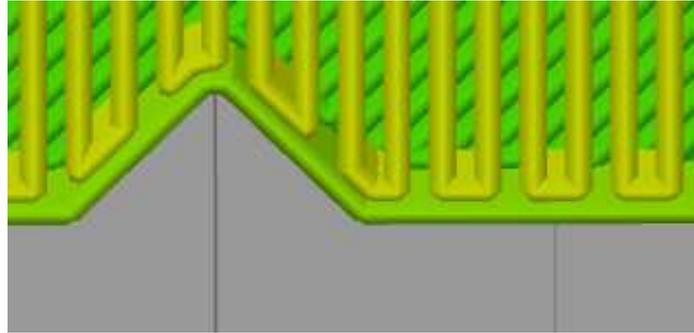


Figura 3-7. Detalle de probeta con un perímetro.

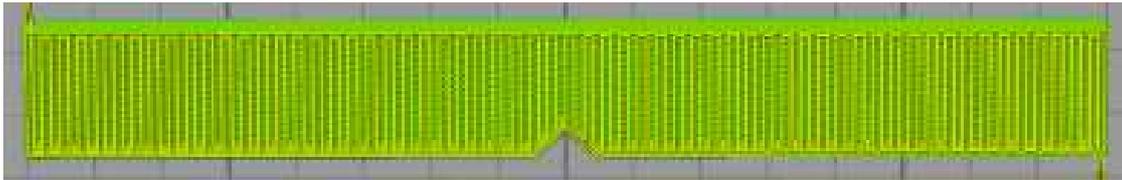


Figura 3-8. 60%1p0.

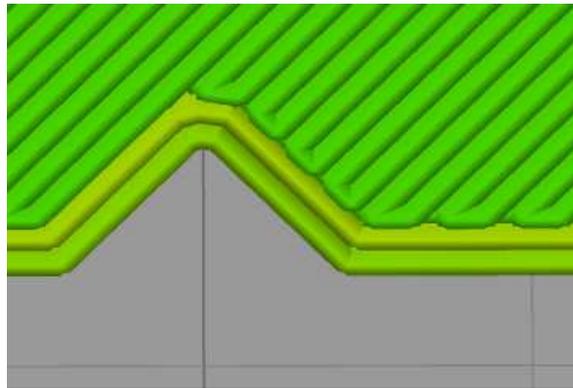


Figura 3-9. Detalle de probeta con 2 perímetros.

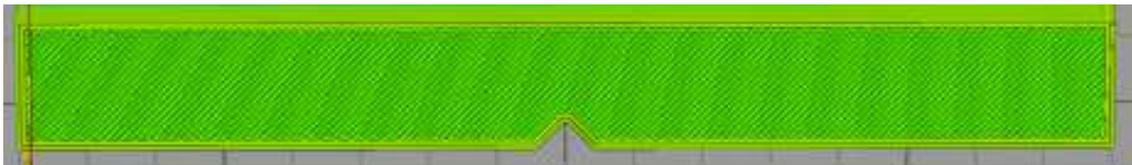


Figura 3-10. 60%2p0.

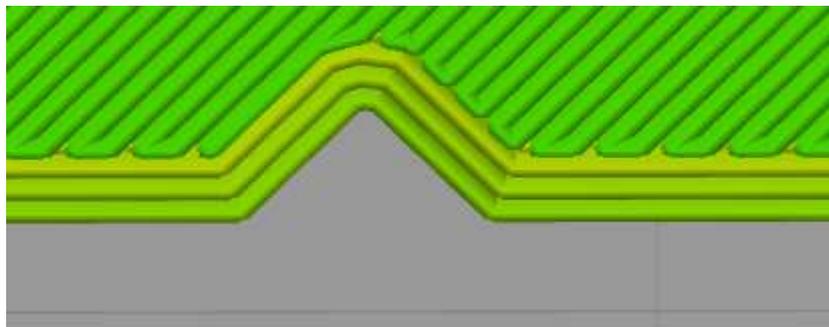


Figura 3-11. Detalle de probeta con 3 perímetros.

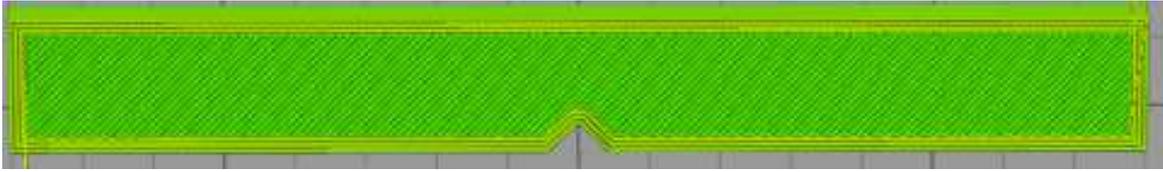


Figura 3-12. 60%3p0.

A continuación, de manera gráfica se muestran los datos obtenidos en los 15 ensayos correspondientes a este experimento. Como se dijo en el apartado de organización del estudio, estos 15 ensayos son los mismos que estudian la influencia del ángulo de tramado, pero ordenados de distinta forma.

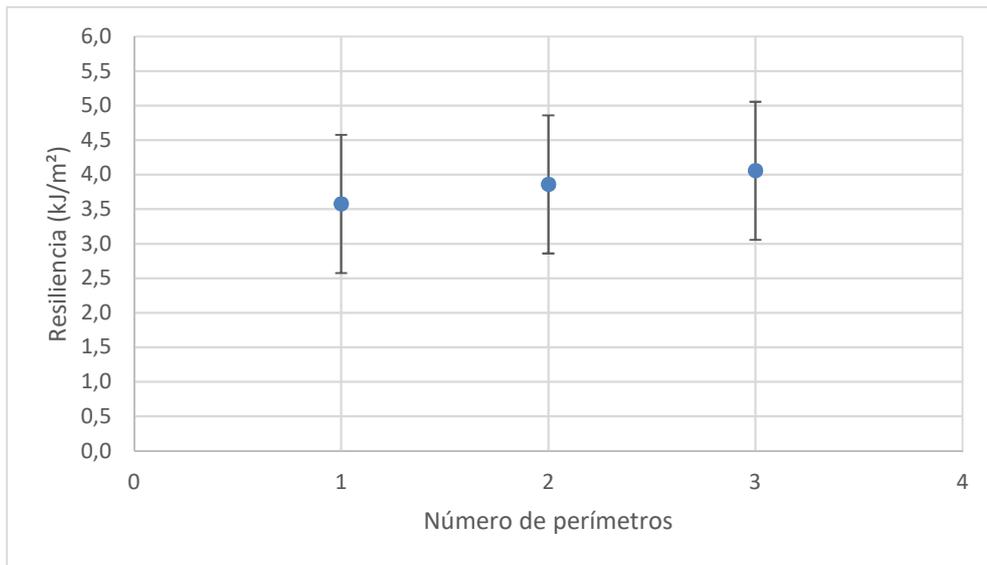


Figura 3-13. Resiliencia en función del número de perímetros con 60% de relleno y ángulo 0°.

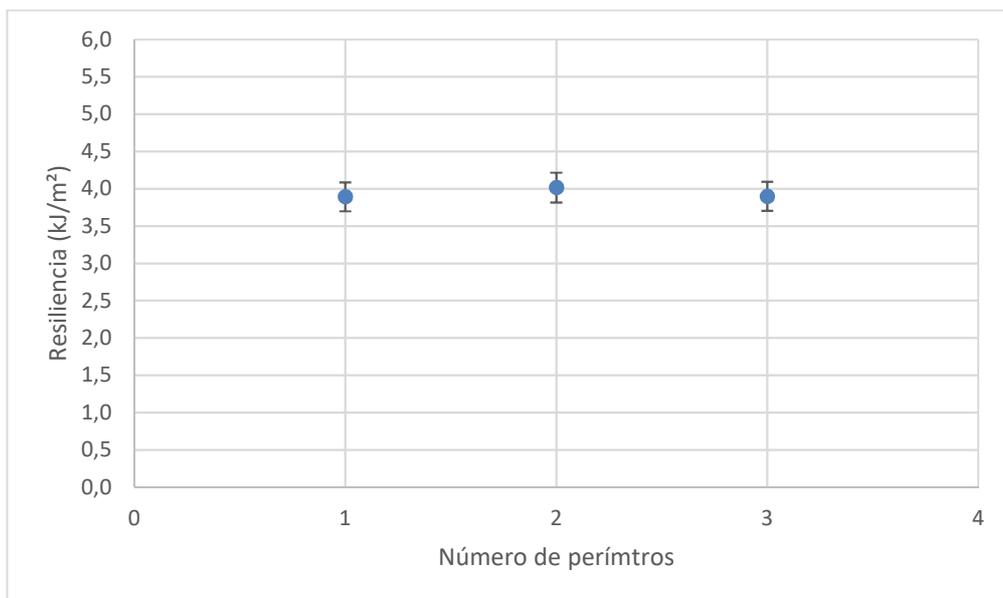


Figura 3-14. Resiliencia en función del número de perímetros con 60% de relleno y ángulo 23°.

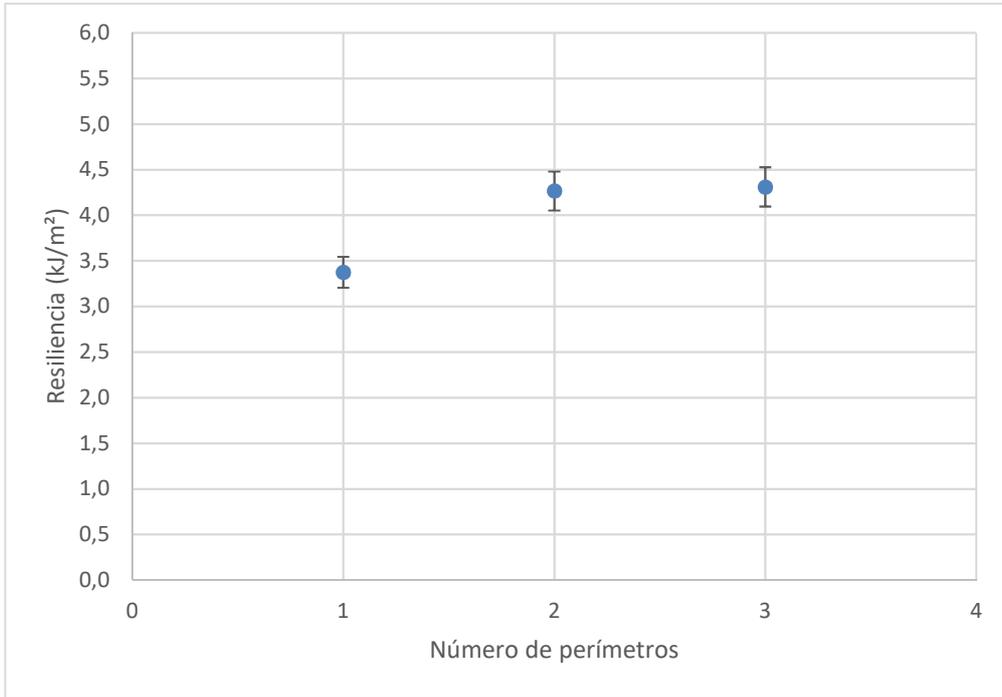


Figura 3-15. Resiliencia en función del número de perímetros con 60% de relleno y ángulo 45°.

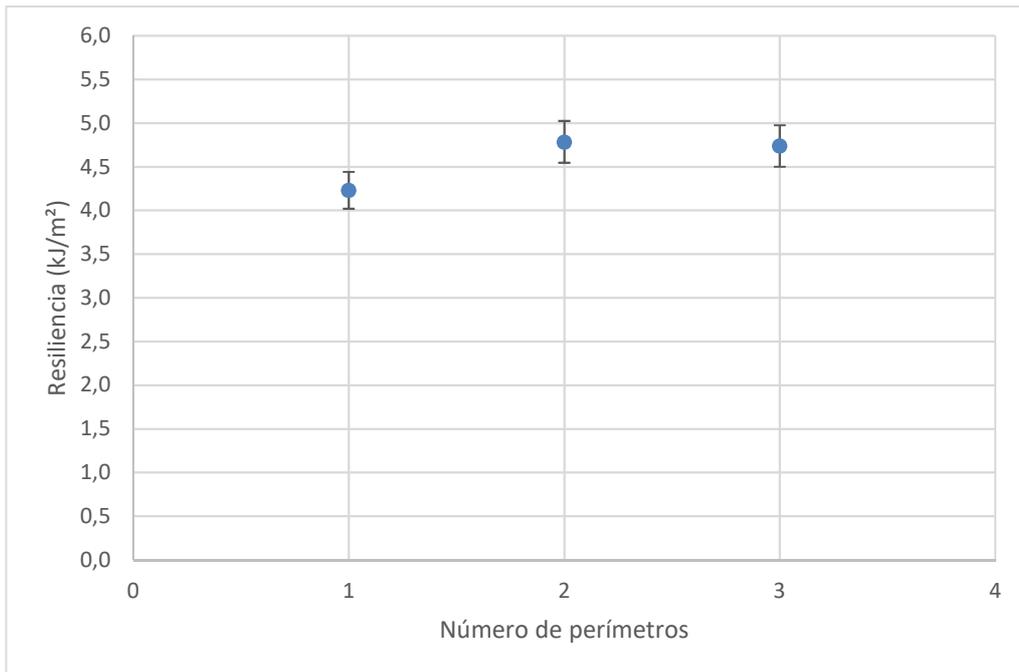


Figura 3-16. Resiliencia en función del número de perímetros con 60% de relleno y ángulo 68°.

En el siguiente gráfico, correspondiente a un ángulo de 90°, se sitúa el origen de abscisas en 5 kJ/m² debido a que los valores obtenidos en este experimento son bastante mayores a los anteriores. Esto significa que cuando el ángulo se aproxima a 90 los valores de resiliencia se incrementan extraordinariamente.

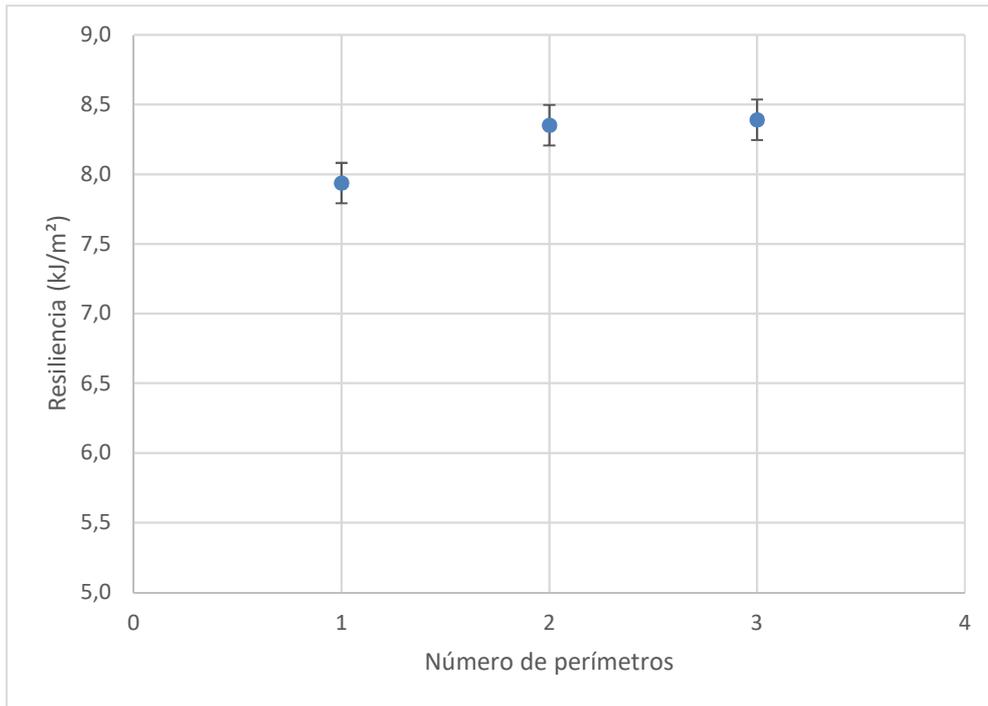


Figura 3-17. Resiliencia en función del número de perímetros con 60% de relleno y ángulo 90°.

En la siguiente tabla aparecen los datos medios obtenidos en el estudio de la influencia del número de perímetros. En ellos se observa que la variación es bastante similar al anterior caso (alrededor de 1 kJ/m²) entre el mínimo número de perímetros (1 perímetro) y el máximo número de perímetros (3 perímetros).

% relleno	Ángulo de tramado(°)	Número de perímetros	Resiliencia (kJ/m²)
60	0	1	3,57
		2	3,86
		3	4,05
	23	1	3,89
		2	4,02
		3	3,90
	45	1	3,38
		2	4,27
		3	4,31
	68	1	4,23
		2	4,79
		3	4,74
90	1	7,94	
	2	8,35	
	3	8,39	

Tabla 3.2. Resultados del estudio del número de perímetros.

Se observa una tendencia aproximadamente cuadrática. A continuación, se muestran las representaciones de las tendencias establecidas. Las líneas de tendencia comienzan en 1 perímetro, pues un valor por debajo de 1 no tiene sentido físico.

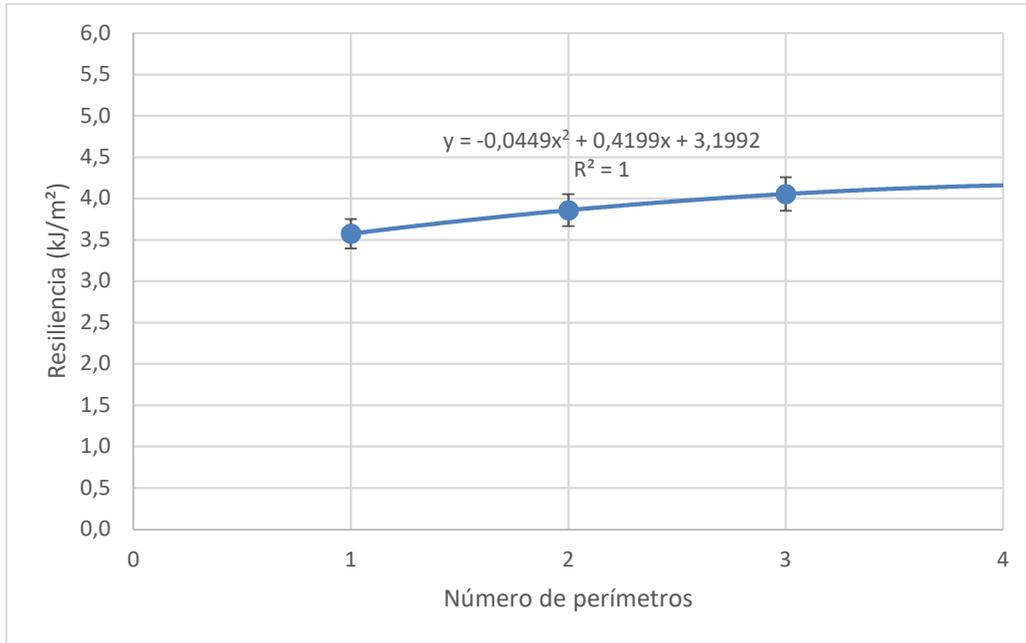


Figura 3-18. Influencia del número de perímetros con ángulo de tramado 0° y 60% de relleno.

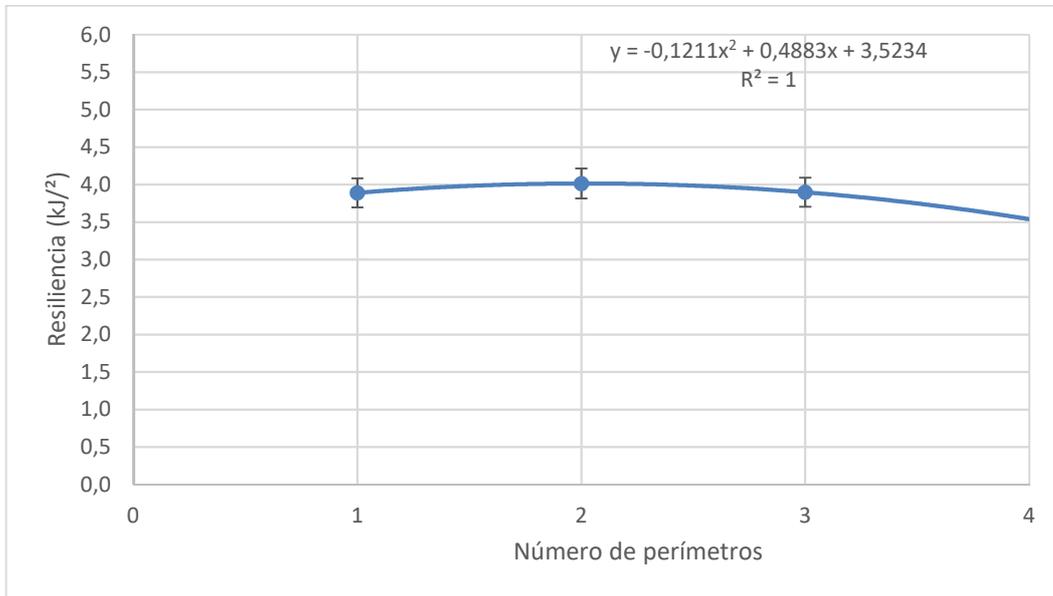


Figura 3-19. Influencia del número de perímetros con ángulo de tramado 23° y 60% de relleno.

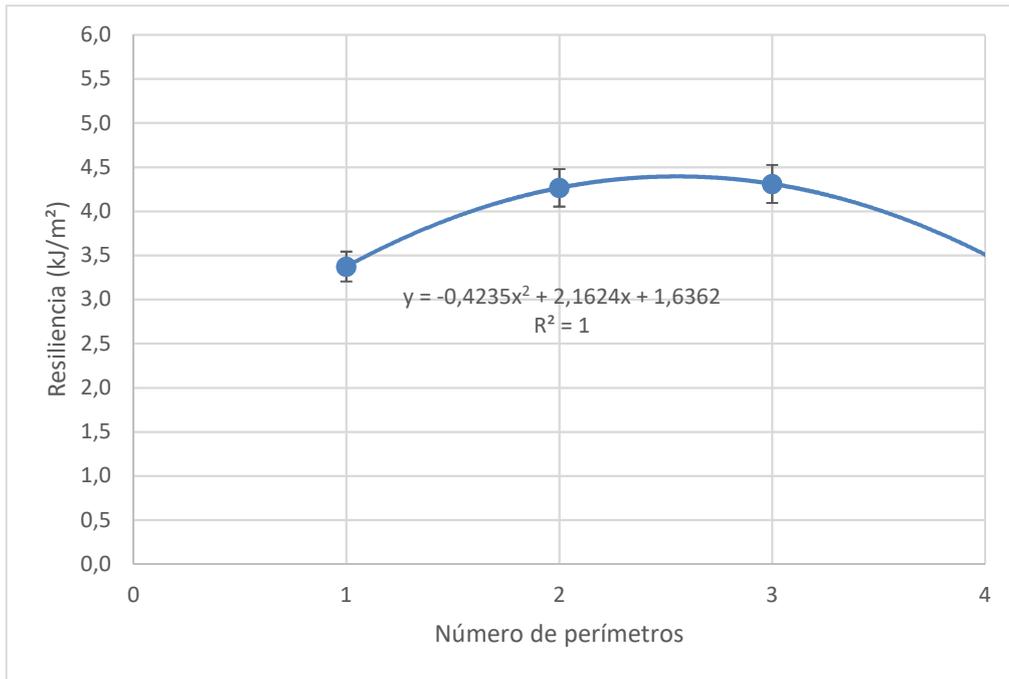


Figura 3-20. Influencia del número de perímetros con ángulo de tramado 45° y 60% de relleno.

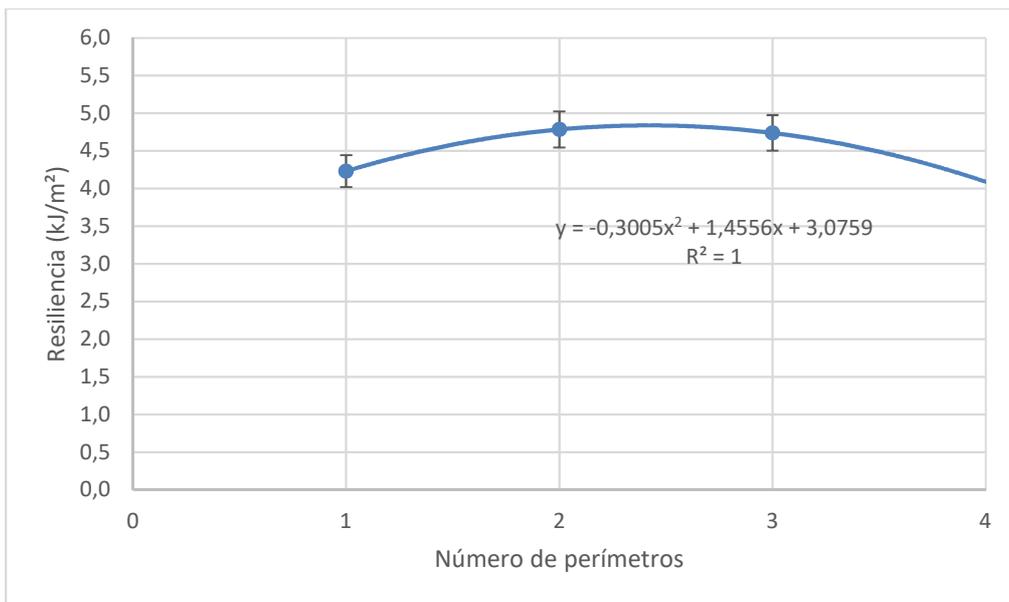


Figura 3-21. Influencia del número de perímetros con ángulo de tramado 68° y 60% de relleno.

En el siguiente gráfico, correspondiente a un ángulo de 90°, se sitúa el origen de abscisas en 5 kJ/m² debido a que los valores obtenidos en este experimento son bastante mayores a los anteriores. Esto significa que cuando el ángulo se aproxima a 90 los valores de resiliencia se incrementan extraordinariamente.

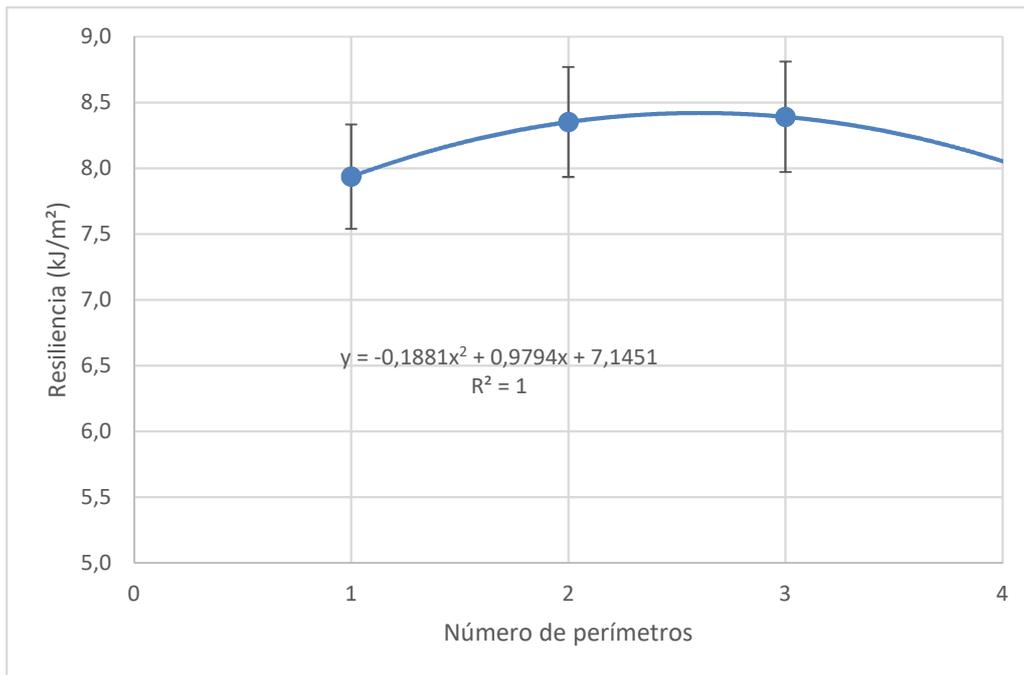


Figura 3-22. Influencia del número de perímetro con ángulo de tramado 90° y 60% de relleno.

Sin embargo, se aprecia en casi todos los casos que el incremento del número de perímetros no supone un incremento proporcional de la resiliencia, sino que su incremento va atenuándose. Es por ello que se opta por un ajuste cuadrático, que muestra como a partir de un número determinado de perímetros la resiliencia no aumenta tanto o incluso disminuye.

A continuación, se realiza una representación agregada de los resultados obtenidos donde se puede apreciar que, además de atenuarse el incremento de resiliencia a medida que aumenta el número de perímetros, el incremento de resiliencia que produce el aumento de perímetros es bastante pequeño si lo comparamos con el aumento que produce la variación del ángulo de tramado, el cual se observa en la representación de la serie correspondiente a 90°.

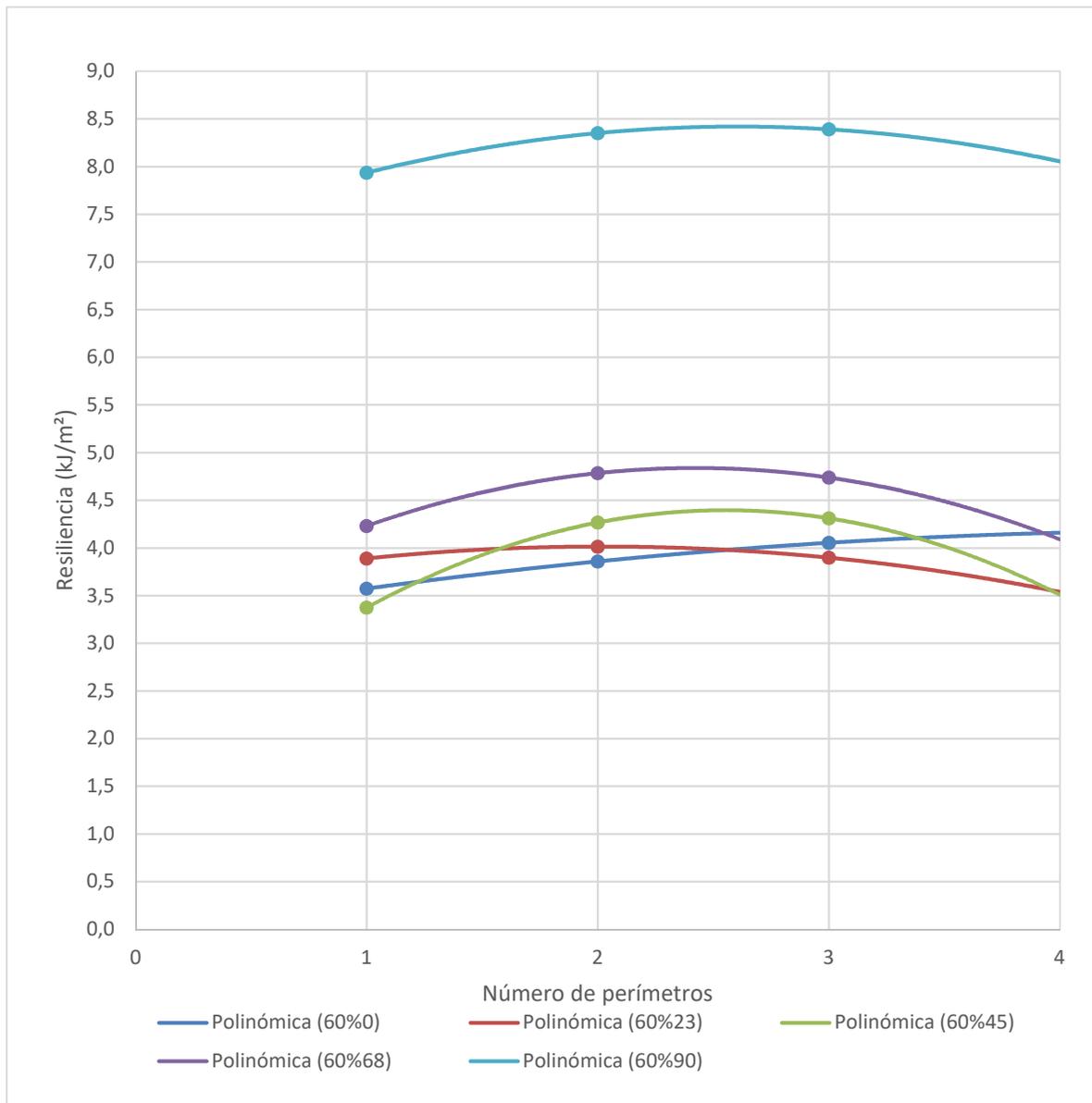


Figura 3-23. Representación conjunta de los resultados del estudio resiliencia-número de perímetros.

Como conclusión de este estudio se puede afirmar que a medida que se incrementa el número de perímetros, se incrementa la resiliencia, pero hasta cierto punto. Es por ello que la relación de incremento no es lineal, sino cuadrática.

Además, se observa como por cada perímetro que se añade a la probeta, la resiliencia aumenta alrededor de 0,2 kJ/m<sup>2</sup>. Este aumento es prácticamente la mitad del que produce un aumento del 20% en el porcentaje de relleno. Por ello, parece claro que el porcentaje de relleno es más influyente que el número de perímetros. Otra cuestión importante es el aumento que se produce debido al ángulo de tramado. En probetas fabricadas con ángulos comprendidos entre 0° y 68°, las curvas se mantienen en un rango de resiliencia relativamente pequeño (3,3-4,8 kJ/m<sup>2</sup> aproximadamente), en cambio, cuando el ángulo de tramado asciende a 90°, se observa un extraordinario aumento de resiliencia, duplicando prácticamente su valor respecto a los anteriores experimentos. Este hecho será comprobado en el siguiente apartado.

### 3.3. Influencia del ángulo de tramado.

El ángulo de tramado probablemente sea el parámetro más influyente en la resiliencia del material. Esto es debido a que es el que proporciona la dirección de los filamentos del relleno interior de la probeta, que, a medida que se vaya haciendo más perpendicular al impacto, más resiliencia aportará a la pieza. O al menos eso es lo que dice la lógica. Mediante este estudio se pretende corroborar esta hipótesis. En las imágenes se muestran las simulaciones ofrecidas por *Simplify 3D* para un ángulo de  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Observando estas dos imágenes, se puede apreciar, que cualquier ángulo mayor de  $90$  o menor de  $0$  no es más que una repetición de algún ángulo comprendido entre  $0$  y  $90$ , variando el sentido de deposición del filamento, pero utilizando las mismas direcciones.

En las siguientes figuras se muestran gráficamente los resultados obtenidos en los 15 ensayos realizados. Son los mismos resultados que en el apartado de influencia del número de perímetros, pero ordenados de distinta forma.

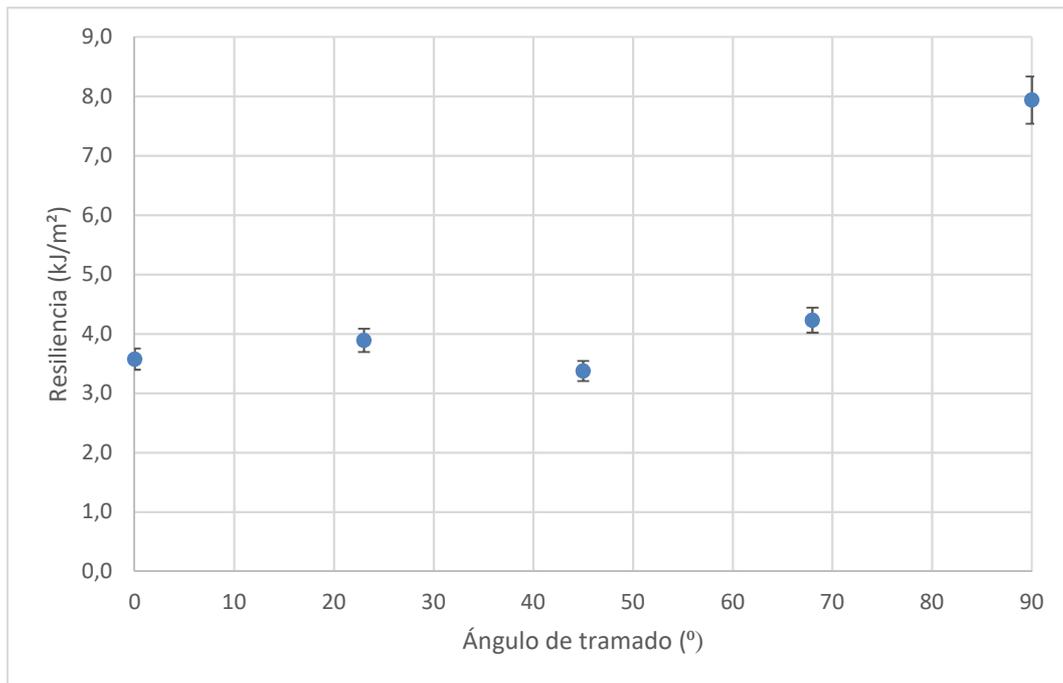


Figura 3-24. Resiliencia en función del ángulo de tramado con 60% de relleno y 1 perímetro.

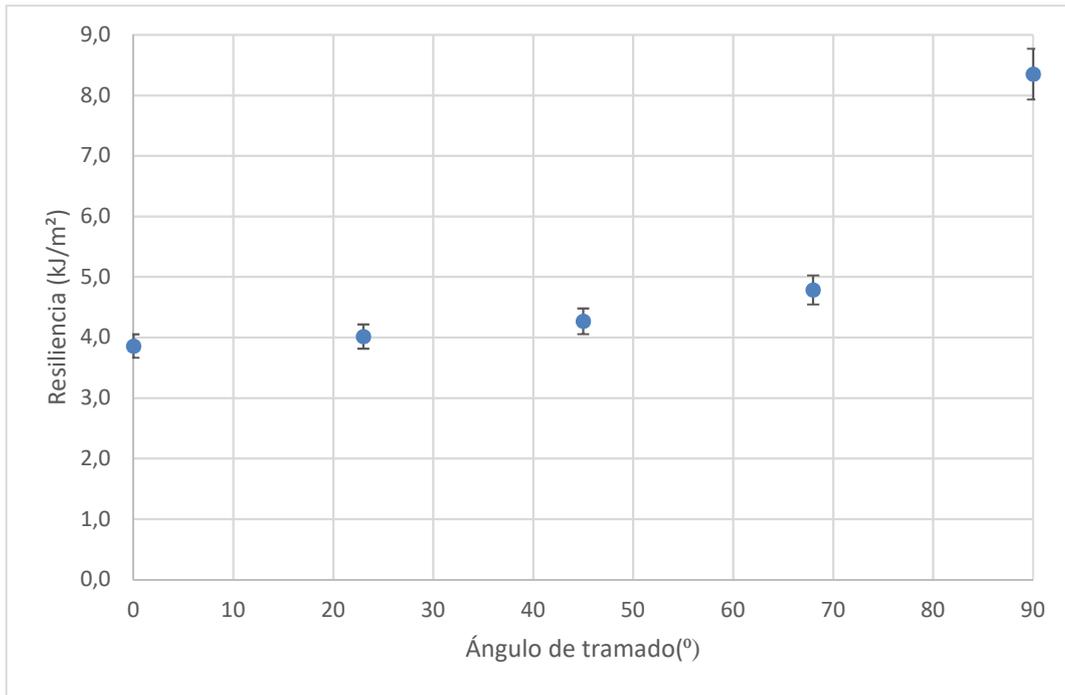


Figura 3-25. Resiliencia en función del ángulo de tramado con 60% de relleno y 2 perímetros.

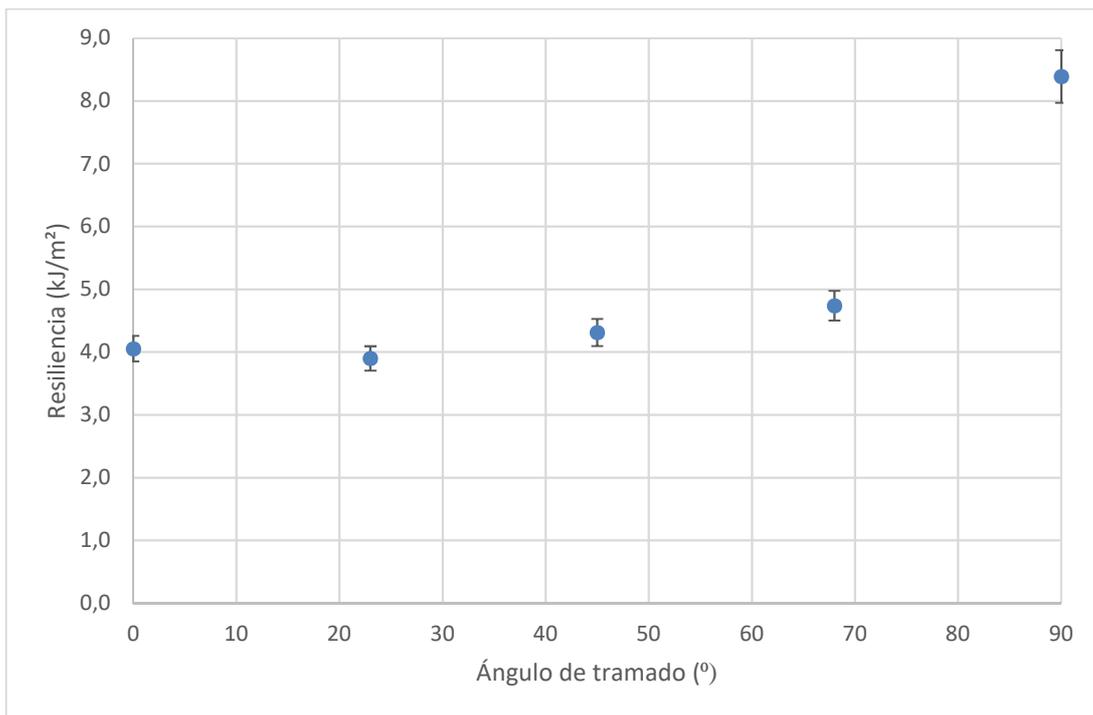


Figura 3-26. Resiliencia en función del ángulo de tramado con 60% de relleno y 3 perímetros.

En las siguientes figuras puede observarse claramente la diferencia en la disposición de las fibras cuando el ángulo de tramado es 0° y cuando es 90°. En 0°, las fibras son paralelas a la zona de impacto, mientras que en 90° son totalmente perpendiculares.

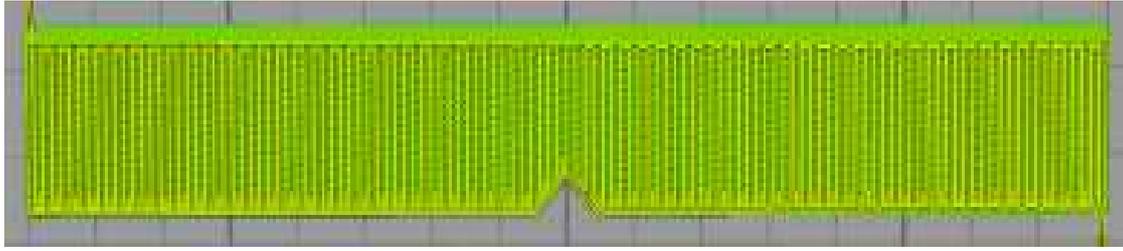


Figura 3-27. 60%lp0.

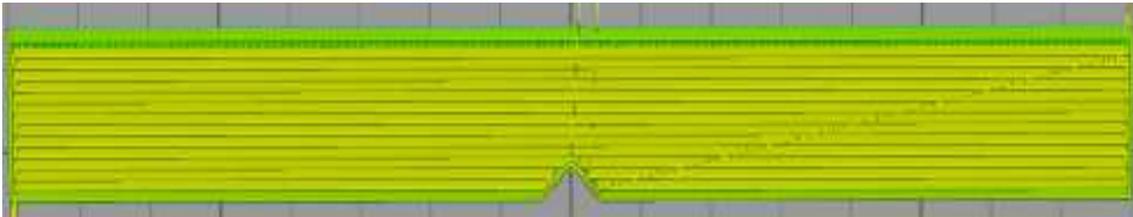


Figura 3-28. 60%lp90.

A continuación, se presentan los datos que permiten obtener la influencia del ángulo de tramado en la resiliencia de las probetas estudiadas. Para un porcentaje de relleno fijo (60%), se tienen 1, 2 y 3 perímetros, dentro de los cuales se observan las variaciones de la resiliencia para cada ángulo de tramado utilizado.

% relleno	Número de perímetros	Ángulo de tramado	Resiliencia (kJ/m <sup>2</sup> )
60	1	0	3,57
		23	3,89
		45	3,38
		68	4,23
		90	7,94
	2	0	3,86
		23	4,02
		45	4,27
		68	4,79
		90	8,35
	3	0	4,05
		23	3,90
		45	4,31
		68	4,74
		90	8,39

Tabla 3.3. Resultados del estudio del ángulo de tramado.

En este caso, la tendencia observada es algo más compleja que las anteriores. Se observa que a través de los ángulos  $0^\circ$ ,  $23^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $68^\circ$  existe una variación no muy grande, del orden de  $0,3-0,5 \text{ kJ/m}^2$  por cada aumento de  $22,5^\circ$ , que al igual que en los estudios anteriores sobre el porcentaje de relleno y el número de perímetros, es pequeña pero significativa. Sin embargo, este orden de magnitud varía cuando el ángulo se acerca a  $90^\circ$ . En este caso, el salto de resiliencia es muy grande, del orden de unos  $4 \text{ kJ/m}^2$ . Esto se debe a que, a medida que el ángulo de tramado va acercándose a  $90^\circ$ , las líneas de tramado van quedando casi perpendiculares a la hendidura de la probeta, es decir, a la zona de impacto, alcanzando en  $90^\circ$  la condición de perpendicularidad. Por tanto, para poder modelizar la influencia del ángulo de tramado en la resiliencia, aparecen dos opciones:

- Ajuste exponencial: debido a la tendencia que muestran los datos se puede pensar que este ajuste es factible, pues tras mantener unos valores “casi constantes”, la resiliencia aumenta su valor repentinamente.
- Ajuste polinómico de grado 2: los valores muestran una tendencia que también podría ser polinómica.

A continuación, se comprobará en primer lugar si los datos se ajustan a un modelo exponencial, y, en si no fuese el caso, entonces se probará con un ajuste de tipo polinómico de grado 2.

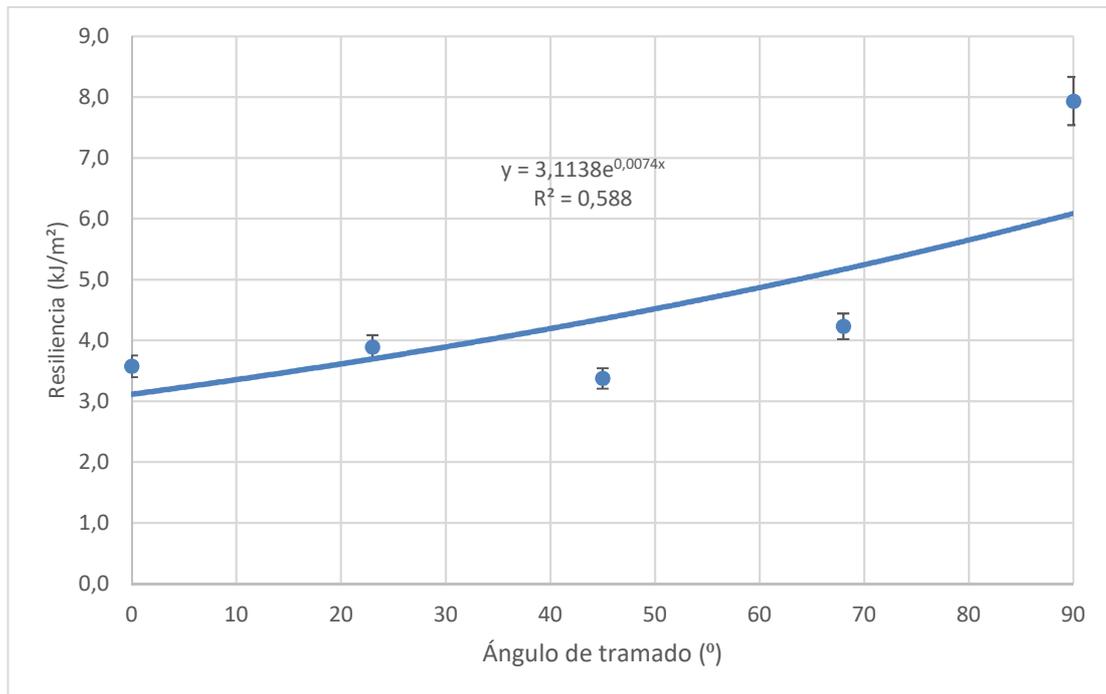


Figura 3-29. Ajuste exponencial de la relación resiliencia-ángulo de tramado con 60% de relleno y 1 perímetro.

El ajuste exponencial no es para nada preciso, pues muestra un valor de  $R^2$  muy bajo. Por tanto, la hipótesis del ajuste exponencial queda rechazada. A continuación, se prueba con ajuste de tipo polinómico de grado 2.

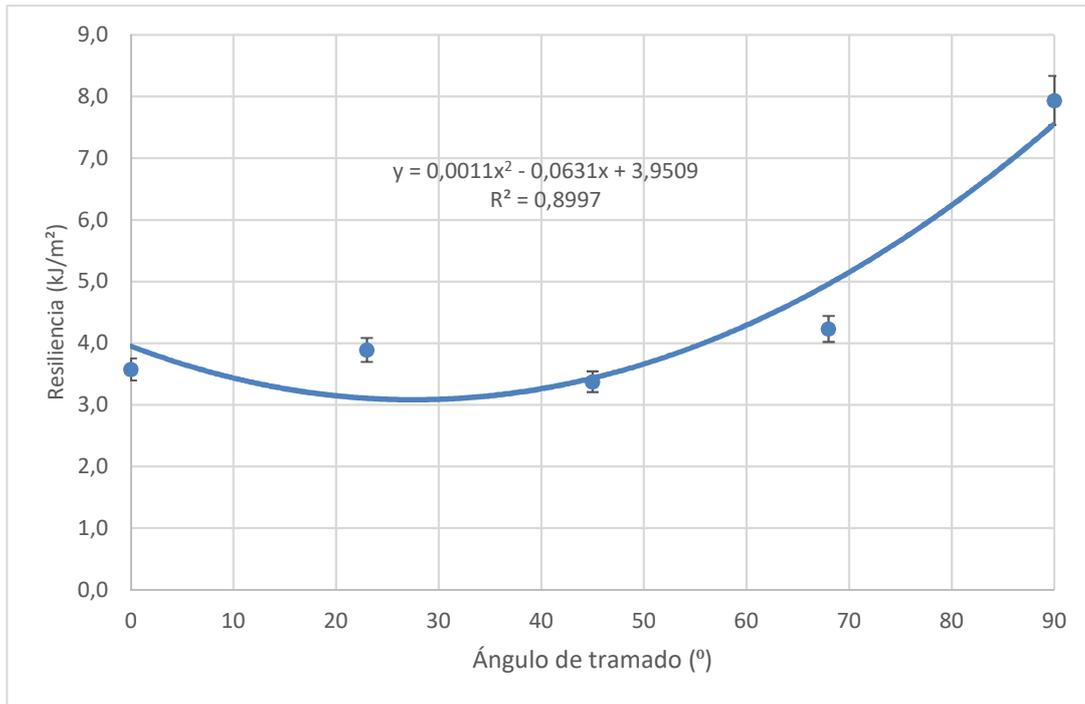


Figura 3-30. Influencia del ángulo de tramado con 1 perímetro y 60% de relleno.

En este caso, el ajuste es bastante bueno, con un valor de  $R^2$  de 0,8997. Por tanto, se tomará una tendencia polinómica de grado 2 ó cuadrática para ajustar esta correlación.

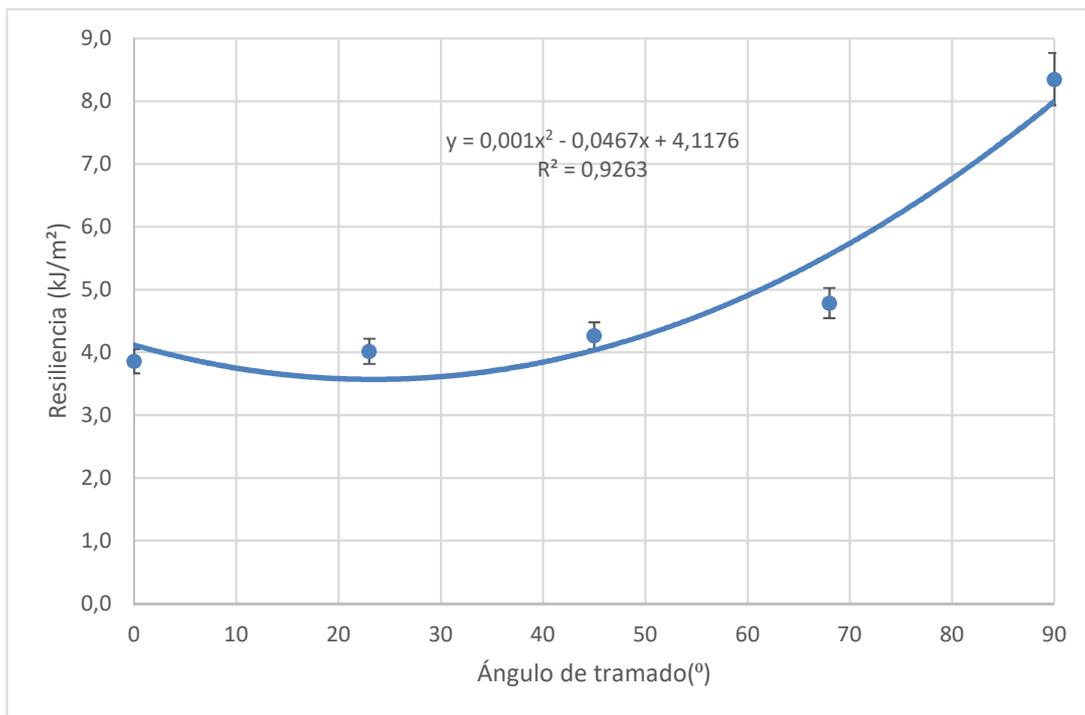


Figura 3-31. Influencia del ángulo de tramado con 2 perímetros y 60% de relleno.

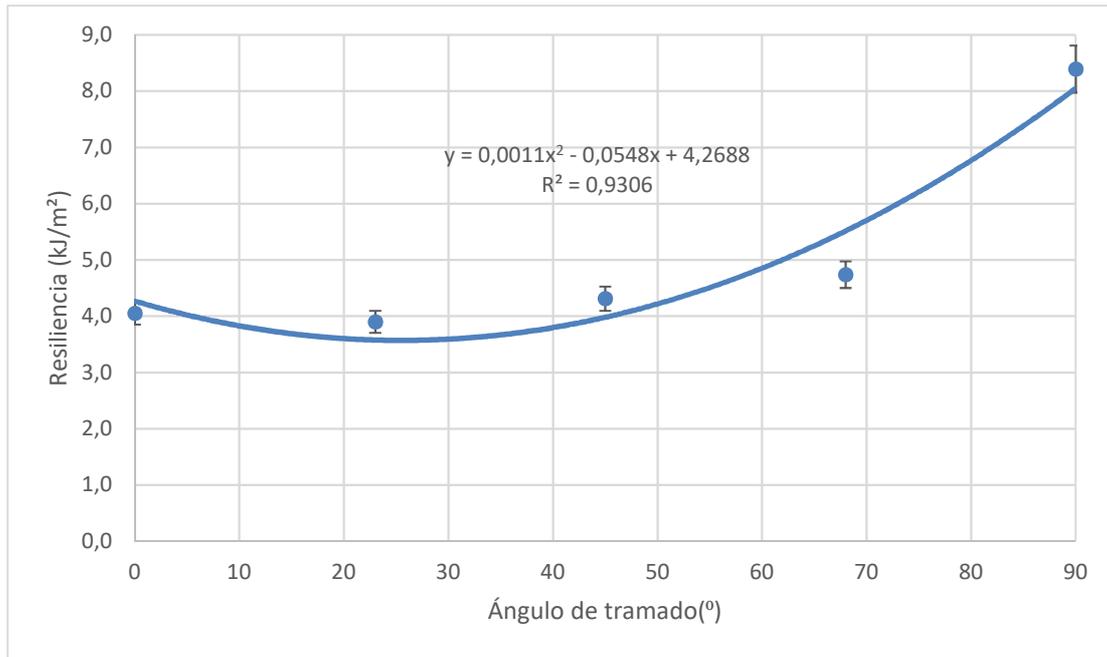


Figura 3-32. Influencia del ángulo de tramado con 3 perímetros y 60% de relleno.

Las gráficas muestran cómo el ajuste cuadrático es el más acorde a los resultados. Antes de obtener conclusiones, es necesario hablar sobre el tipo de rotura. Todas las probetas con ángulos de tramado entre 0° y 68° rompieron de manera completa. En cambio, varias de las probetas con ángulo de tramado 90° rompieron en bisagra o con rotura del tipo H. Que se produzca este hecho significa que la probeta absorbe tanta energía que la restante es incapaz de romper la probeta por completo, y, por tanto, la resiliencia de estas probetas es mayor. De hecho, son las probetas que rompen en bisagra las de mayor resiliencia, con valores de hasta 10,1 kJ/m². En las figuras 3-30 y 3-31 pueden observarse las roturas en bisagra producidas en las probetas con ángulo de tramado 90°, así como una rotura completa con ángulo de 23°, a fin de comparar los dos tipos de roturas.

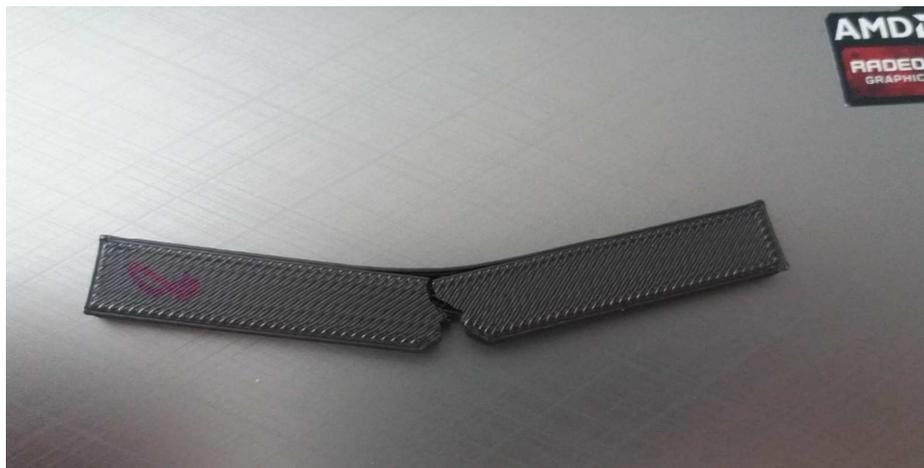


Figura 3-33. 60%2p90.



Figura 3-34. 60%1p23.

A continuación, se realizará una representación agregada de los resultados obtenidos para poder realizar una valoración de conjunto, y que posteriormente facilitará la obtención de conclusiones.

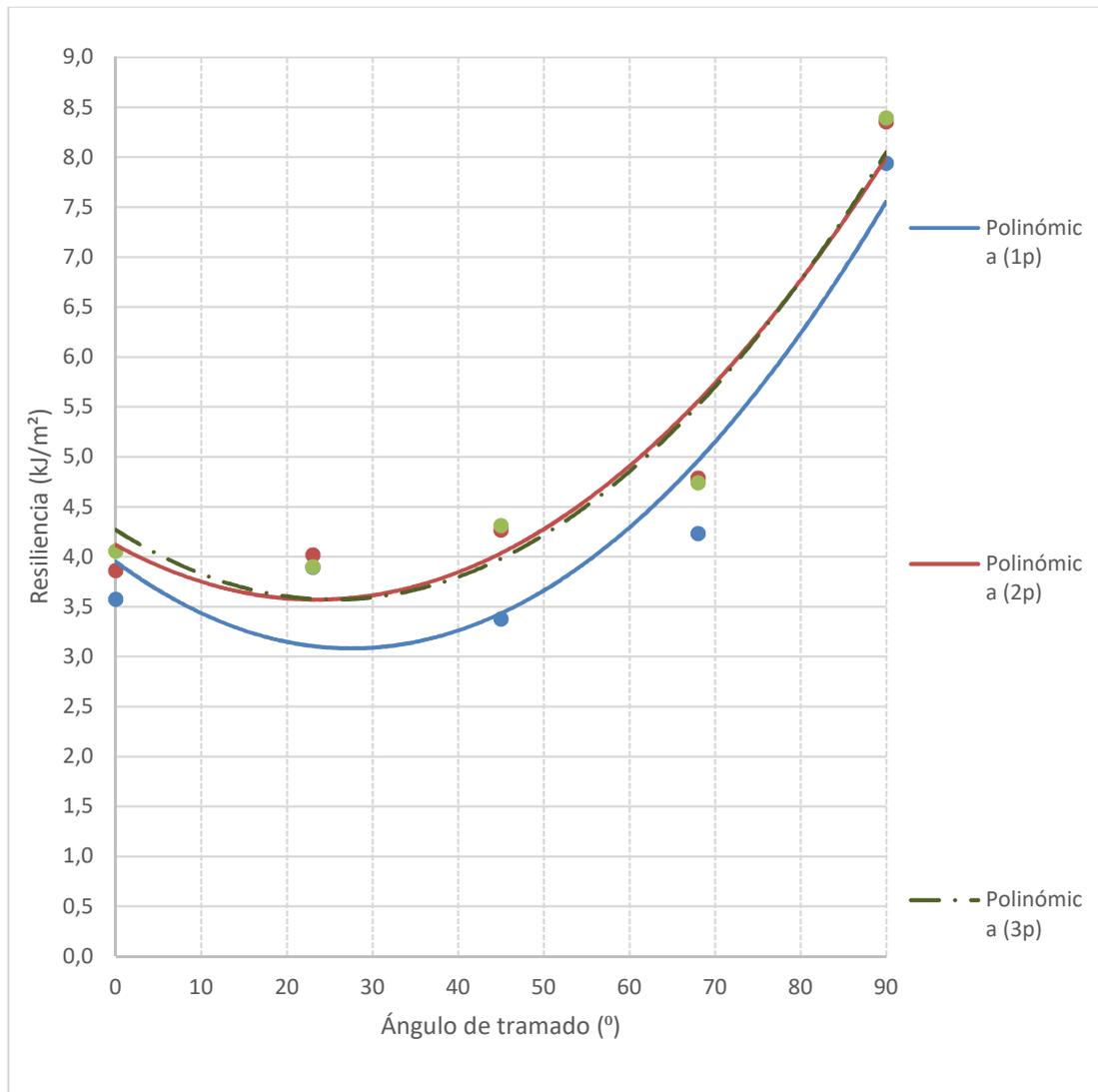


Figura 3-35. Representación conjunta de los resultados del estudio resiliencia-ángulo de tramado.

La conclusión que se extrae de este apartado es clara, pero se ha de puntualizar para no dar lugar a confusión. Cuanto mayor es el ángulo de tramado, mayor es el valor de la resiliencia, siendo esta correlación cuadrática. Ahora bien, como anteriormente se ha explicado, no es tanto el ángulo de tramado sino la orientación respecto a la zona de impacto la que aumenta la resiliencia. Por otro lado, los ángulos oscilan dentro de la circunferencia goniométrica, y, por tanto, existirán dos ángulos que maximizarán la resiliencia:  $90^\circ$  y  $270^\circ$ , ángulos que corresponden a una orientación de las fibras totalmente perpendicular a la zona de impacto. Es por ello que, como conclusión, se enuncia lo siguiente: a medida que el ángulo de tramado va situando las fibras de manera perpendicular a la zona de impacto, la resiliencia aumentará siguiendo una correlación cuadrática. Si se extrapolara esta función dentro de todo el ámbito que abarca la circunferencia goniométrica, se observaría como, a partir de  $90^\circ$  y hasta  $180^\circ$ , la gráfica sería la misma pero invertida, es decir, si se representara desde  $0^\circ$  hasta  $180^\circ$ , en  $90^\circ$  existiría un eje de simetría. A partir de  $180^\circ$  y hasta  $360^\circ$  ocurriría este mismo hecho.

En cuanto al orden de magnitud, esta variable produce aumentos de resiliencia hasta de  $4 \text{ kJ/m}^2$  por cada aumento de  $22,5^\circ$  (en su caso más extremo, el paso de  $68^\circ$  a  $90^\circ$ ). Por tanto, este parámetro es el más influyente en el valor de resiliencia, pues, prácticamente duplica la resiliencia de una probeta cuando el ángulo es  $90^\circ$ . Otro aspecto importante que muestra este grafo es la confirmación de la tendencia anteriormente establecida respecto al número de perímetros, pues se observa cómo entre los experimentos realizados con 1 perímetro y los realizados con 2 perímetros se produce un salto de resiliencia de aproximadamente  $0,3 \text{ kJ/m}^2$ , mientras que, entre 2 y 3 perímetros, la resiliencia apenas aumenta. Este hecho confirma que el incremento de la resiliencia con el aumento del número de perímetros se atenúa, e incluso, un aumento excesivo del número de perímetros puede ir en contra de la resiliencia, pues, se observa que las probetas del tipo 60%90 con 1 y 2 perímetros presentan 7 probetas rotas en bisagra de 8 ensayadas, mientras que con 3 perímetros únicamente se producen 4 roturas en bisagra de 8 probetas ensayadas. Este hecho muestra que incluso la resiliencia puede disminuir al aumentarse en exceso el número de perímetros, aunque en este estudio se tomará como conclusión la atenuación del incremento de resiliencia a medida que aumentan los perímetros.

### ***3.4. Relación variables de impresión-tiempo.***

En este punto se establecerá la relación que existe entre cada parámetro de impresión estudiado en este trabajo con el tiempo de impresión, además de comparar la relación que se obtenga con la estimación de tiempo de impresión que ofrece el software de diseño Simplify 3D.

En la siguiente tabla aparecen los tiempos reales de impresión. A partir de esta tabla se podrán establecer distintas relaciones.

% relleno	Ángulo de tramado	Número de perímetros	Tiempo real
40%	45	1	66min 28 s
	45	2	67min 49s
60	0	1	75min 15s
	23	1	74min 49s
	45	1	74 min 2s
	68	1	70 min 46 s
	90	1	67min 17s
	0	2	76min 7s
	23	2	75min 51s
	45	2	74min18s
	68	2	71min 46 s
	90	2	68min 36s
	0	3	77min 23s
	23	3	76min 50s
	45	3	75mi 24s
	68	3	72min 58s
90	3	69min 55s	
80	45	1	80min 33s
	45	2	80min 58s

Tabla 3.4. Tiempo de impresión de cada serie.

### 3.4.1. Porcentaje de relleno-tiempo.

En este caso la relación lineal se aprecia clarísimamente en las gráficas siguientes. A mayor cantidad de relleno, más tiempo tardará la serie en ser impresa.

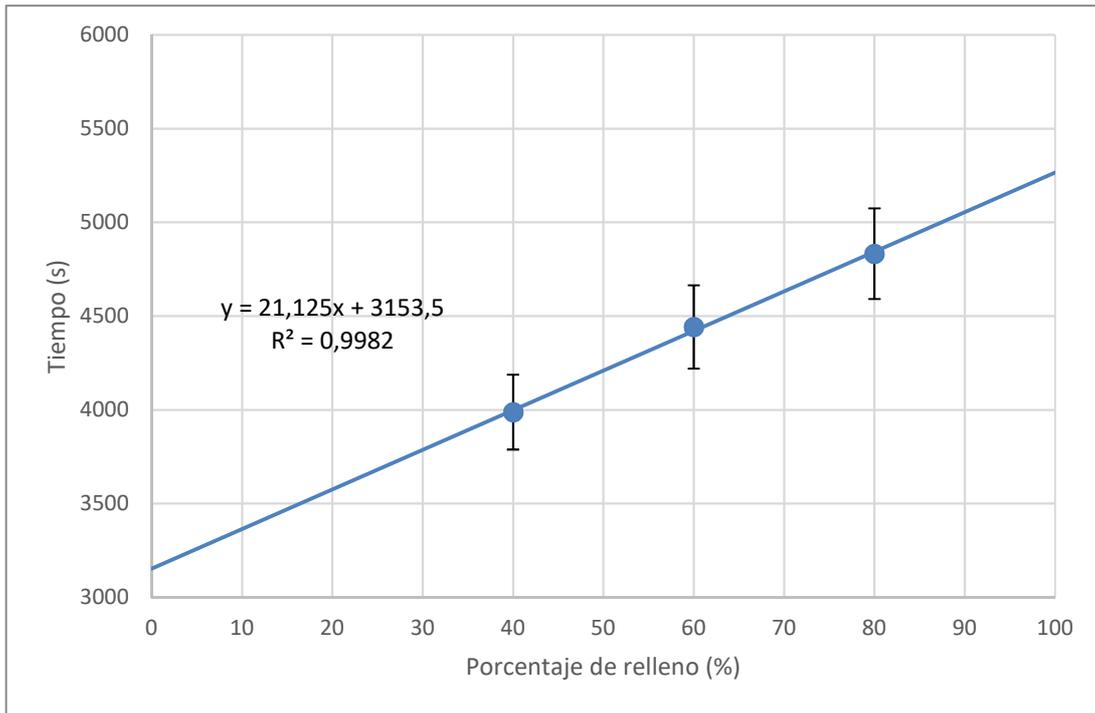


Figura 3-36. Relación tiempo- porcentaje de relleno con 1 perímetro y 45°.

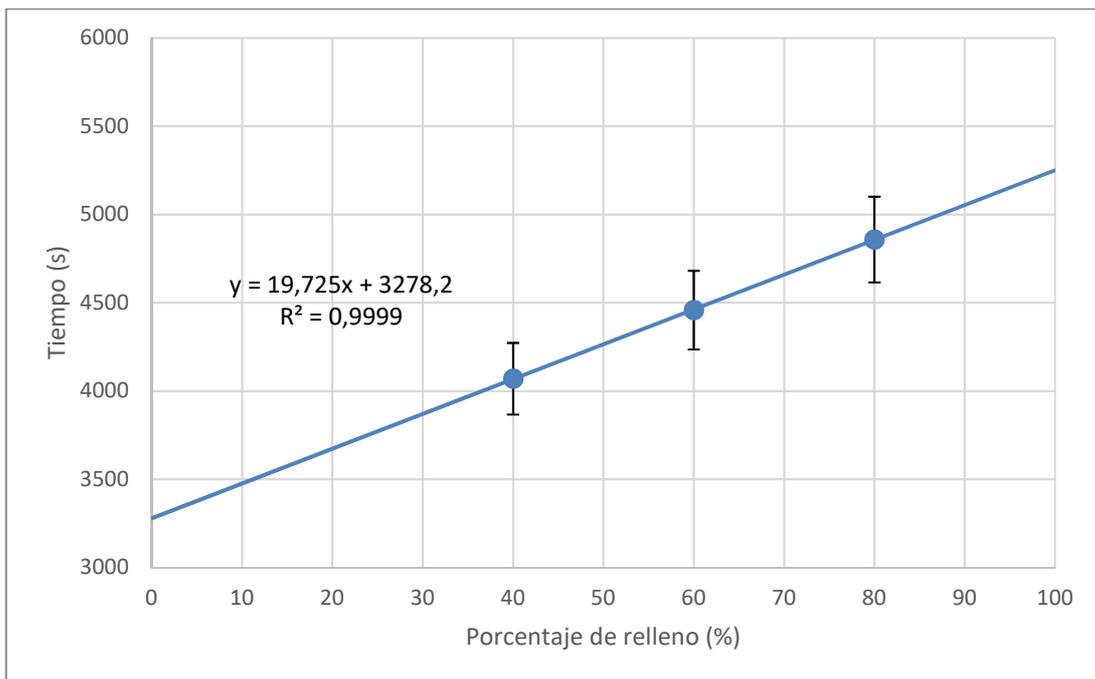


Figura 3-37. Relación tiempo-porcentaje de relleno con 2 perímetros y 45°.

Cada vez que el porcentaje de relleno aumenta un 20% el tiempo se incrementa en unos 400 segundos aproximadamente, lo que suponen unos 6 minutos más.

En la siguiente representación agregada de los resultados se puede observar, por un lado, que la adición de 1 perímetro aumenta el tiempo de impresión aproximadamente en 1 minuto, y, por otro lado, que a medida que se aumenta el porcentaje de relleno, el

aumento temporal debido al número de perímetros se va haciendo cada vez menos importante.

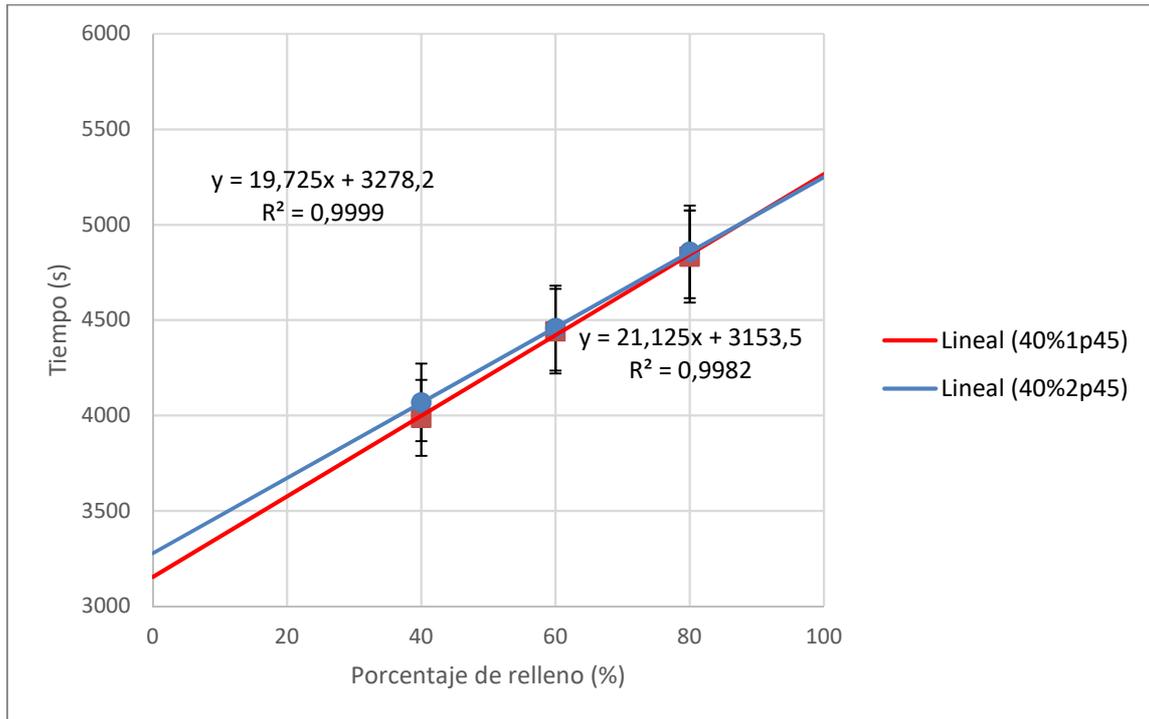


Figura 3-38. Relación tiempo-porcentaje de relleno conjunta.

### 3.4.2. Número de perímetros-tiempo.

De la misma forma que se hizo anteriormente, se representa ahora el número de perímetros frente al tiempo de impresión, a fin de comprobar que la relación es lineal.

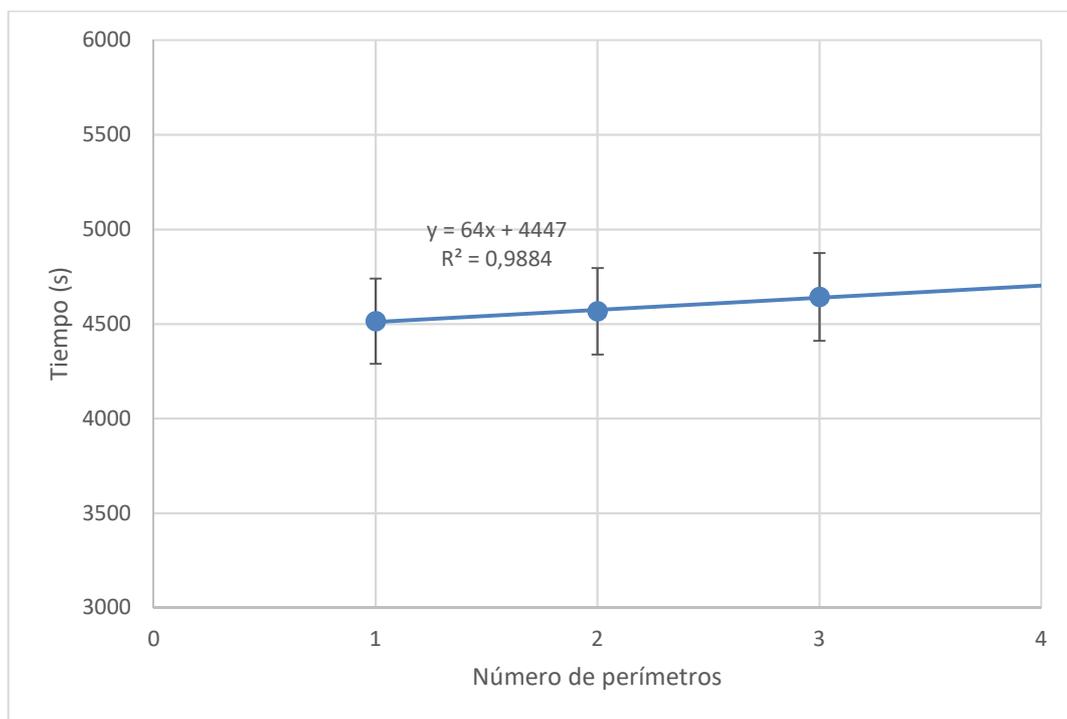


Figura 3-39. Relación tiempo-número de perímetros con ángulo de tramado 0° y 60% de relleno.

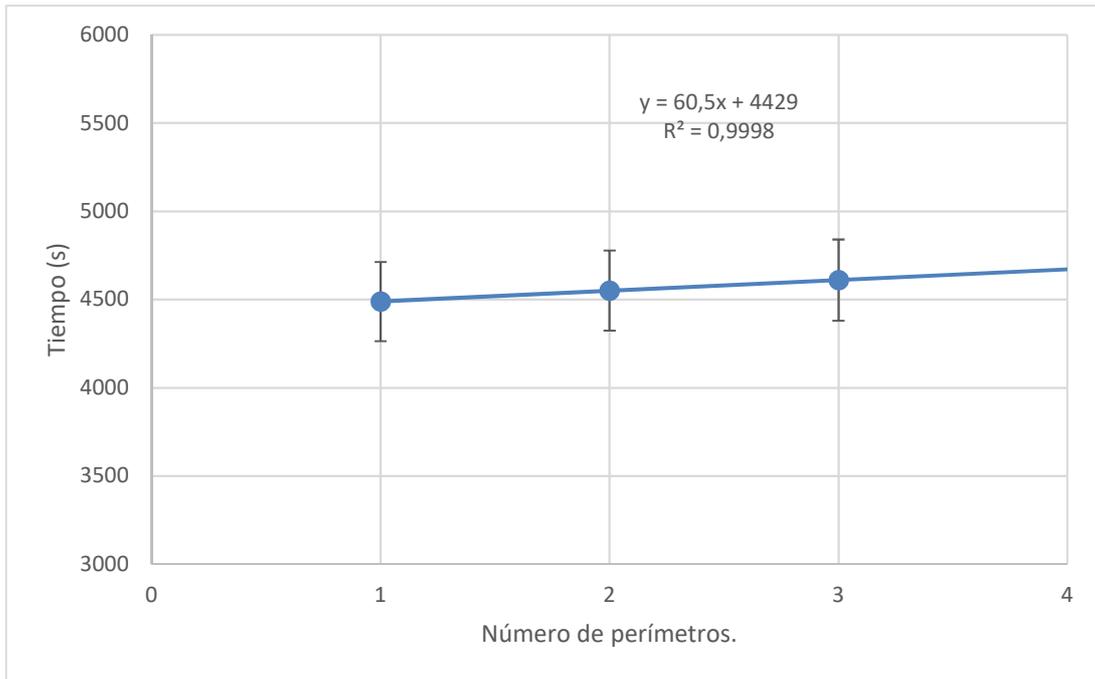


Figura 3-40. Relación tiempo-número de perímetros con ángulo de tramado 23° y 60% de relleno.

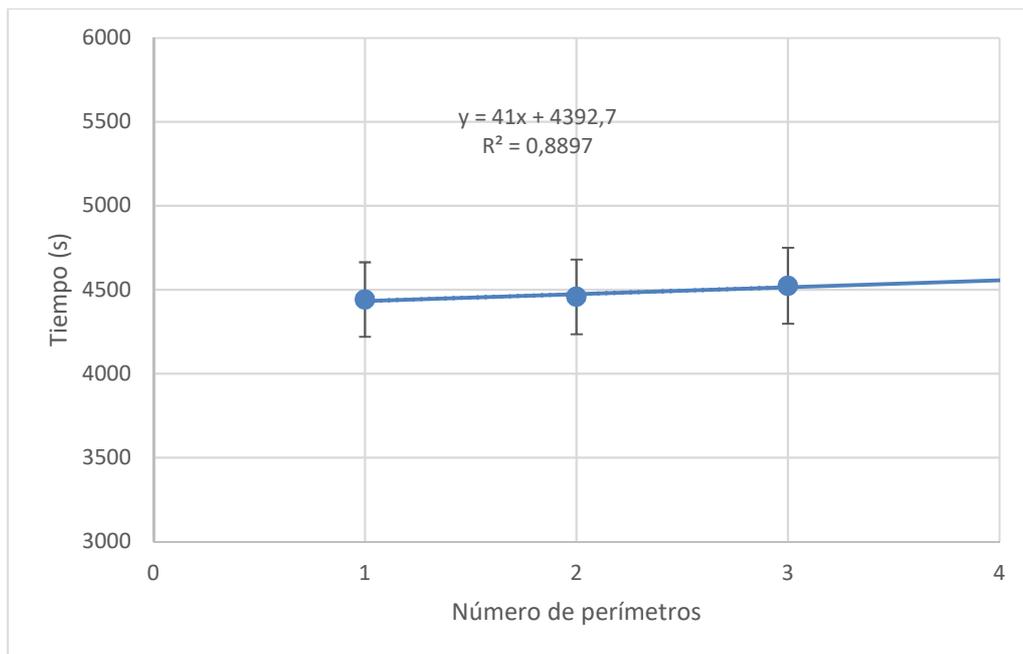


Figura 3-41. Relación tiempo-número de perímetros con ángulo de tramado 45° y 60% de relleno.

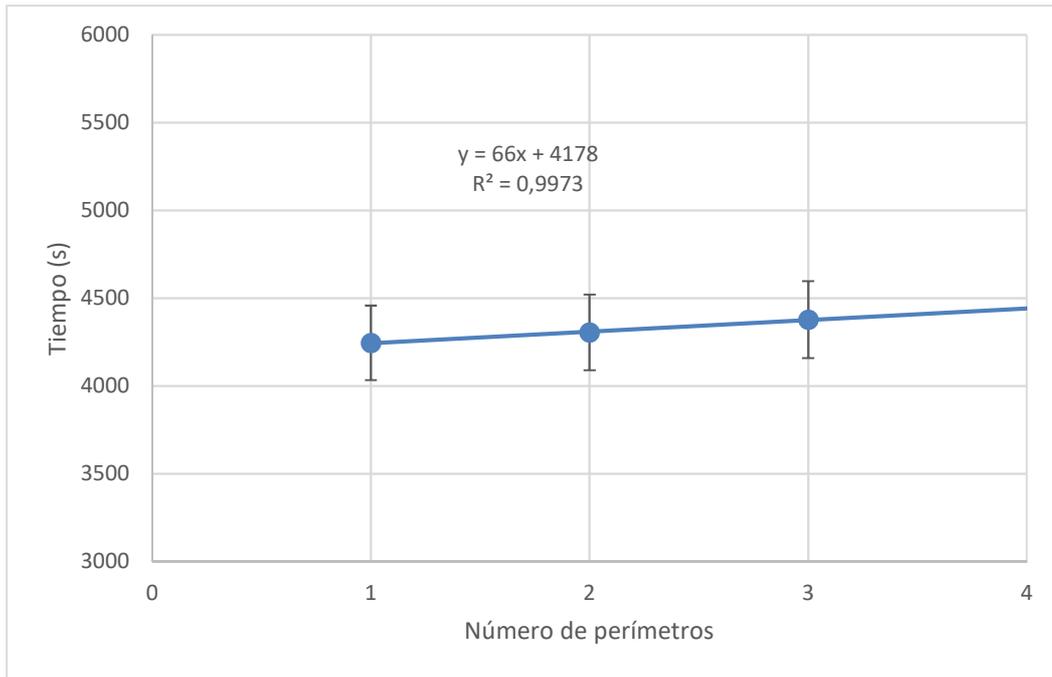


Figura 3-42. Relación tiempo-número de perímetros con ángulo de tramado 68° y 60% de relleno.

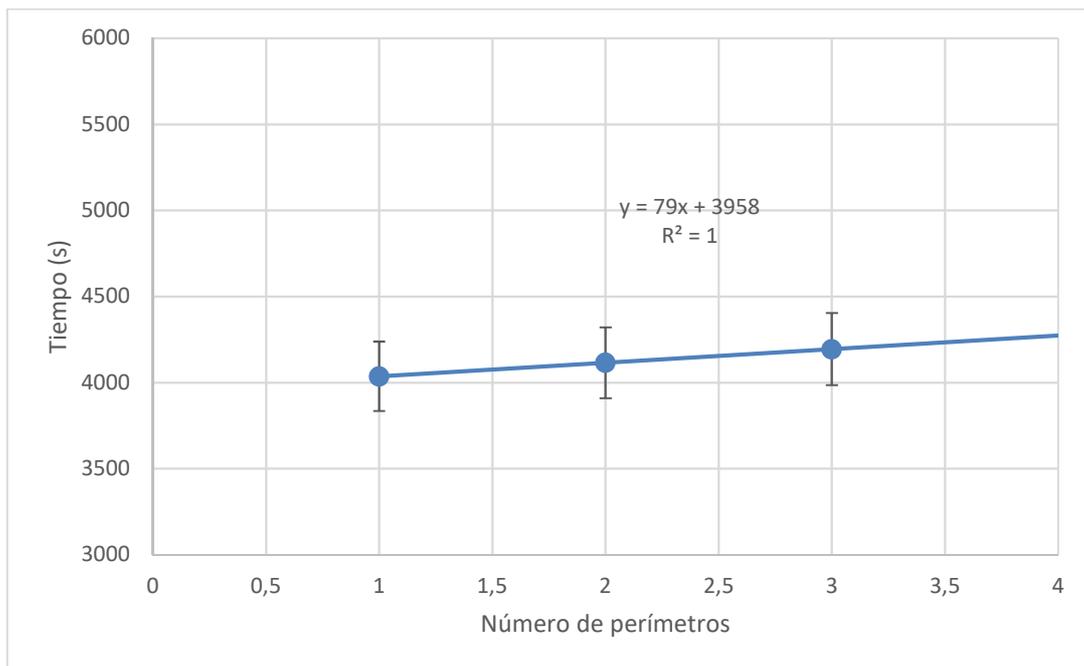


Figura 3-43. Relación tiempo-número de perímetros con ángulo de tramado 90° y 60% de relleno.

La relación del tiempo de impresión con el número de perímetros también es lineal. La adición de un perímetro aumenta el tiempo total en 1 minuto aproximadamente.

En la siguiente representación conjunta se aprecia como a medida que se aumenta el ángulo de tramado, disminuye el tiempo de impresión en intervalos cada vez más espaciados, lo que indica que la relación tiempo-ángulo de tramado no va a ser lineal.

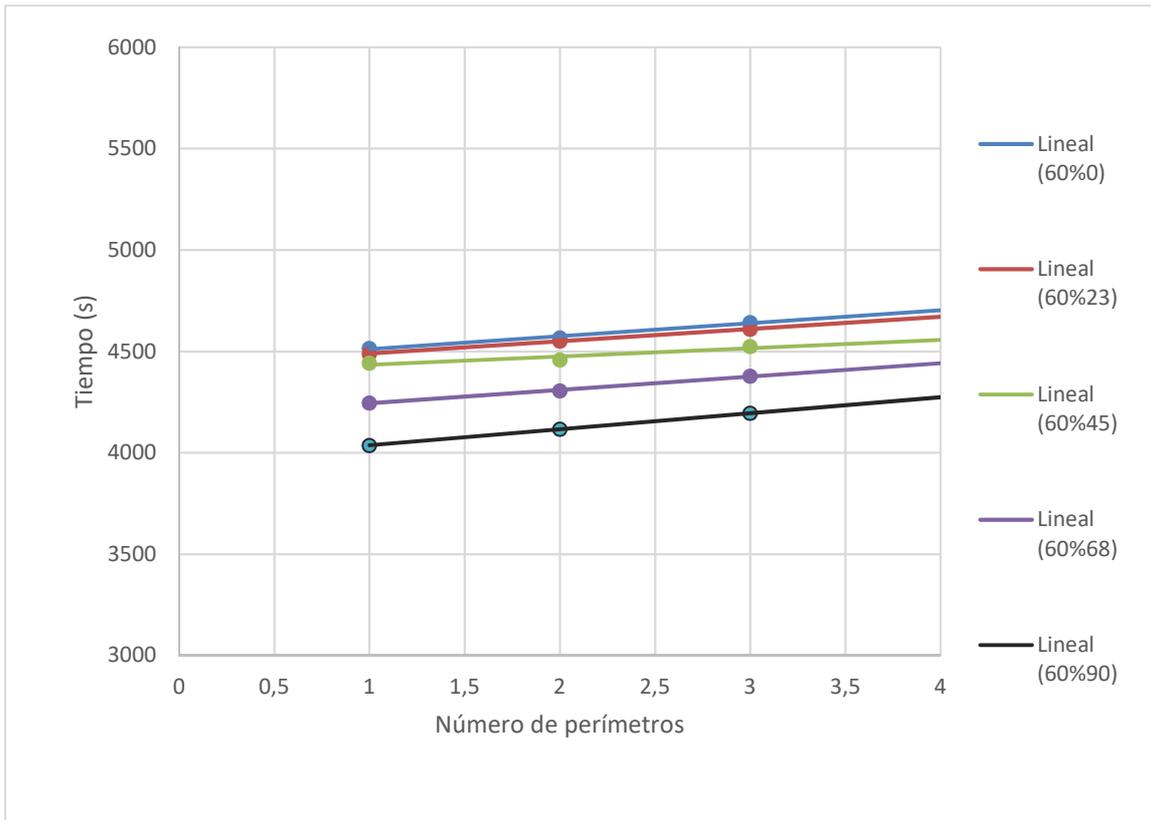


Figura 3-44. Relación tiempo-número de perímetros conjunta.

### 3.4.3. Ángulo de tramado-tiempo.

En este caso la relación, si se observa la tabla de tiempos de impresión es decreciente. A medida que aumenta el ángulo, el tiempo de impresión disminuye. Representando el tiempo frente al ángulo de tramado se obtendrá qué tipo de curva rige esta relación.

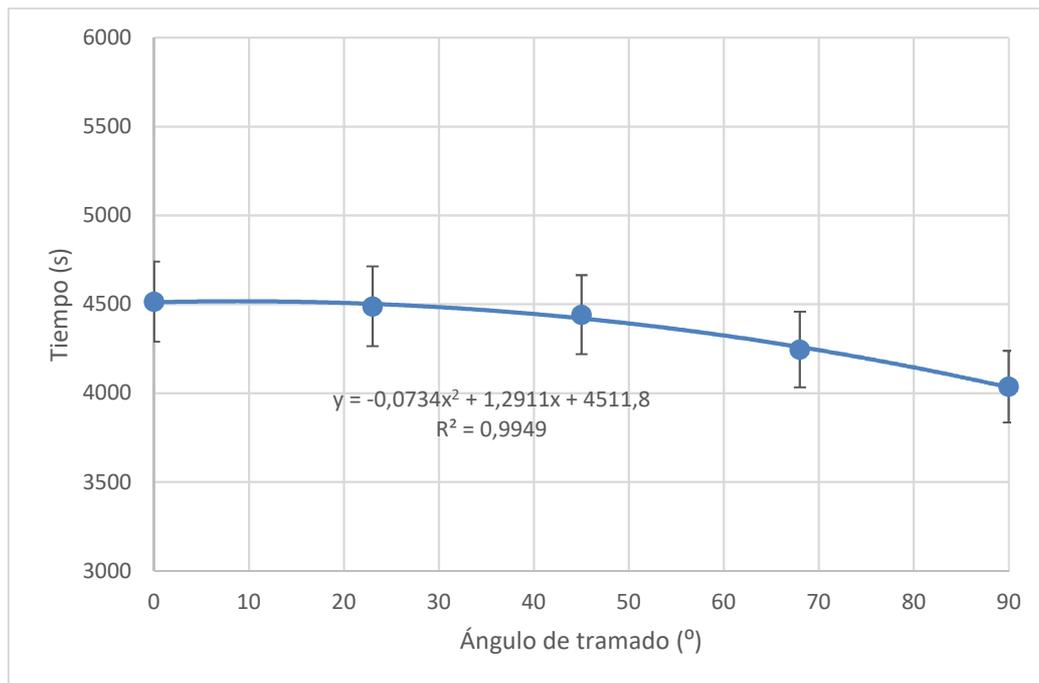


Figura 3-45. Relación ángulo de tramado-tiempo con 1 perímetro y 60% de relleno.

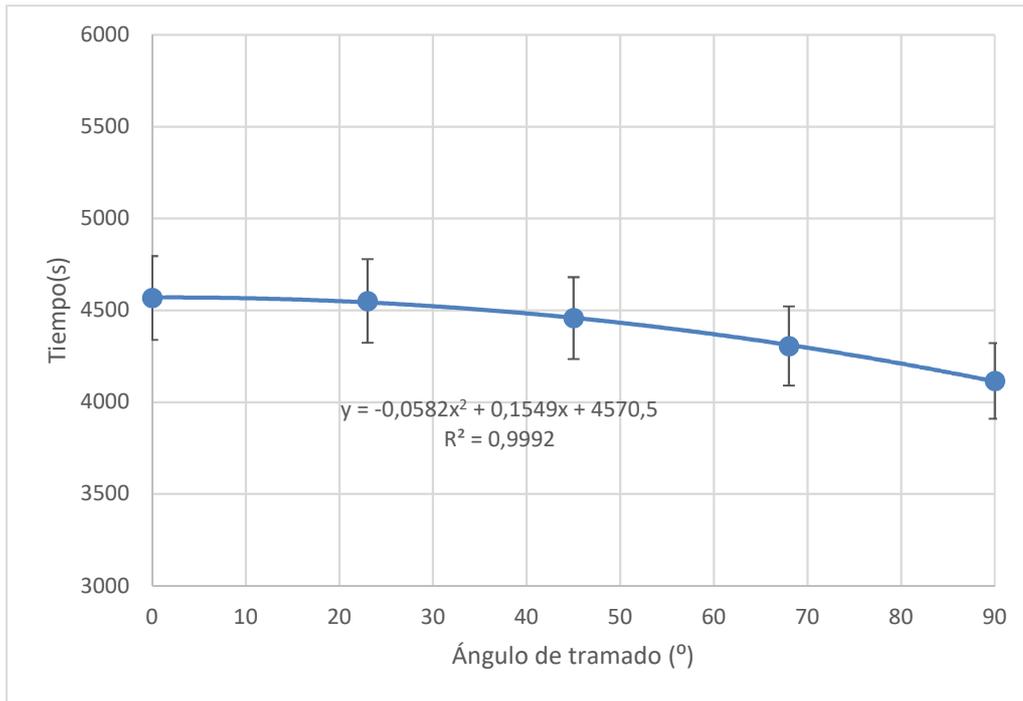


Figura 3-46. Relación ángulo de tramado-tiempo con 2 perímetros y 60% de relleno.

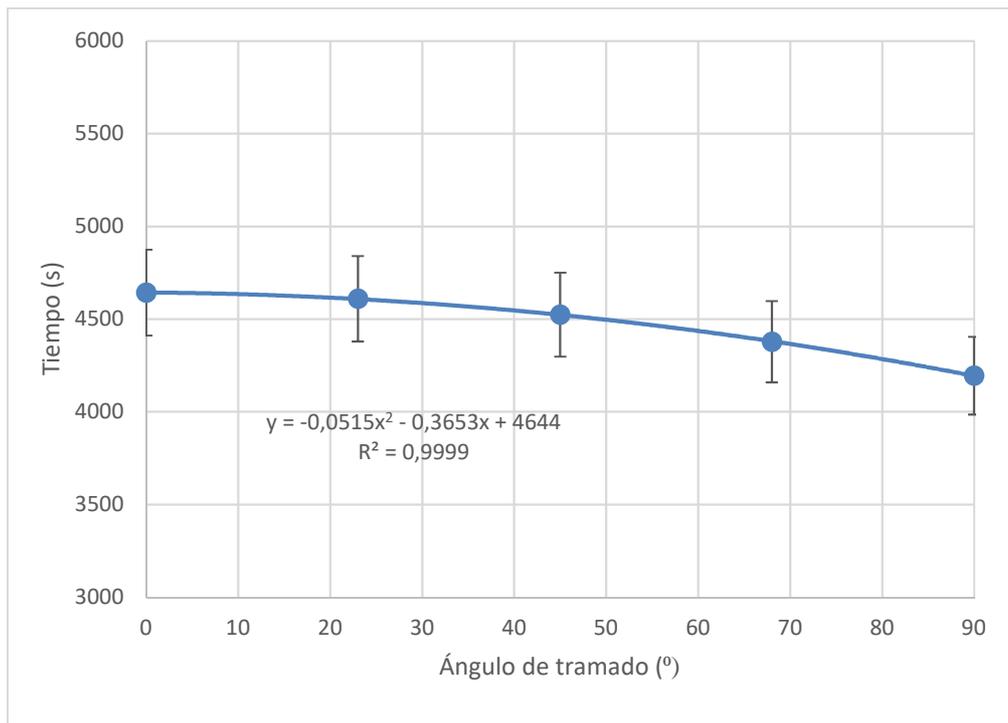


Figura 3-47. Relación ángulo de tramado-tiempo con 3 perímetros y 60% de relleno.

Curiosamente, se observa que la tendencia descendente no es lineal sino cuadrática. Por tanto, se puede afirmar que, a medida que aumenta el ángulo de tramado (comprendido entre 0° y 90°) el tiempo de impresión disminuye de manera cuadrática.

En la siguiente representación agregada de los resultados, se aprecia de forma mucho más clara como la adición de un perímetro aumenta el tiempo de impresión en 1 minuto.

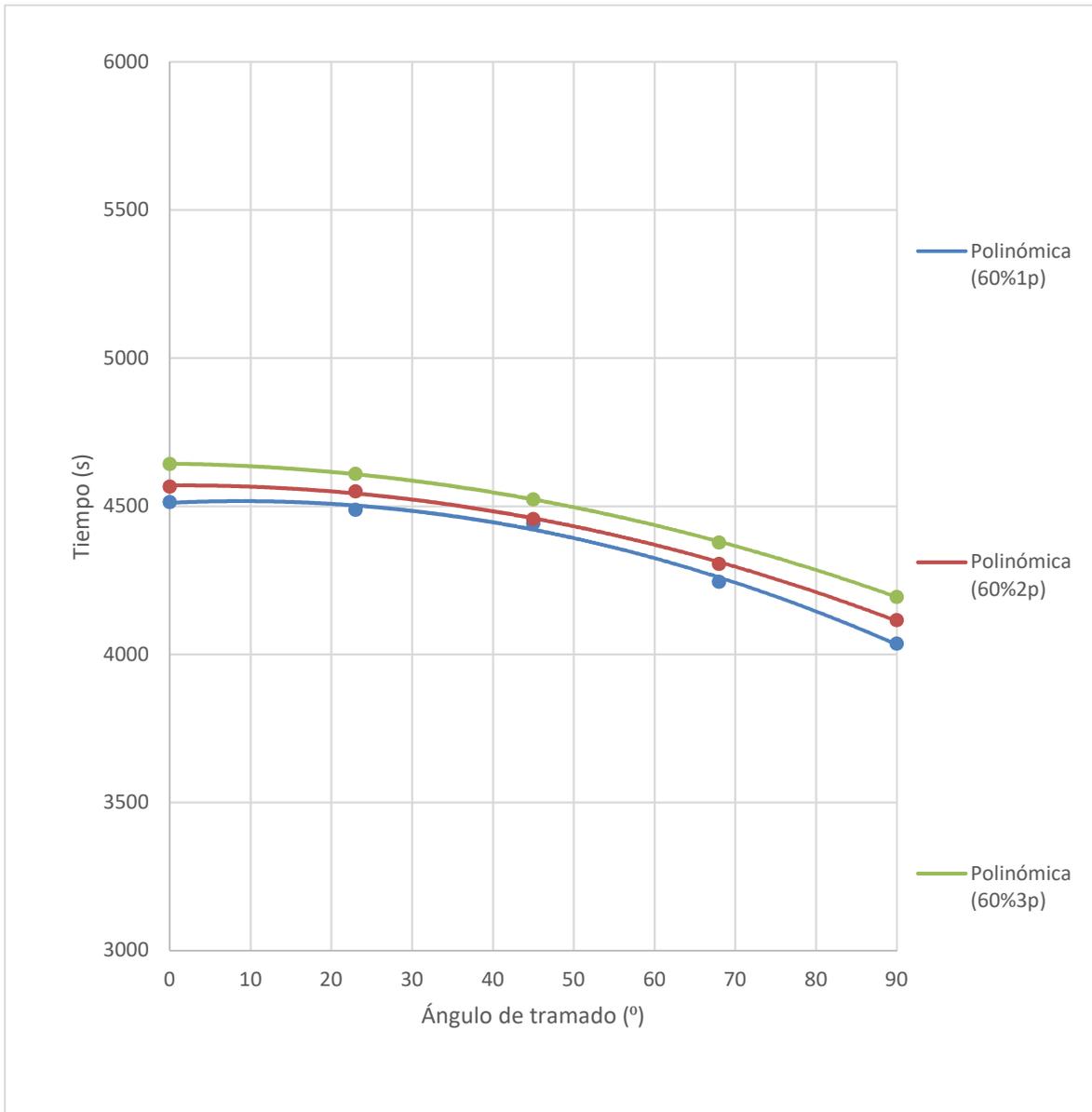


Figura 3-48. Relación ángulo de tramado-tiempo conjunta.

### 3.5. Relación entre el tiempo y la masa estimados por Simplify 3D y sus valores reales.

En la siguiente tabla aparecen los tiempos estimados por *Simplify 3D* y los tiempos reales, además del error relativo entre los dos valores.

% relleno	Ángulo de tramado	Número de perímetro	Tiempo estimado	Tiempo estimado en s	Tiempo real	Tiempo en s	Error relativo (%)
40%	45	1	55	3300	66min 28 s	3988	17,25
	45	2	56	3360	67min 49s	4069	17,42
60	0	1	60	3600	75min 15s	4515	20,27
	23	1	60	3600	74min 49s	4489	19,80
	45	1	60	3600	74 min 2s	4442	18,96
	68	1	60	3600	70 min 46 s	4246	15,21
	90	1	59	3540	67min 17s	4037	12,31
	0	2	61	3660	76min 7s	4567	19,86
	23	2	61	3660	75min 51s	4551	19,58
	45	2	61	3660	74min18s	4458	17,90
	68	2	61	3660	71min 46 s	4306	15,00
	90	2	60	3600	68min 36s	4116	12,54
	0	3	62	3720	77min 23s	4643	19,88
	23	3	62	3720	76min 50s	4610	19,31
	45	3	62	3720	75mi 24s	4524	17,77
	68	3	62	3720	72min 58s	4378	15,03
90	3	61	3660	69min 55s	4195	12,75	
80	45	1	66	3960	80min 33s	4833	18,06
	45	2	66	3960	80min 58s	4858	18,48
							17,23

Tabla 3.5. Obtención del error cometido por Simplify 3D en la estimación de tiempos de impresión.

El error relativo entre la estimación y la realidad es de aproximadamente un 17%, es decir, el software estima menos tiempo del que en realidad es necesario. Este error puede ser debido a dos causas principales:

- El software simula un entorno de impresión idóneo, donde la impresora no muestra ningún tipo de defecto.
- En la realidad si existen posibles defectos. Nunca el rendimiento de un proceso va a ser mayor o igual que 1. Mala refrigeración del cabezal, microatascos en la boquilla, velocidad de impresión más baja que la estipulada, temperatura algo diferente a la que se precisa... son sólo algunos de los problemas que pueden dar lugar al aumento del tiempo de impresión.

Para la comprobación de la exactitud de la estimación de la masa de cada serie con el peso real de cada una de ellas se ha actuado de la siguiente forma: por un lado, se han tomado las estimaciones dadas por el software, y, por otro lado, se han pesado todas las probetas en la báscula de precisión, citada en apartados anteriores, obteniendo con ello la masa real de cada serie.

En este caso no se muestra la tabla con los cálculos por su gran longitud. El error relativo entre estos dos valores es de aproximadamente un 7%, aunque en este caso, el software proporciona una estimación de masa mayor que la que realmente se consume. Este error probablemente se deba a que un pequeño atasco en la boquilla de la impresora no permita salir toda la cantidad de filamento necesaria. Aun así, este error está repartido de manera equitativa entre todas las series por lo que no supone una gran fuente de error para este proyecto.

### **3.6. Estudio técnico-económico del proyecto.**

Otro de los objetivos de este proyecto es conocer cuánto cuesta producir mediante impresión 3D, y más concretamente en FDM, para poder comparar con las simulaciones que proporciona *Simplify 3D*. Para poder establecer una función que permita calcular el coste por probeta o por serie de probetas construidas es necesario realizar un breve comentario sobre cómo se organizan todos los costes que atañen a la fabricación aditiva.

Según la publicación “*Costos y rentabilidad de la fabricación aditiva*” de Douglas S. Thomas and Stanley W. Gilbert [19], los costes que componen el coste total de la fabricación aditiva son dos: los costes bien estructurados, que son aquellos que se esperan o que se tienen en cuenta desde un principio; y los costes mal estructurados que provienen de errores en la organización o sucesos imprevistos durante el proceso productivo. Costes bien estructurados se corresponden con el coste de la máquina, la electricidad (que no suele ser influyente en el coste final) y el coste del material, así como la mano de obra, la programación logística y el transporte. Costes indirectos provienen de problemas con todos los anteriores casos, que no fueron previstos anteriormente o que surgen repentinamente, como pueden ser roturas de la máquina, que retrasan la producción, retrasos en el transporte, sobreproducción... Estos costes normalmente suelen solaparse, por ejemplo, un mayor gasto de material por un fallo en la producción se traducirá directamente en un mayor gasto económico en material, sin diferenciar cuánto material se usó de manera correcta y cuánto de manera incorrecta.

Para este proyecto, muchos de los anteriores casos no tienen cabida, ya que las consideraciones que se refieren a la industria y su organización no se dan en el ámbito académico en el que se encuadra este estudio. Básicamente, quedarían dos costes aplicables a este proyecto: el coste máquina (coste inicial, electricidad y mantenimiento) y el coste del material.

$$C_{TOTAL} = P_{MATERIAL} * Masa + P_{INDIRECTOS} * T_{IMPRESIÓN}$$

Si se considera que, por ser este un estudio académico y que por tanto no se busca amortizar la impresora, sino que ésta es únicamente usada para investigación y sin ningún fin económico, el coste inicial de la máquina se puede despreciar. Igualmente, considerando que la máquina funciona muy poco (unas 100-150 horas al año) y que por tanto las acciones de mantenimiento que requiere son mínimas, los costes de mantenimiento también pueden obviarse. Igualmente, los costes de electricidad son despreciables, por ser este un proyecto muy pequeño. Por tanto, el coste económico del proyecto únicamente vendrá dado por el coste del material.

$$C_{TOTAL} = P_{MATERIAL} * Masa$$

El coste de la bobina de *Grafylon 3D*, de 700 g de peso, adquirida por el departamento de Fabricación de la Universidad Politécnica de Cartagena es de 50 €, lo que supone un coste de 0,0714 €/g. La masa de *Grafylon 3D* utilizada en el proyecto, que se puede aproximar mediante el peso de las probetas, es de 443,92 g. A esto se le ha de añadir el peso del faldón que en cada serie se deposita a fin de conseguir un comienzo de la impresión idóneo. Este peso es de aproximadamente 0,3 g por cada serie, por lo que si se multiplica por las 19 series impresas, arroja un total de 5,7 g. Esta cantidad sumada al peso de las probetas supone un gasto de 449,62 g. Por tanto, el coste final del proyecto ascendería a 32,1€.

Por otro lado, el software de seccionado *Simplify 3D* proporciona una estimación de la masa y del coste de cada serie de impresión. La masa total estimada por *Simplify 3D* es de 479,33 g, lo que supone, tal como se expuso en apartados anteriores, un error entorno al 7 %. *Simplify 3D* calcula el precio aplicando la misma función que se ha utilizado anteriormente, por lo que, el exceso de masa producirá un exceso de precio. 34,24€ es el coste total del proyecto en *Simplify 3D*, lo que supone un error de aproximadamente un 7%. A modo resumen se ofrece la siguiente tabla.

	Masa	Coste
<i>Simplify 3D</i>	479,33 g	34,24 €
Real	449,62 g	32,10 €

Tabla 3.6. Estimaciones y valores reales de masa y coste.

Como resultado de este estudio técnico-económico se extrae que las predicciones de *Simplify 3D* se pueden utilizar para estimar los costes de un pequeño proyecto como este, pero, si se trabaja en un ámbito de producción es necesario realizar un estudio exhaustivo de los costes, pues puede suponer un gran ahorro para la compañía.

### ***3.7. Discusión sobre una posible combinación de parámetros que maximice la rentabilidad del proceso.***

En función de los resultados y conclusiones obtenidas en los anteriores apartados, parece interesante la idea de buscar una combinación de parámetros de impresión que maximice la resiliencia.

A la vista de los resultados obtenidos es evidente que el incremento del número de perímetros, porcentaje de relleno y ángulo de tramado suponen todos ellos incrementos de resiliencia. Por otra parte, el incremento de estas tres variables supone un incremento de costes y tiempos de fabricación. La relación resiliencia-tiempo ya se trató en el apartado 3.4, observando las tendencias de cambio y la cantidad de tiempo que suponen las variaciones de los parámetros estudiados. A continuación, se busca obtener la combinación o combinaciones de parámetros que optimicen la relación resiliencia-coste. Para ello, se define una nueva variable  $\eta$  que relaciona resiliencia y coste de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{a_{CN}}{C} \left( \frac{kJ}{m^2 * \text{€}} \right)$$

Con esta nueva variable se puede observar, en función de uno de los parámetros estudiados en el proyecto, cómo varía esta relación, buscando su valor óptimo (si lo hubiere) o un valor que hiciera la función  $\eta$ -(parámetro) mínima.

#### ***3.7.1. Relación $\eta$ -porcentaje de relleno.***

Como ya se ha dicho anteriormente, un porcentaje de relleno del 100% maximizaría la resiliencia. Ahora bien, es necesario buscar un porcentaje de relleno o un rango de porcentaje de relleno que proporcione una relación óptima entre coste y resiliencia. Para ello, se representan en la siguiente gráfica las dos funciones que se construyen a partir de los datos obtenidos en este proyecto.

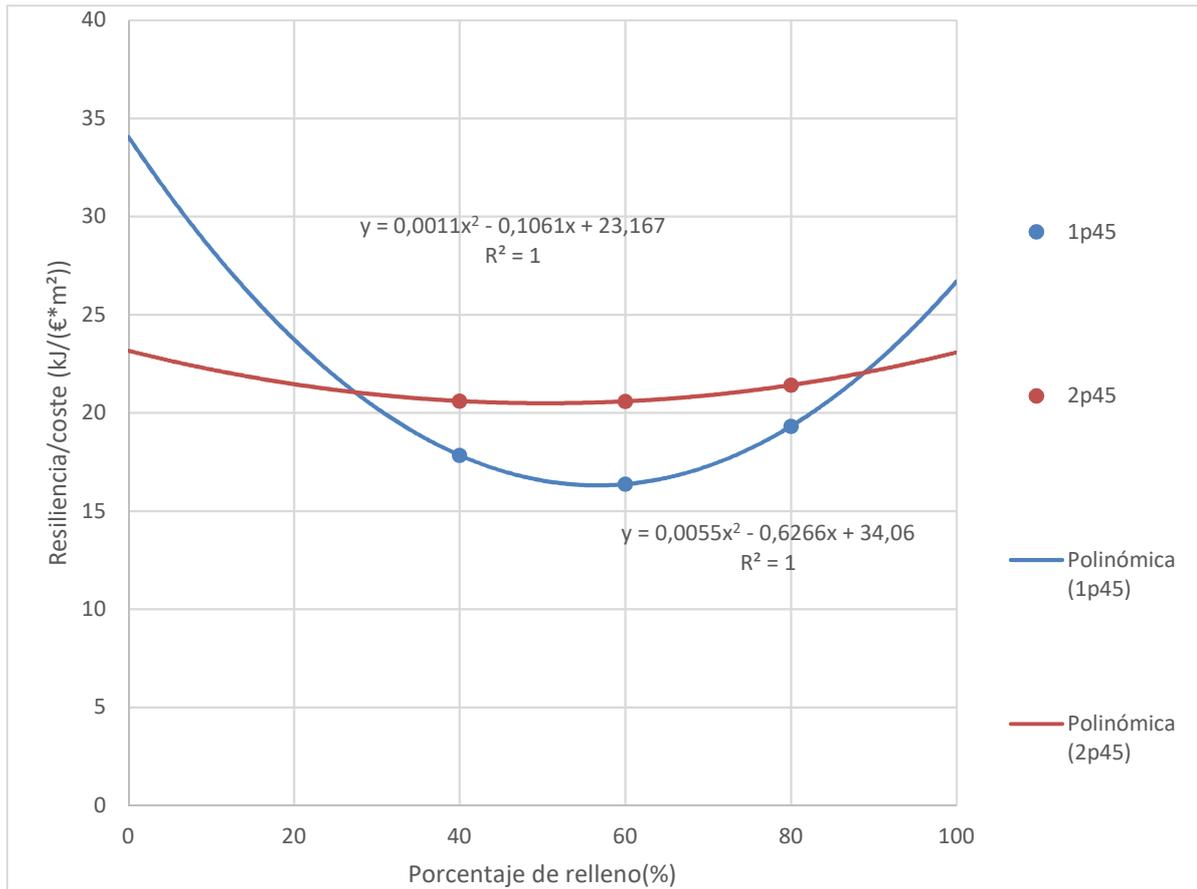


Figura 3-49. Relación  $\eta$  -% de relleno.

Se observa en imagen como las curvas que representan esta relación tienen sus máximos situados en los extremos (0% y 100%). Esto significa que, por un lado, si la probeta se realizara con 0% de relleno, su coste sería tan bajo (no contiene relleno alguno) que el parámetro  $\eta$  se maximizaría, pero probablemente esta probeta no sería de gran utilidad (dependiendo de la aplicación a la que se destine). Por tanto, este máximo en 0% de relleno constituiría un máximo teórico, pues no la resiliencia no estaría dentro de un rango adecuado de uso. Por otro lado, cuando el porcentaje de relleno es 100% (probeta maciza) la resiliencia aumenta un poco más que el coste, por lo que el parámetro  $\eta$  aumenta. Es por ello que no se puede establecer un punto óptimo de rentabilidad del proceso.

Sin embargo, si se observa un punto en cada curva donde este  $\eta$  es mínimo, y, por tanto, sería un punto donde la rentabilidad del proceso sería peor. Para obtener el valor del porcentaje de relleno que hace menos rentable el proceso, basta con tomar del gráfico las ecuaciones que rigen dichas curvas, derivar e igualar a 0. En la siguiente tabla resumen se muestran los resultados obtenidos, donde PR representa el porcentaje de relleno.

Curva	Función	Mínimo (%)
1p45	$0,0055PR^2-0,6266PR+34,06$	56,96
2p45	$0,0011PR^2-0,1061PR+23,167$	48,23

Tabla 3.7. Mínimos en la función  $\eta$  -% de relleno

Se aprecia que, si se trabaja con un relleno de entre 40% y 60% aproximadamente, el proceso de fabricación de la probeta no es rentable, pues el parámetro  $\eta$  es mínimo. También se observa cómo, al aumentar el número de perímetros, disminuye el valor del porcentaje mínimo. Esto quiere decir que, con menores porcentajes de relleno se obtendrían las mismas prestaciones de la pieza construida, pero con un coste inferior.

Por tanto, como conclusión de este apartado se puede decir que no existe un porcentaje de relleno óptimo, pero sí puntos a los que no es aconsejable acercarse, como son los mínimos anteriormente descritos. Trabajando en la zona de la izquierda de la curva se obtendrán menores costes y en la zona derecha de la curva, mejores prestaciones.

### 3.7.2. Relación $\eta$ -número de perímetros.

En apartados anteriores se vio como un número de perímetros igual a 2 maximizaba la resiliencia (teniendo en cuenta las dimensiones de la probeta utilizada). A continuación, se representan gráficamente las relaciones  $\eta$ -número de perímetros obtenidas en este estudio, a fin de comprobar si 2 perímetros, además de maximizar la resiliencia, maximizan la rentabilidad del proceso.

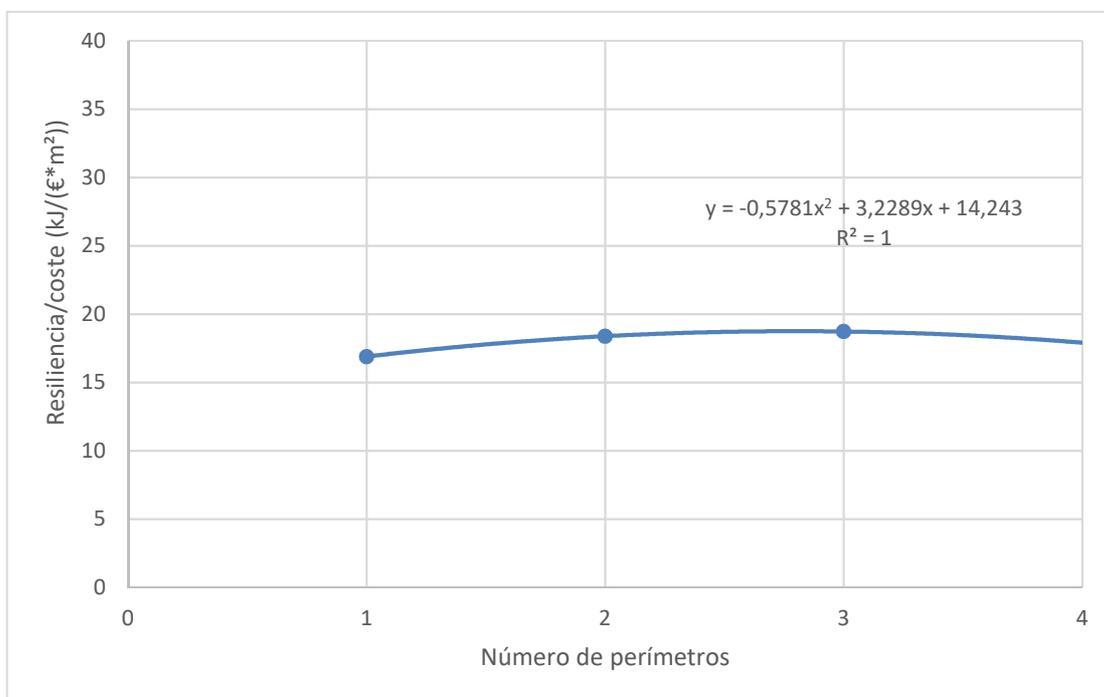


Figura 3-50. Relación  $\eta$ -número de perímetros con 60% de relleno y 0°.

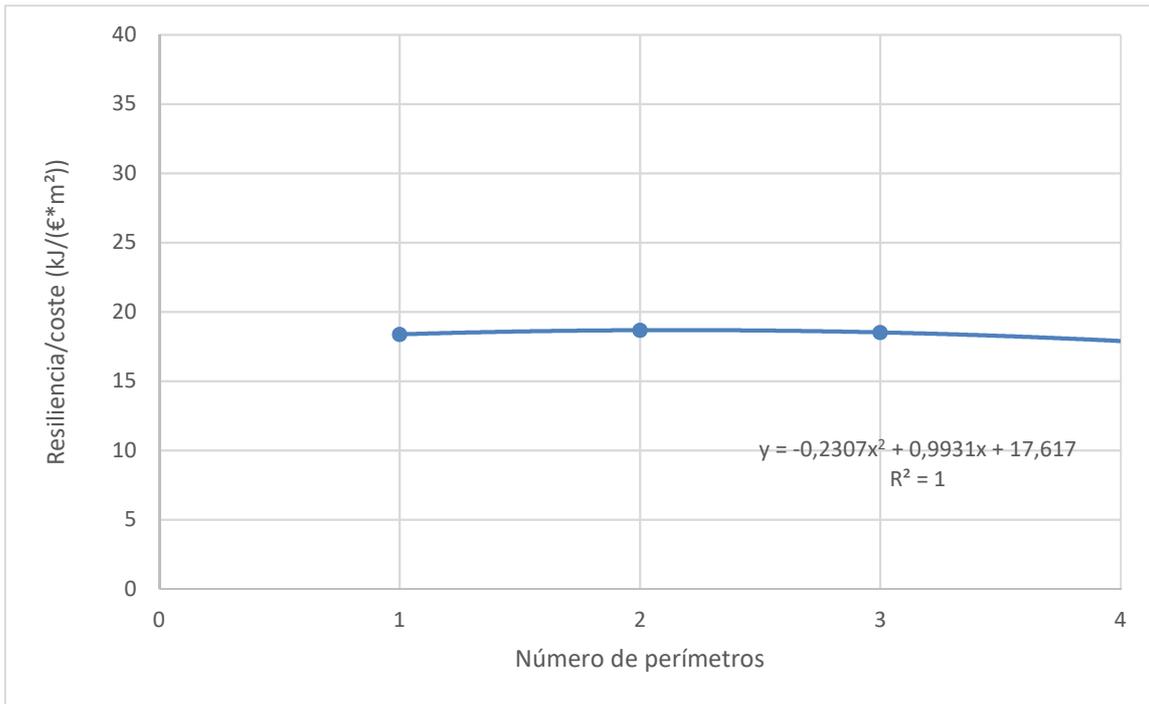


Figura 3-51. Relación  $\eta$ -número de perímetros con 60% de relleno y 23°.

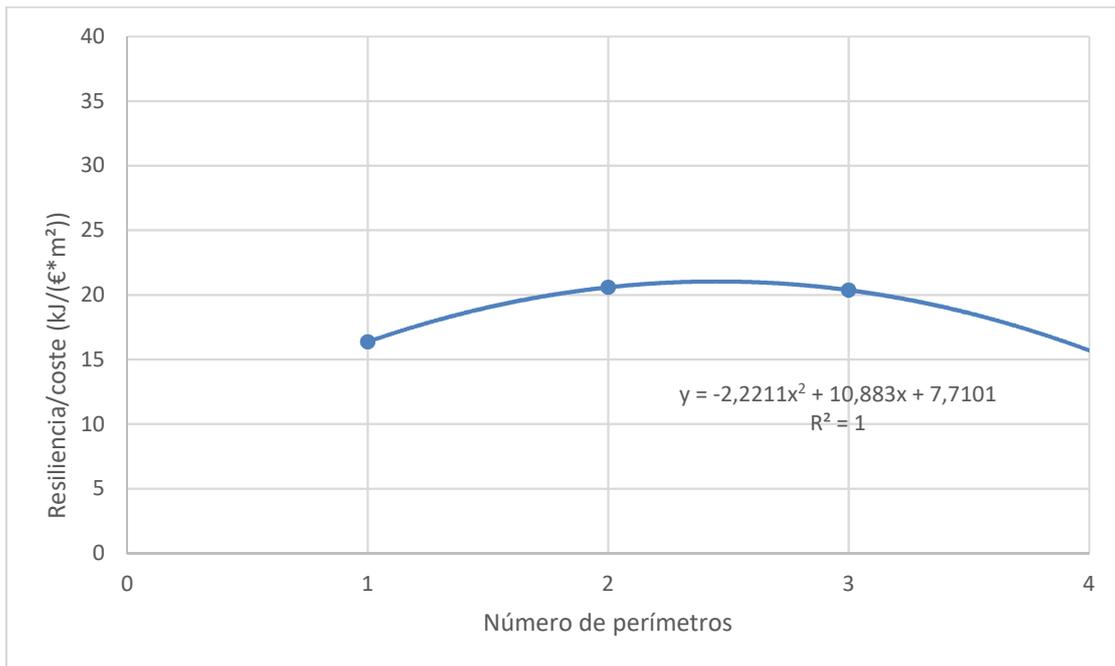


Figura 3-52. Relación  $\eta$ -número de perímetros con 60% de relleno y 45°.

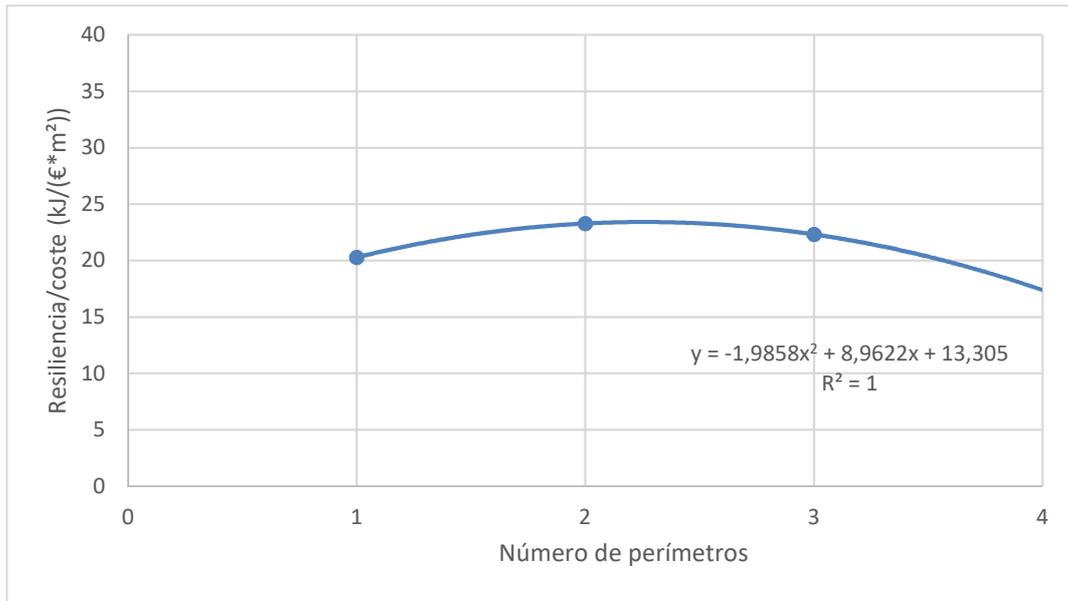


Figura 3-53. Relación  $\eta$ -número de perímetros con 60% de relleno y 68°.

En el gráfico siguiente, es necesario, por un lado, aumentar el máximo del eje de abscisas a 50 kJ/(€\*m²), y aumentar el mínimo a 10kJ/(€\*m²), debido al aumento del parámetro  $\eta$  que se produce cuando el ángulo de tramado es 90°.

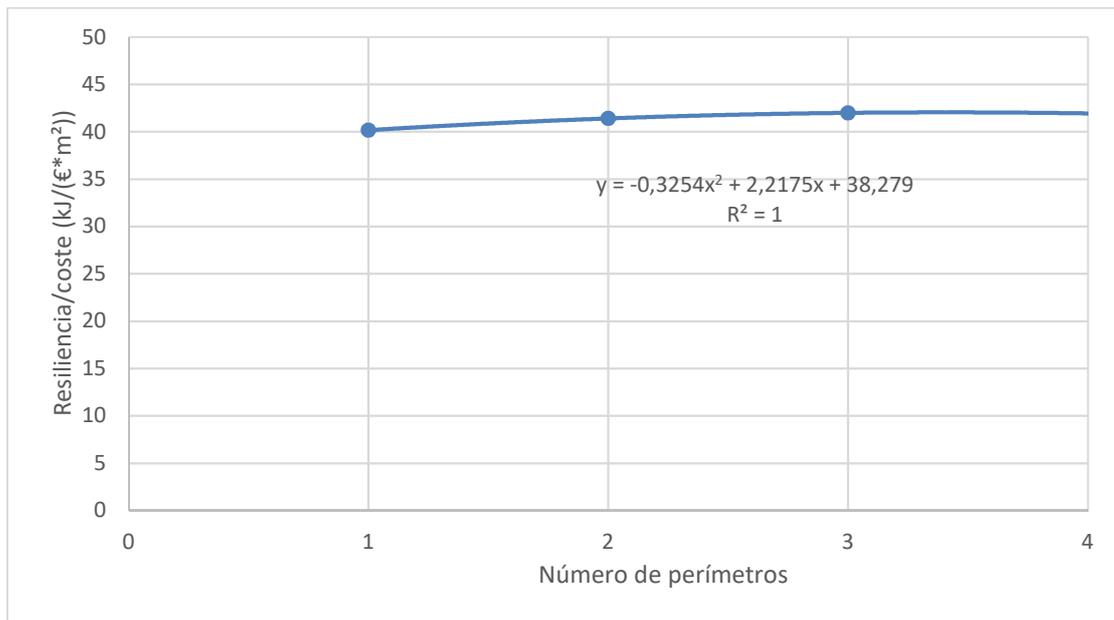


Figura 3-54. Relación  $\eta$ -número de perímetros con 60% de relleno y 90°.

En los casos de 23,45 y 68 grados, se aprecia perfectamente como con 2 perímetros el proceso es óptimo (en este caso no es necesario derivar e igualar a 0 pues un número de perímetros decimal no tiene sentido). Casos particulares constituyen los ángulos de 0 y 90 grados, que muestran una variación distinta, donde la resiliencia sigue aumentando con el número de perímetros.

A continuación se incluye una representación conjunta de todas las curvas obtenidas a fin de visualizar conjuntamente los resultados obtenidos. En ella se puede apreciar

perfectamente como la rentabilidad del proceso aumenta sobremanera cuando la orientación de las fibras, es decir, el ángulo de tramado, es de 90°, mientras que en el resto de ángulos la rentabilidad es mucho menor y hay menor variación entre ellos.

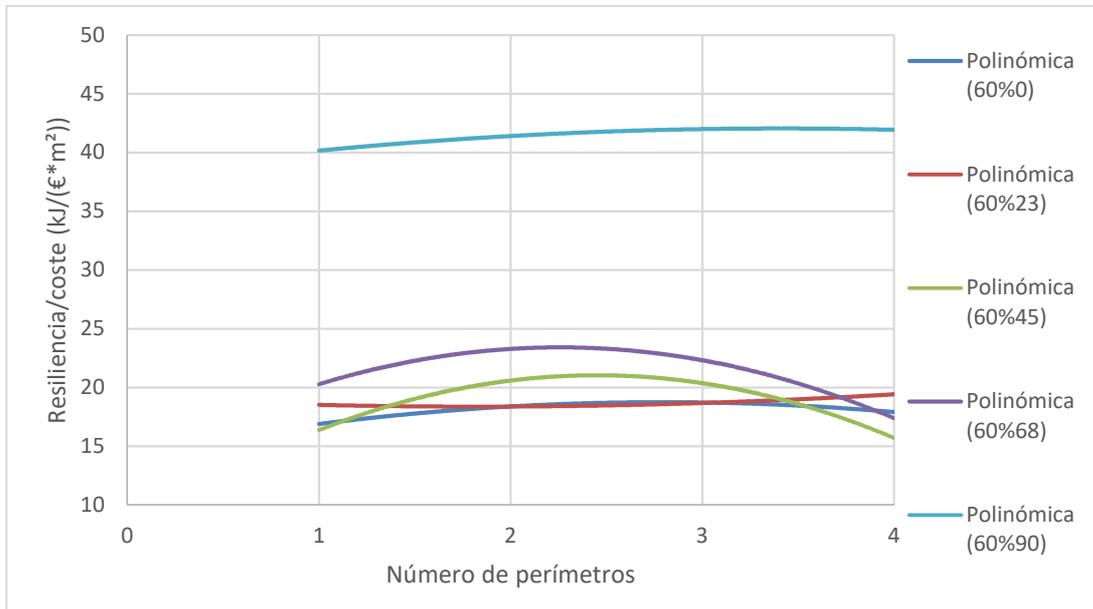


Figura 3-55. Relación  $\eta$ -número de perímetros conjunta.

En cualquier caso, y como conclusión, se obtiene un punto óptimo tanto de resiliencia como de rentabilidad utilizando 2 perímetros. A ambos lados de este punto la rentabilidad disminuye.

### 3.7.3. Relación $\eta$ -ángulo de tramado.

En apartados anteriores se confirmó que una orientación perpendicular de las fibras producía un aumento extraordinario de resiliencia. En este estudio se tiene como rango de estudio 0-90 grados, dentro de él se intentará obtener un punto donde la rentabilidad sea máxima. Para ello se representan gráficamente las relaciones entre el parámetro  $\eta$  y el ángulo de tramado.

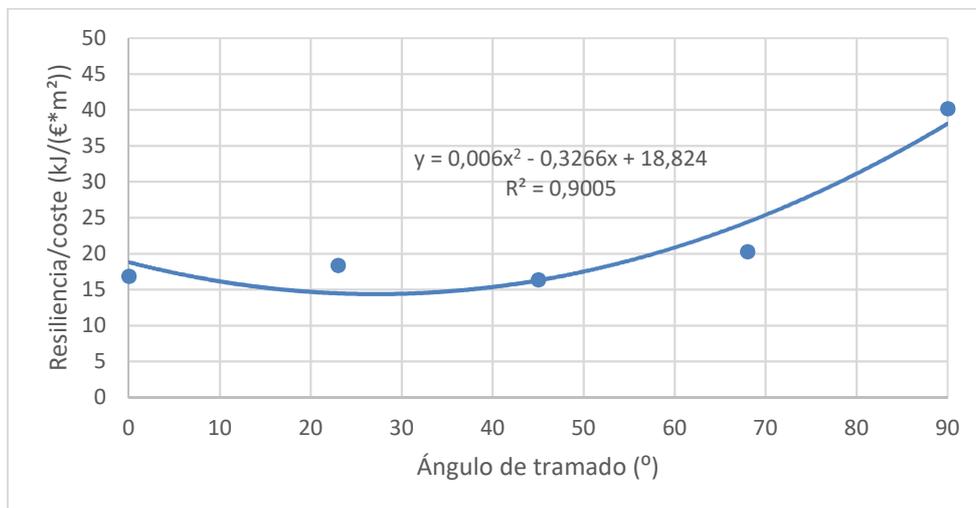


Figura 3-56. Relación  $\eta$ -ángulo de tramado con 60% de relleno y 1 perímetro.

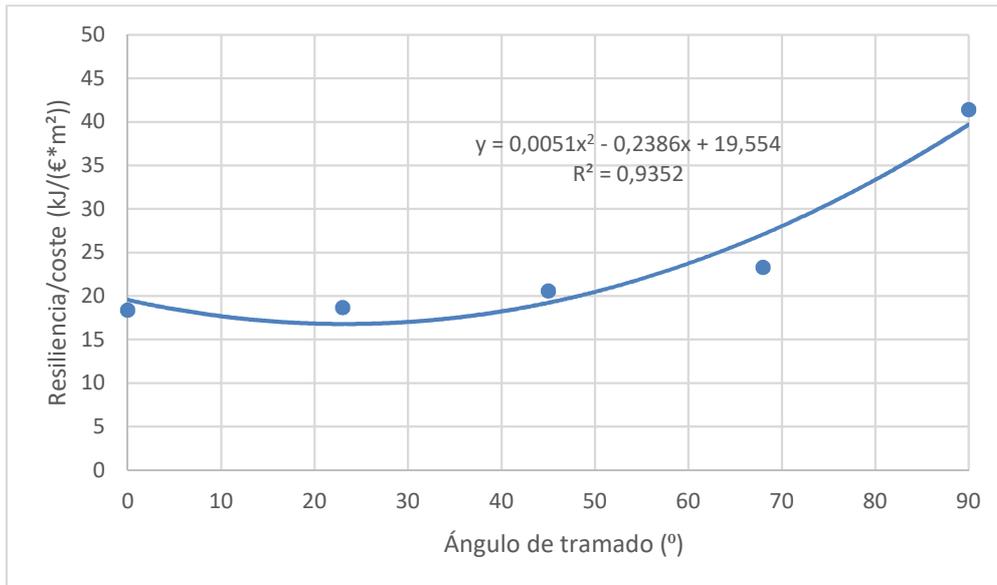


Figura 3-57. Relación  $\eta$ -ángulo de tramado con 60% de relleno y 2 perímetros.

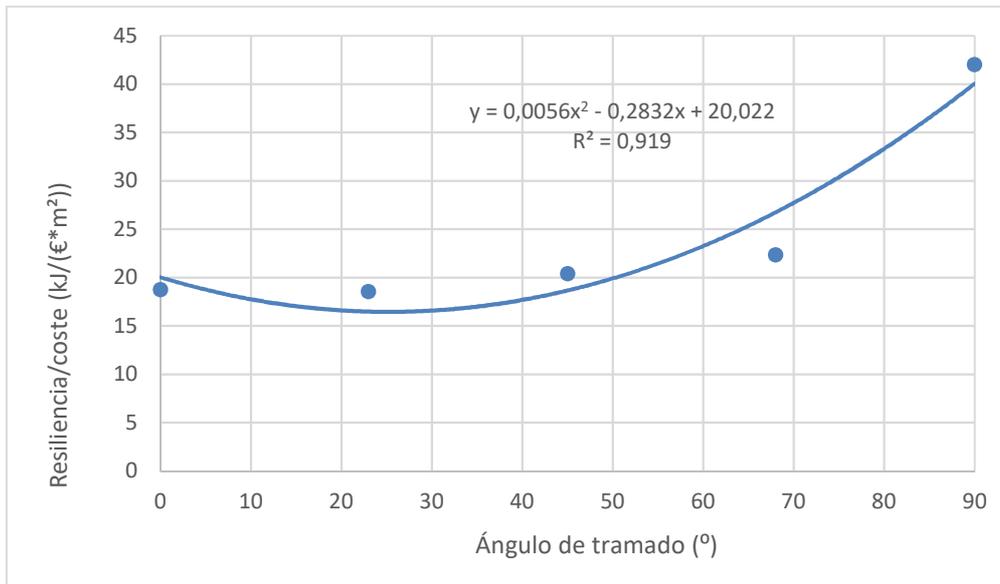


Figura 3-58. Relación  $\eta$ -ángulo de tramado con 60% de relleno y 3 perímetros.

Observando las gráficas, y atendiendo a la periodicidad de éstas (explicada en el punto 3.3) parece claro que el punto óptimo de rentabilidad de este proceso se encuentra en 90 grados (ó 270), pues además de producirse un aumento de resiliencia que casi duplica a cualquier otra orientación de fibras, reduce la cantidad de masa utilizada por probeta, por lo que rentabiliza el proceso al máximo.

También se aprecia claramente un mínimo en estas funciones, entre 20 y 30 grados, el cual hará el proceso menos rentable. En la siguiente tabla resumen se muestran los mínimos de cada función, donde  $\alpha$  representa el ángulo de tramado.

Curva	Función	Mínimo(°)
60% 1p	$0,006\alpha^2-0,3266\alpha+18,824$	27,22
60% 2p	$0,0051\alpha^2-0,2386\alpha+19,554$	23,41
60% 3p	$0,0056\alpha^2-0,2832\alpha+20,022$	25,28

Tabla 3.8. Mínimos de la relación  $\eta$ -ángulo de tramado.

A continuación, se muestra una representación conjunta de las curvas obtenidas anteriormente. Se observa como la rentabilidad del proceso se incrementa cuando se pasa de 1 a 2 perímetros, pero entre 2 y 3 perímetros la rentabilidad del proceso es la misma. Estos resultados concuerdan con las anteriores conclusiones.

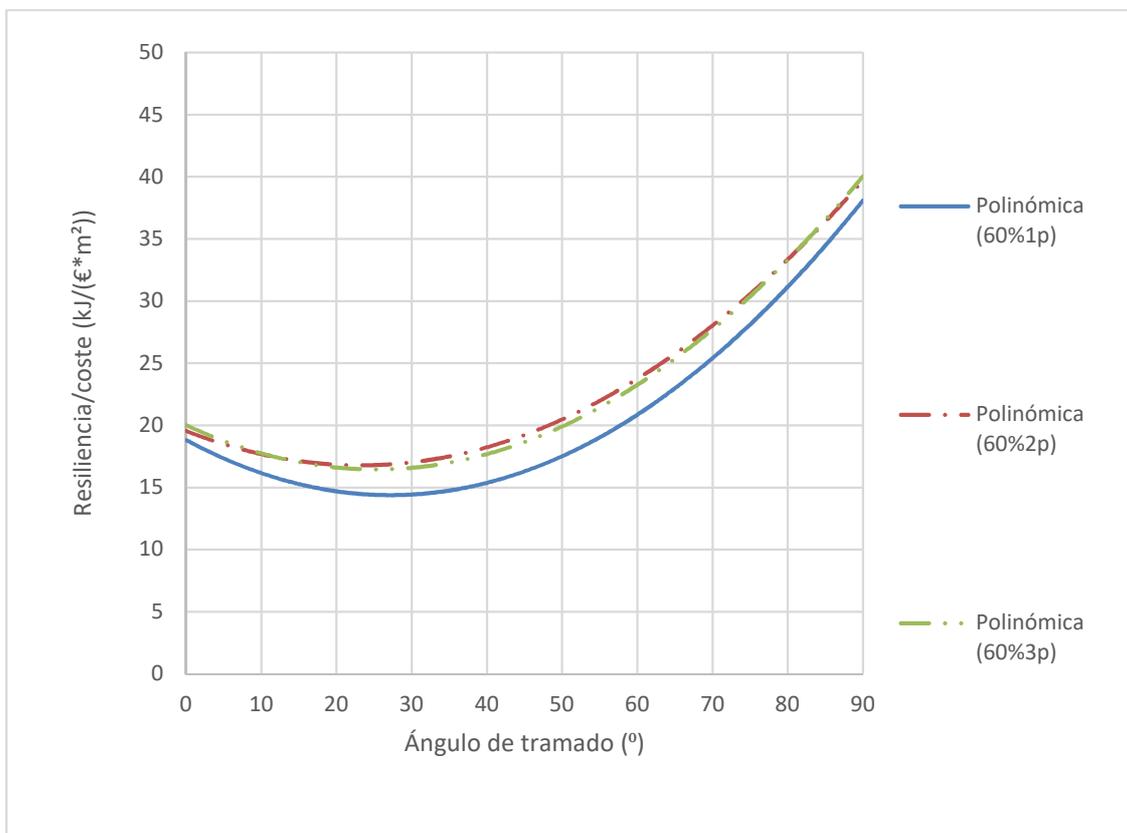


Figura 3-59. Relación  $\eta$ -ángulo de tramado conjunta.

Por tanto, se obtiene como conclusión que, para un porcentaje de relleno fijo y un número de perímetros fijo, el ángulo que oriente de manera perpendicular las fibras del relleno (90 grados) es el que optimizará el proceso, haciéndolo tanto desde un punto de vista funcional como de rentabilidad.

### 3.8. Comparación con otros ensayos: Estudio del material.

Finalmente, el último objetivo que se aborda en este proyecto es conocer la mejora que produce en la resiliencia la adición de grafeno al PLA con respecto al PLA tradicional. Para ello, se tomarán los resultados del TFG [21]. El mencionado estudio es ligeramente diferente a este proyecto. En primer lugar, estudia un material PLA tradicional, mientras que este proyecto utiliza PLA con grafeno o *Grafylon 3D*. En segundo lugar, dicho proyecto trata diferentes formas y orientaciones de la probeta, mientras que en el actual proyecto se estudia un solo tipo de orientación, variando otros parámetros. Es por ello, que, para realizar la comparación, se intentarán tomar los valores de los ensayos que más se acerquen a los realizados en este proyecto. Con ellos, se evaluará si el nivel de resiliencia sufre alguna variación debida a la inclusión de grafeno en el PLA.

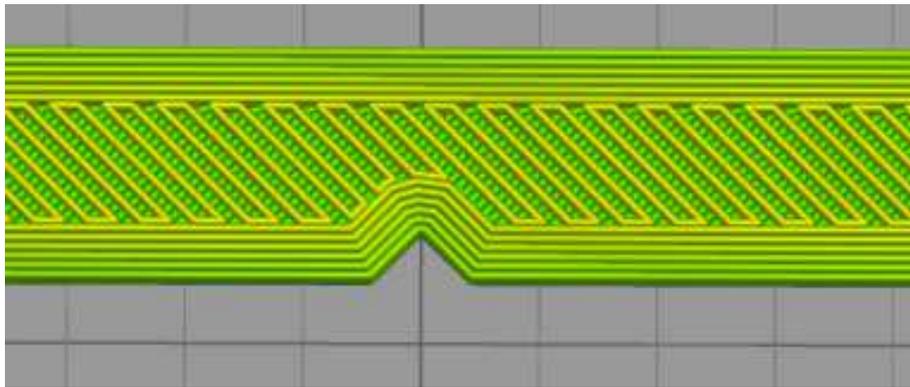


Figura 3-60. Probeta con 6 perímetros fabricada con PLA tradicional.

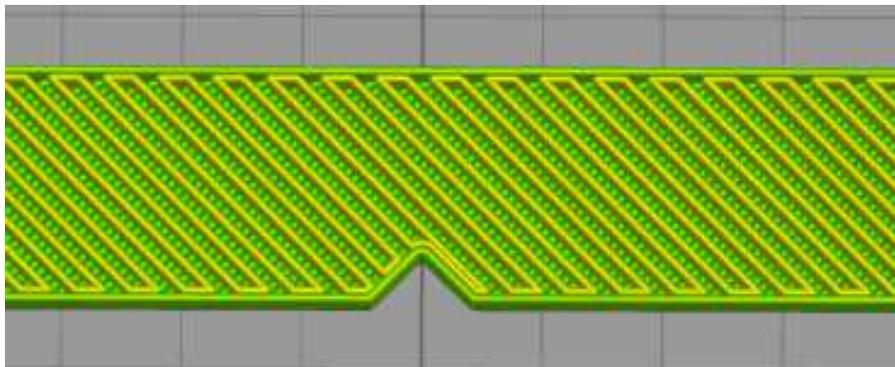


Figura 3-61. Probeta con un perímetro fabricada con Grafylon 3D.

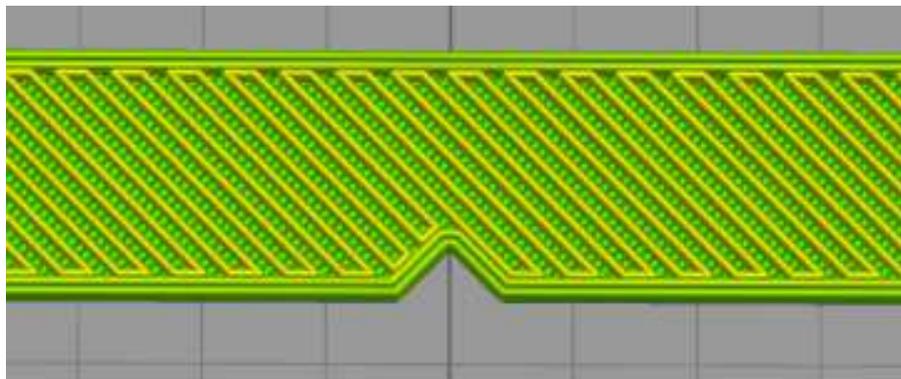


Figura 3-62. Probeta con 2 perímetros fabricada con Grafylon 3D.

En estudio realizado con PLA tradicional, para un ángulo de tramado de 45° y 6 perímetros, la resiliencia media, cuando el porcentaje de relleno varía es de 3,55 kJ/m<sup>2</sup>, oscilando los valores entre un mínimo de 3,2 kJ/m<sup>2</sup> y un máximo de 3,79 kJ/m<sup>2</sup>. Por otro lado, en el presente estudio, realizado con *Grafylon 3D*, para un ángulo de tramado de 45° y 1 perímetro, la resiliencia media, cuando el porcentaje de relleno varía es de 3,7 kJ/m<sup>2</sup>, oscilando entre valores de 3,34 kJ/m<sup>2</sup> y 4,38 kJ/m<sup>2</sup>. Comparando los resultados, se aprecia un mínimo aumento de la resiliencia., pero hay que tener en cuenta que, mientras que el ensayo con PLA tradicional cuenta con 6 perímetros, es decir, 12 filamentos perpendiculares a la dirección de impacto, el ensayo con *Grafylon 3D* cuenta con sólo 1 perímetro, lo que equivale a dos únicamente 2 filamentos perpendiculares a la entalla. Por tanto, en esta primera comprobación, parece que el aumento de resiliencia es importante. Para refutar esta hipótesis, se comparan los datos del ensayo con PLA tradicional con los datos correspondientes a 45° y dos perímetros, variando el porcentaje de relleno. El valor medio de la resiliencia es de 4,38 kJ/m<sup>2</sup>, variando los valores entre 3,86 kJ/m<sup>2</sup> y 5,01 kJ/m<sup>2</sup>. El aumento de resiliencia parece claro.

Para terminar de dar una idea aproximada del aumento de la resiliencia, ya que no se pueden realizar comparaciones exactas pues las condiciones y organización del ensayo no son iguales, se proporciona un valor aproximado de la resiliencia de una probeta realizada con *Grafylon 3D* con 45° de ángulo de tramado, relleno variable y 6 perímetros. Este valor se obtiene a partir de una de las conclusiones de este proyecto: la resiliencia aumenta con el número de perímetros. Por tanto, es factible realizar una extrapolación lineal con los datos de 1 y 2 perímetros, según la siguiente fórmula:

$$2 \text{ perímetros} - 1 \text{ perímetro} \quad 2 \text{ perímetros} - 6 \text{ perímetros}$$

$$4,37 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} - 3,7 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \quad 4,37 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} - x \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$$

Esta extrapolación lineal arroja un valor medio de resiliencia de 7,05 kJ/m<sup>2</sup>, que frente a los 3,55 kJ/m<sup>2</sup> del PLA tradicional, implica que la resiliencia prácticamente se duplica con la adición del grafeno.

Por tanto, se puede concluir que, para la obtención de piezas con mayor resiliencia, un PLA con grafeno (*Grafylon 3D*) es mucho más resiliente que un PLA tradicional, ya que la resiliencia del primero duplica aproximadamente a la del segundo.

# *Capítulo 4.*

# *Conclusiones*

## 4. Conclusiones.

A continuación, se muestran, a modo de resumen, las conclusiones del estudio realizado.

### 4.1. *Influencia de los parámetros en la resiliencia.*

- Un aumento en el porcentaje de relleno provoca un aumento proporcional en la resiliencia. La variación de la resiliencia en función del porcentaje de relleno es lineal.
- Un aumento del número de perímetros produce un aumento proporcional en la resiliencia. La variación de la resiliencia en función del número de perímetros es cuadrática.
- A medida que las fibras del relleno se van haciendo perpendiculares a la zona de impacto la resiliencia aumenta, pero lo hace de forma muy distinta en función del ángulo de tramado. Una primera parte que abarca los ángulos entre  $0^\circ$  y  $68^\circ$ , con una variación muy pequeña, y, una segunda parte correspondida entre  $68^\circ$  y  $90^\circ$ , con una variación 100 veces mayor que la anterior. Esta variación es de tipo cuadrática y periódica, la gráfica de 0 a 90 grados se repite de forma simétrica desde 90 a 180 grados, y, todo lo anterior se repite hasta 360 grados. La condición de perpendicularidad es la que hace a la probeta más resiliente.
- En cuanto al orden de magnitud de la influencia de estos tres parámetros:
  - El parámetro de mayor influencia es el ángulo de tramado, con aumentos de resiliencia de hasta  $4 \text{ kJ/m}^2$  cuando el ángulo de tramado es de  $90^\circ$ . Este parámetro es el que puede aumentar en mayor medida la resiliencia de una pieza.
  - A continuación, el porcentaje de relleno produce aumentos de hasta  $0,5 \text{ kJ/m}^2$  por cada 20% de relleno añadido.
  - como parámetro menos influyente aparece el número de perímetros, con aumentos de  $0,2 \text{ kJ/m}^2$  cuando se pasa de 1 a 2 perímetros, manteniéndose la resiliencia prácticamente constante a partir de 2 perímetros.

### 4.2. *Influencia de los parámetros en el tiempo de impresión.*

- El aumento del porcentaje de relleno se traduce en un mayor tiempo de impresión. Cada 20% de adición de relleno aumenta en unos 6 minutos el tiempo de impresión. La variación del tiempo de impresión con el porcentaje de relleno es lineal.
- El aumento del número de perímetros provoca un mayor tiempo de impresión, cada perímetro aumenta en 1 minuto el tiempo de impresión. La variación del tiempo de impresión con el número de perímetros es lineal.

- El aumento del ángulo de tramado (considerando que éste está comprendido entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ) produce una disminución en el tiempo de impresión. Esta variación no es lineal si no cuadrática.

#### **4.3. Comprobación de las estimaciones de Simplify 3D y estudio técnico-económico.**

- Las estimaciones temporales del *Simplify 3D* comparadas con el tiempo real de impresión tienen un error de defecto del 17%. Las estimaciones siempre proporcionan menos tiempo del que se necesitará en realidad.
- Las estimaciones de masa del *Simplify 3D* comparadas con la masa real de cada serie arrojan un error por exceso del 7%. La impresora extruye menos material del que *Simplify 3D* supone.
- Las estimaciones de técnico-económico de *Simplify 3D* son útiles cuando se trabaja a pequeña escala, pero para una industria sería necesario realizar un estudio exhaustivo de los costes que afectan al proceso.

#### **4.4. Optimización de la rentabilidad del proceso.**

- En la búsqueda de una combinación lo más rentable posible, entendiendo como rentabilidad la optimización de la relación resiliencia-coste, se obtiene como conclusión que un ángulo de tramado  $90^\circ$  y 2 perímetros proporcionan la mayor rentabilidad.
  - El ángulo de tramado  $90^\circ$  prácticamente duplica la rentabilidad (al igual que la resiliencia) respecto de los demás ángulos de tramado.
  - El número de perímetros mejora la rentabilidad cuando se pasa de 1 a 2 perímetros, en cambio, el incremento de rentabilidad entre 2 y 3 perímetros es prácticamente nulo.
  - En cuanto al porcentaje de relleno, no existe un valor que optimice en gran medida el proceso, basta con evitar porcentajes situados entre 40% y 60%, ya que se pueden conseguir las mismas prestaciones con porcentajes por debajo o por encima de éstos.

#### **4.5. Comparación del material.**

- El PLA con grafeno o *Grafylon 3D* prácticamente duplica en resiliencia al PLA tradicional. La adición de grafeno al PLA produce un aumento de las propiedades mecánicas del material que lo hace más competitivo en el mercado que un PLA tradicional, ya que el aumento del precio va siendo cada vez más competitivo.

#### **4.6. Estudios futuros.**

Todos los objetivos planteados se han conseguido. Sin embargo, durante el desarrollo del estudio, aparecen otros estudios sobre impresión FDM que se pueden plantear en un futuro, tales como:

- Estudio de la influencia del porcentaje de relleno, el ángulo de tramado y el número de perímetros en probetas fabricadas con las distintas orientaciones que propone la Norma UNE-EN ISO 179-1.
- Estudio de la influencia de otros parámetros que en este estudio no se han considerado (patrón de relleno, altura de capa, número de capas sólidas, etc.) en la resiliencia.
- Estudio de otros materiales procesables mediante la tecnología de impresión utilizada.

# *Capítulo 5.*

## *Bibliografía*

## 5. Bibliografía.

- [1] <http://mizaradditive.com/que-es-fabricacion-aditiva/>
- [2] <http://mizaradditive.com/impresion-3d/>
- [3] Toledo Zamora, Javier, 2016; TFG “*Estudio de propiedades mecánicas de piezas obtenidas mediante procesos de fabricación aditiva por extrusión y su relación con los parámetros del proceso*”.
- [4] Fernández Esteban, Ezequiel, 2017; TFG “*Modelización de propiedades mecánicas de las piezas obtenidas en procesos de fabricación aditiva por extrusión*”.
- [5] [http://informecotec.es/media/N30\\_Fabric\\_Aditiva.pdf](http://informecotec.es/media/N30_Fabric_Aditiva.pdf)
- [6] [https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/359388/Tesis\\_Miquel\\_Domingo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/359388/Tesis_Miquel_Domingo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [7] <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>
- [8] <http://www.stratasys.com/mx/impresoras-3d/technologies/polyjet-technology>
- [9] Crump S.S., 1992, “*Apparatus and method for creating three-dimensional objects.*”, US Patent 5,121,329.
- [10] <https://es.wikipedia.org/wiki/Estereolitograf%C3%ADa>
- [11] <http://hxx.es/tag/inkjet-binder-jetting/>
- [12] <https://www.3dnatives.com/es/la-impresion-3d-polyjet23072015/>
- [13] [https://en.wikipedia.org/wiki/Laminated\\_object\\_manufacturing](https://en.wikipedia.org/wiki/Laminated_object_manufacturing)
- [14] <https://www.filoalfa3d.com/en/specials-bundles/221-pla-grafilon-175-mm-700-g-8050327032712.html>
- [15] [https://es.wikipedia.org/wiki/Resiliencia\\_\(ingenier%C3%ADa\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Resiliencia_(ingenier%C3%ADa))
- [16] Norma UNE EN ISO 179-1.
- [17] <https://www.youtube.com/watch?v=nAqXtdb68Mg>
- [18] <http://imprimalia3d.com/impresoras3d/lemonbot>
- [19] S. Thomas, Douglas; W. Gilbert, Stanley; “*Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing*”.

- [20] <https://www.google.es/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiy2o3exY3dAhUu4YUKHYUUAhUQjRx6BAgBEAU&url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3DxhEGaRrcQSg&psig=AOvVaw3uULDkuvwk4-wsDPNk29ib&ust=1535470002374351>
- [21] Padilla Alcaraz, Ignacio, 2017; TFG “*Estudio de la resistencia mecánica al impacto de piezas obtenidas mediante procesos de fabricación aditiva por extrusión*”.
- [22] <https://tfmrimuned.wordpress.com/modelado-por-deposicion-de-hilo-fundido-fdm/>
- [23] [https://filament2print.com/es/blog/14\\_evitar-atascos-extrusor-impresora-3d.html](https://filament2print.com/es/blog/14_evitar-atascos-extrusor-impresora-3d.html)
- [24] <https://trimaker.com/el-relleno-en-impresion-3d-porcentaje-entramado-grosor-velocidad/>
- [25] <http://proyectos3d.com.ar/2/>
- [26] <https://www.3dworks.cl/blog/altura-de-capas>
- [27] <https://diymania.es/blog/verbating-lanza-bvoh-material-de-soporte-soluble-en-agua-para-impresion-3d/>
- [28] <https://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/>
- [29] <http://www.undoprototipos.com/es/tecnologias/sla-estereolitograf%C3%ADa>
- [30] <https://www.engineersgarage.com/articles/3d-printing-processes-binder-jetting>
- [31] <http://imprimalia3d.com/noticias/2015/08/05/005111/investigadores-del-virginia-tech-realizan-impresi-n-3d-cobre-mediante>
- [32] <http://totalprototipo.com/impresion-3d/tecnologias/61-tecnologia-polyject.html>
- [33] [https://www.google.es/search?q=sinterizado+selectivo+por+1%C3%A1ser&hl=es&rlz=1C1CHBD\\_esES758ES758&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwihm5fexpTdAhUBdcAKHdRCCNcQ\\_AUICigB&biw=1366&bih=662#imgrc=o3e27si9qjl2HM](https://www.google.es/search?q=sinterizado+selectivo+por+1%C3%A1ser&hl=es&rlz=1C1CHBD_esES758ES758&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwihm5fexpTdAhUBdcAKHdRCCNcQ_AUICigB&biw=1366&bih=662#imgrc=o3e27si9qjl2HM)
- [34] [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242017000400466](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242017000400466)
- [35] [https://www.vitae aeronautica.es/tab\\_slider/curso-solidworks-sevilla/](https://www.vitae aeronautica.es/tab_slider/curso-solidworks-sevilla/)
- [36] López Rodríguez, Joaquín; “*Fundamentos de metrología, tolerancias y ajustes en fabricación mecánica*”. Disponible en: <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/6103/isbn9788416325566.pdf?sequence=1&isAllowed=y>