



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Fabricación aditiva con materiales compuestos de grafeno. Estudio de la resistencia mecánica a tracción

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Autor: Guillermo Velázquez Martínez

Director: Félix Faura Mateu

Codirector: Rosendo Zamora Pedreño



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Cartagena, septiembre de 2018

Índice

1. Introducción.....	10
1.1 Historia	11
1.2 Situación actual	11
1.3 Tipos de impresión 3D	12
1.4 Costes en la fabricación aditiva	14
1.5 Objetivos del proyecto.....	17
1.6 Parámetros objetivo del TFG	19
2. Metodología	21
2.1 Material	22
2.2 Norma de aplicación	26
2.3 Costes y tiempos de impresión.....	29
2.3.1 Comparación de costes y tiempos reales y teóricos.....	32
2.3.2 Balance económico.....	32
3. Resultados	34
3.1 Gráficas tensión/deformación.....	35
3.2 Criterio de selección de resultados	38
3.3 Determinación del módulo de Young y límite elástico.....	39
3.4 Ensayo en función del ángulo de tramado	42
3.4.1 Ángulo de 0°	42
3.4.2 Ángulo de 20°	47
3.4.3 Ángulo de 45°	50
3.4.4 Ángulo de 68°	53
3.4.5 Ángulo de 90°	55
3.5 Repetición de ensayos	57
3.5.1 Ángulo de tramado de 45°.....	57
3.5.2 Ángulo de tramado de 68°.....	60
3.5.3 Ángulo de tramado de 90°.....	63
3.6 Modelización del material.....	66
3.6.1 Representación de las propiedades mecánicas en superficies 3D	66
3.6.2 Análisis de regresión de los parámetros.....	68
4. Discusión de resultados	71
4.1 Propiedades mecánicas.....	72
4.1.1 Resistencia a tracción	72
4.1.2 Módulo de Young	73
4.1.3 Límite elástico.....	73
4.2 Elongaciones máximas	74

4.3 Comparativa de resultados	77
5. Conclusiones	80
6. Anexos.....	83
Anexo I. Pruebas iniciales	84
Anexo II. Primeras tandas y variación de variables	87
Anexo III. Consideraciones de la balanza	92
Anexo IV. Consideraciones de los ensayos de tracción	94
Anexo V. Programa de recta del límite elástico.....	98
Anexo VI. Regresión no lineal	100
7. Bibliografía.....	102

Índice de tablas

Tabla 1. Previsión inicial de probetas según la Norma	22
Tabla 2. Previsión de masas y tiempos con el material inicial.....	24
Tabla 3. Previsión de masa y tiempos con material definitivo.....	25
Tabla 4. Pesaje de las probetas.....	30
Tabla 5. Tiempos reales	31
Tabla 6. Comparativa de masas y tiempos	32
Tabla 7. Consumo eléctrico del trabajo.....	33
Tabla 8. Tabla resumen para 0 ° de ángulo de tramado	43
Tabla 9. Módulo de Young y límite elástico para 0 ° de ángulo de tramado	46
Tabla 10. Tabla resumen para 20 ° de ángulo de tramado	47
Tabla 11. Módulo de Young y límite elástico para 20 ° de ángulo de tramado	49
Tabla 12. 45° de ángulo de tramado	50
Tabla 13. Tabla resumen para 68 ° de ángulo de tramado	53
Tabla 14. Tabla resumen para 90 ° de ángulo de tramado	55
Tabla 15. Tabla resumen para 45° de ángulo de tramado	57
Tabla 16. Módulo de Young y límite elástico para ángulo de tramado de 45 °	59
Tabla 17. Tabla resumen para 45° de ángulo de tramado (repetición).....	61
Tabla 18. Módulo de Young y límite elástico para ángulo de tramado de 68 °	62
Tabla 19. Repetición. Tabla resumen para 90 ° de ángulo de tramado	64
Tabla 20. Módulo de Young y límite elástico para ángulo de tramado de 90 °	65
Tabla 21. Datos de elongación máxima en mm	75
Tabla 22. Incremento porcentual de la resistencia a tracción	78
Tabla 23. Incremento porcentual del módulo de Young.....	78

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Costes del proceso	16
Ecuación 2. Deformación unitaria.....	19
Ecuación 3. Tensión nominal	19
Ecuación 4. Módulo elástico	20
Ecuación 5. Valoración de medidas	38
Ecuación 6. Criterio simplificado.....	39
Ecuación 7. Criterio simplificado con rango.....	39

Índice de Figuras

Figura 1. Comparativa de los productos de fabricación aditiva por sectores.....	12
Figura 2 .Esquema general de FDM.....	13
Figura 3. Esquema de FFF	14
Figura 4. Comparación fabricación tradicional y aditiva.....	15
Figura 5. Comparativa de fabricación aditiva con moldeado por inyección.....	16
Figura 6. Impresora 3D Prusa Lemon	17
Figura 7. Impresora 3D Lemon Bot	18
Figura 8. Mordazas de tracción.	18
Figura 9. Máquina universal de ensayos	18
Figura 10. Barra de sección transversal uniforme cargada	19
Figura 11. Diagrama fuerza alargamiento.....	20
Figura 12. Gráfica de límite elástico	21
Figura 13. Ejemplo de probeta rellena al 20% y 0 ° de tramado.....	22
Figura 14. Ejemplo de probeta rellena al 80% y 0 ° de ángulo tramado.....	22
Figura 15. Ejemplo de probeta con ángulo a 20° y rellena al 20%	23
Figura 16. Tabla de velocidades de ensayo. UNE-EN ISO 527-1	27
Figura 17. Medidas de la probeta según norma UNE-EN ISO 527-2.....	28
Figura 18. Diseño de la probeta en SolidWorks.....	28
Figura 19. Tabla de términos de potencia	32
Figura 20. Especificaciones de la máquina de ensayos.....	33
Figura 21. Gráfica de rotura con deslizamiento	35
Figura 22. Gráfica de rotura con comportamiento final dúctil.....	35
Figura 23. Gráfica de rotura con deslizamiento y rotura muy frágil.....	36
Figura 24. Gráfica de rotura con varios deslizamientos.....	36
Figura 25. Probeta 2 de 20% de relleno, ángulo de tramado de 45 °	37
Figura 26. Probeta 1 de 20% de relleno, ángulo de tramado de 45 °	37
Figura 27. Probeta 4 de 20% de relleno, ángulo de tramado de 45.....	37
Figura 28. Probeta 3 de 20% de relleno, ángulo de tramado de 45 °	37
Figura 29. Probeta 5 de 20% de relleno, ángulo de tramado de 45 °	37
Figura 30. Tabla de factores de incertidumbre de Chauvenet.....	38
Figura 31. Distribución normal	39
Figura 32. Cartel de punto de inicio de la recta de módulo elástico	40
Figura 33. Gráfica de zona lineal. Primera aproximación.....	40
Figura 34. Gráfica de zona lineal. Aproximación final.....	41
Figura 35. Tensión máxima-relleno para 0° de ángulo de tramado.....	43
Figura 36. Tiempo-relleno para 0° de ángulo de tramado	44
Figura 37. Masa-relleno para 0° de ángulo de tramado.....	44
Figura 38. Coste-relleno para 0° de ángulo de tramado	45
Figura 39. Coste-tensión máxima para 0° de ángulo de tramado.....	45
Figura 40. Módulo de Young-relleno para 0° de ángulo de tramado	46
Figura 41 Gráfica tensión máxima/límite elástico-relleno para 0 ° de ángulo de tramado	47
Figura 42. Tensión máxima-relleno para 20° de ángulo de tramado.....	48
Figura 44. Tiempo-relleno para 20° de ángulo de tramado	48
Figura 43. Masa-relleno para 20° de ángulo de tramado.....	48

Figura 45. Coste-relleno para 20° de ángulo de tramado	48
Figura 46. Coste-tensión máxima para 20° de ángulo de tramado	49
Figura 47. Módulo de Young-relleno para 20° de ángulo de tramado	49
Figura 48. Tensión máxima/límite elástico-relleno para 20° de ángulo de tramado	50
Figura 49. Tensión máxima-relleno para 45° de ángulo de tramado.....	51
Figura 50. Tiempo-relleno para 45 ° de ángulo de tramado	51
Figura 51. Tiempo-relleno para 45° de ángulo de tramado	51
Figura 52. Gráfica coste-relleno para 45 ° de ángulo de tramado	52
Figura 53. Coste-tensión máxima para 45° de ángulo de tramado	52
Figura 54. Tensión máxima-relleno para 68° de ángulo de tramado.....	53
Figura 55. Tensión-relleno para 68° de ángulo de tramado	54
Figura 56. Coste-relleno para 68° de ángulo de tramado	54
Figura 57. Masa-relleno para 68° de ángulo de tramado.....	54
Figura 58. Coste-tensión máxima para 68° de ángulo de tramado	55
Figura 59. Tensión máxima-relleno para 90° de ángulo de tramado.....	56
Figura 60. Masa-relleno para 90° de ángulo de tramado.....	56
Figura 61. Tiempo-relleno para 90° de ángulo de tramado	56
Figura 62. Coste-tensión máxima para 90° de ángulo de tramado	56
Figura 63. Coste-relleno para 90° de ángulo de tramado	56
Figura 64. Tensión máxima-relleno para 45° de ángulo de tramado (repetición).....	58
Figura 65. Tiempo-relleno para 45° de ángulo de tramado (repetición)	58
Figura 66. Coste-relleno para 45° de ángulo de tramado (repetición).....	59
Figura 67. Masa-relleno para 45° de ángulo de tramado (repetición)	59
Figura 68. Coste-tensión máxima para 45° de ángulo de tramado (repetición)	59
Figura 69. Módulo de Young-relleno para 45° de ángulo de tramado	60
Figura 70. Tensión máxima/límite elástico-relleno para 45° de ángulo de tramado	60
Figura 71. Tensión máxima-relleno para 68°de ángulo de tramado (repetición).....	61
Figura 72. Tiempo-relleno para 68° de ángulo de tramado (repetición)	61
Figura 73. Coste-relleno para 68° de ángulo de tramado (repetición).....	62
Figura 74. Tiempo-relleno para 68° de ángulo de tramado (repetición)	62
Figura 75. Coste-tensión máxima para 68°de ángulo de tramado (repetición)	62
Figura 76. Módulo de Young-relleno para 68° de ángulo de tramado	63
Figura 77. Tensión máxima/límite elástico-relleno para 68° de ángulo de tramado	63
Figura 78. Tensión máxima-relleno para 90° de ángulo de tramado (repetición).....	64
Figura 79. Masa-relleno para 90° de ángulo de tramado (repetición)	64
Figura 80. Tiempo-relleno para 90° de ángulo de tramado (repetición)	64
Figura 81. Coste-relleno para 90° de ángulo de tramado (repetición).....	65
Figura 82. Coste-tensión máxima para 90° de ángulo de tramado (repetición)	65
Figura 83. Módulo de Young-relleno para 90° de ángulo de tramado	65
Figura 84. Tensión máxima/límite elástico-relleno para 90° de ángulo de tramado	66
Figura 85. Gráfico de superficie 3D de tensión	67
Figura 86. Gráfico de superficie 3D de módulo de Young	67
Figura 87. Gráfico de superficie 3D de límite elástico	68
Figura 88. Bondad de la regresión no lineal en tensión máxima y ecuación	69
Figura 89. Error respecto a datos reales de la regresión.....	69
Figura 91. Bondad del ajuste de la regresión no lineal para límite elástico	70
Figura 92. Comparación de gráficas de resistencia a la tracción	72
Figura 93. Comparación de gráficas de módulo de Young.....	73

Figura 94. Comparación de gráficas de límite elástico	74
Figura 95. Elongación máxima según porcentaje de relleno para ángulo de tramado de 0° ...	75
Figura 96. Elongación máxima según porcentaje de relleno para ángulo de tramado de 20° .	75
Figura 97. Elongación máxima según porcentaje de relleno para ángulo de tramado de 68° .	76
Figura 98. Elongación máxima según porcentaje de relleno para ángulo de tramado de 45° .	76
Figura 99 Elongación máxima según porcentaje de relleno para ángulo de tramado de 90° ..	76
Figura 100 Elongación máxima según ángulo de tramado. Media de porcentaje de relleno...	77
Figura 101. Pantalla inicial de Simplify	84
Figura 102. Prueba 1	84
Figura 103. Prueba 2	85
Figura 104. Prueba 3	85
Figura 105. Prueba 4	85
Figura 106. Vista previa en Simplify sin mordaza	86
Figura 107. Vista previa en Simplify con mordaza.....	86
Figura 108. Primera impresión con 20% de relleno y ángulo de tramado de 0 °	87
Figura 109. Primera impresión con 20% de relleno y ángulo de tramado de 20 °	87
Figura 110. Hueco de probeta con mordaza en Simplify	88
Figura 111. Serie en Simplify sin el hueco de la mordaza	88
Figura 112. Primera impresión con 20% de relleno y ángulo de tramado de 90 °	89
Figura 113. Partes del Hotend de la impresora 3D. Vista 2	90
Figura 114. Partes del Hotend de la impresora 3D. Vista 1	90
Figura 115. Partes del Hotend de la impresora 3D. Vista 3	90
Figura 116. Primera impresión con 20% de relleno y ángulo de tramado de 90 °	91
Figura 117. Pantalla de la balanza digital	92
Figura 118. Balanza digital	92
Figura 119. Medición de densidad en la balanza	93
Figura 120. Gráficas en Metrotec.....	94
Figura 121. Probetas rotas de 20% de relleno y ángulo de tramado de 0 °	95
Figura 122. Probetas rotas de 20% de relleno y ángulo de tramado de 45 °	95
Figura 123. Probetas rotas de 40% de relleno y ángulo de tramado de 68 grados.....	96
Figura 124. Probetas rotas de 20% de relleno y ángulo de tramado de 45 °	97
Figura 125. Probetas rotas de 20% de relleno y ángulo de tramado de 90 °	97
Figura 126. Rotura dúctil de una probeta	97
Figura 127. Interfaz del programa de rectas paralelas	98
Figura 128. Código en C#. Parte 1	98
Figura 129. Código en C#. Parte 2	99
Figura 130. Interfaz de regresión no lineal en XLSTAT	100
Figura 131. Hoja con regresión no lineal en Excel. Fecha e iteraciones.....	101

1. Introducción

1.1 Historia

La fabricación aditiva es utilizada por múltiples subsectores de la industria, como la automovilística, aeroespacial y productos médicos. El origen de esta tecnología data a la década de 1980 con el desarrollo de la estereolitografía, que es un proceso que solidifica capas de polímero líquido utilizando un láser. El primer sistema de fabricación aditiva disponible fue el SLA-1 de 3D Systems. (1)

Todo comenzó en 1984, cuando Charles Hull inventa el método de la estereolitografía, proceso de impresión orientado a maquetas para la prueba de prototipos antes de su fabricación en cadena. Hull trabajaba en una empresa realizando objetos de plástico, y le resultaba muy tedioso tener que hacer primero un molde para después inyectar el plástico. Esto le llevó a pensar que sería más sencillo si pudiera crearlo capa a capa con el mismo plástico. (1)

Al igual que con cualquier técnica de impresión 3D, se requiere un archivo digital en 3D. Esto se puede obtener a través del software CAD (*SolidWorks* en este caso). Este archivo, a menudo en formato STL, se envía a la máquina, donde un segundo software, llamado *Slicer*, realiza un corte del modelo en capas delgadas de impresión de un espesor fijo (en este caso este software es *Simplify*). El formato de este archivo será g.code. Este tipo de archivos son los que tienen el script que entienden las impresoras 3D. Finalmente se le da la orden a la impresora de comenzar a imprimir. (2)

1.2 Situación actual

A pesar de que la fabricación aditiva permite la fabricación de objetos personalizados y crecientemente complejos, la velocidad lenta de impresión limita la misma en cuanto a la producción en masa. Por otro lado, han permitido replicar objetos reales sin usar moldes caros. Incluso una impresora 3D barata permite al consumidor final producir productos hechos de polímeros en su propia casa u oficina.

En la figura 1 hay una comparación de los productos de fabricación aditiva y la producción total en la industria en el año 2011. Se han clasificado los productos fabricados aditivamente en los sectores de: automovilística; aeroespacial; máquinas industriales y negocios; médico/dental; gubernamental/militar; arquitectura; productos de consumo/electrónica; instituciones académicas y otros. Hay consenso entre expertos de la industria en que la penetración del mercado de fabricación aditiva era del 8% en 2011. Sin embargo, como se puede ver en la figura 1, estos bienes sólo representan entre el 0,01% y el 0,05% de la industria relevante en sus subsectores. Por ello, se cree que la fabricación aditiva tiene margen de crecimiento.

Figura 1. Comparativa de los productos de fabricación aditiva por sectores

Table 1.1: Additive Manufacturing Shipments, 2011

Category	Relevant NAICS Codes	Percent of Total AM Made Products	Shipments of US Made AM Products (\$millions, 2011)*	Total Shipments (\$millions, 2011)	AM Share of Industry Shipments
Motor vehicles	NAICS 3361, 3362, 3363	19.5%	48.0	445 289.4	0.01%
Aerospace	NAICS 336411, 336412, 336413	12.1%	29.8	157 700.7	0.02%
Industrial/business machines	NAICS 333	10.8%	26.6	365 734.8	0.01%
Medical/dental	NAICS 3391	15.1%	37.2	89 519.5	0.04%
Government/military	NAICS 336414, 336415, 336419, 336992	6.0%	14.8	32 784.4	0.05%
Architectural	NAICS 3323	3.0%	7.4	72 186.9	0.01%
Consumer products/electronics, academic institutions, and other	All other within NAICS 332 through 339	33.6%	82.7	895 709.8	0.01%
TOTAL	NAICS 332 through 339	100.0%	246.1	2 058 925.5	0.01%

* These values are calculated assuming that the percent of total additive manufacturing made products for each industry is the same for the U.S. as it is globally. It is also assumed that the U.S. share of AM systems sold is equal to the share of revenue for AM products

Note: Numbers may not add up to total due to rounding

(1)

Por último, EE. UU. es el mayor usuario de tecnologías de fabricación aditiva. Además, es el mayor productor de sistemas de fabricación aditiva. Aproximadamente el 62'8% de todas las unidades comerciales/industriales vendidas en 2011 fueron fabricados por las 3 compañías más grandes en este sector de EE. UU.: Stratasys, Z Corporation, y 3D Systems.

1.3 Tipos de impresión 3D

La tecnología que ha popularizado la impresión de figuras 3D es FDM (*Fusion Deposition Modeling*). La tecnología FDM fue desarrollada y patentada a finales de la década de los 80 por *Scott Crump*, patentándola y creando, junto con su mujer, la empresa pionera en la fabricación de este tipo de impresoras, *Stratasys*. (3)

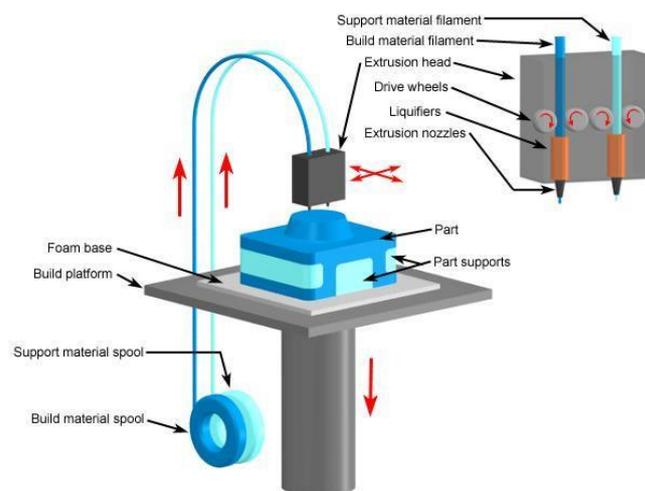
Las impresoras basadas en el procedimiento FDM crean piezas mediante la deposición en capas del material termoplástico calentado y extruido por la propia máquina. El proceso consta de tres etapas (3):

- **Procesado previo:** Básicamente, consiste en un diseño de la pieza mediante un simulador gráfico y la introducción de los datos y parámetros necesarios en el dispositivo, así como del material necesario para la fabricación de la pieza;
- **Producción:** Se calienta el material termoplástico hasta que alcanza un estado semilíquido y lo deposita en gotas a lo largo de la trayectoria previamente establecida. En los casos en los que se precisa un soporte o apoyo, la impresora deposita un material eliminable que sirve de soporte para la estructura.
- **Post-procesado:** Se retira el material sobrante y se lava la pieza para que se encuentre en perfectas condiciones para su uso.

Entre las principales ventajas de este tipo de impresoras cabe destacar el carácter ecológico tanto del proceso como del material termoplástico de producción utilizado. Además, se trata de una tecnología fácil de usar y aplicable en numerosos ámbitos, debido sobre todo a la gran estabilidad mecánica que presentan las construcciones o las complejas geometrías y cavidades que pueden presentar los productos acabados. (3)

Un esquema de este dibujo se muestra en la Figura 2:

Figura 2. Esquema general de FDM



<http://todo-3d.com/wp-content/uploads/2017/01/FDM-process.jpg>

La tecnología FDM estaba protegida por patente y nació una tecnología que en esencia es similar, *Fused Filament Fabrication* (FFF) que se ha visto en impresoras como *RepRap*. (3) Cabe mencionar que *RepRap* es la primera máquina de fabricación auto-replicante. Muchas partes de *RepRap* son de plástico. *RepRap* puede imprimir esas partes reproduciéndose a sí misma con un kit de piezas que cualquiera puede montar con el tiempo y materiales adecuados. (4)

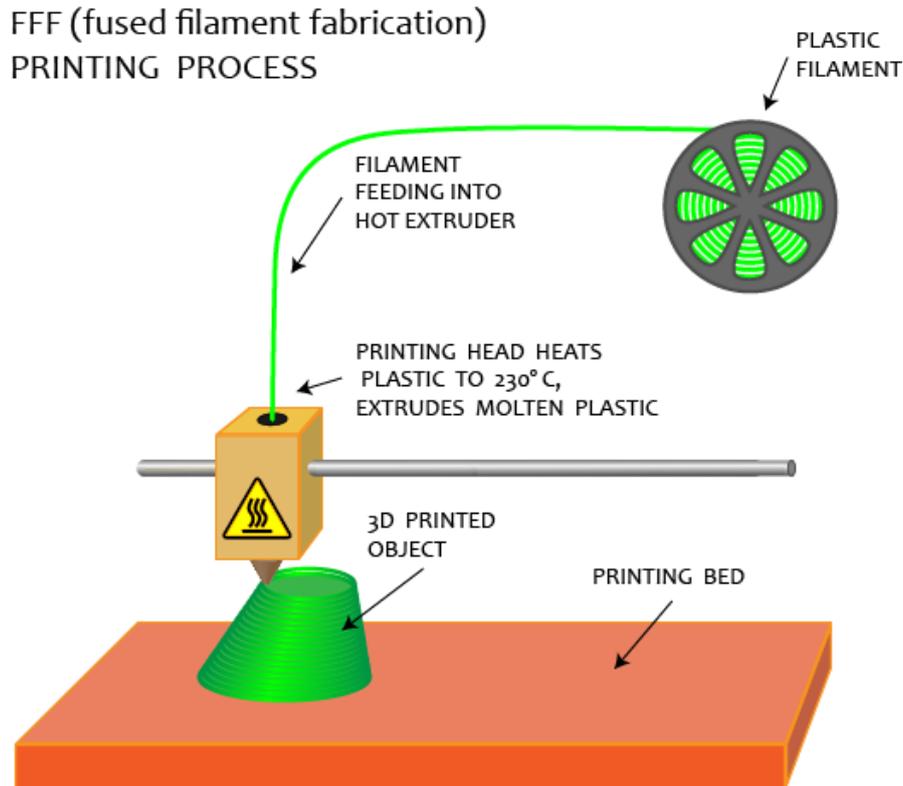
La impresión con esta tecnología comienza desde la capa inferior, creando una superficie en la base para poder separar la pieza. Se utiliza un fino hilo de plástico que pasa por el extrusor que es, en resumen, un dispositivo que calienta el material hasta el punto de fusión. En ese momento el plástico se deposita en la posición correspondiente de la capa que se está imprimiendo en cuestión. (5)

Tras ser depositado en su lugar, el material se enfría y solidifica, una vez acabada esa capa, se desplaza verticalmente una pequeña distancia para comenzar la siguiente capa. Según la pieza a fabricar es posible que se necesiten varios soportes que se eliminan a posteriori. (5)

La impresión, como en la mayoría de los métodos de impresión 3D, se realiza capa a capa. Cuanto más finas sean las mismas, mejor será la calidad final de la impresión. (5)

El esquema genérico de FFF es el que se muestra en la Figura 3:

Figura 3. Esquema de FFF



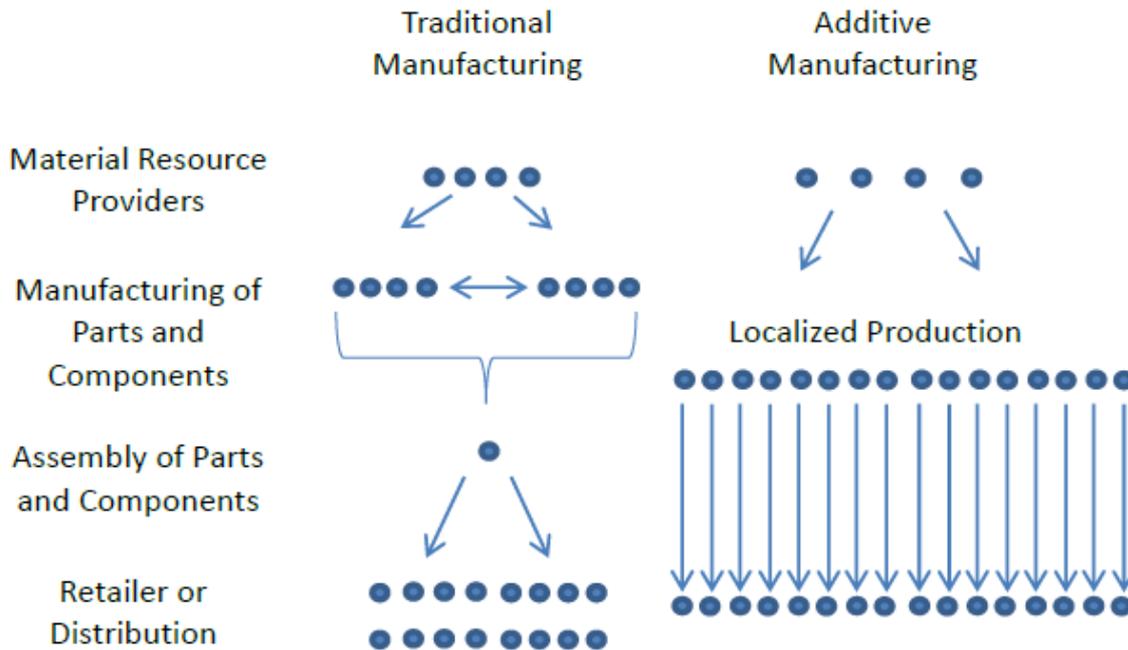
<https://libapps-ca.s3.amazonaws.com/accounts/141099/images/3dprinting.png>

1.4 Costes en la fabricación aditiva

Los costes de producción se pueden categorizar de dos maneras. El primero involucra aquellos costes que están "estructurados según bienes" (well-structured), como los costes de mano de obra, materiales y maquinaria. El segundo implica "costes de fallo" (ill-structured), como los asociados con la falla de construcción, la configuración de la máquina y el inventario. En la literatura, tiende a haber un mayor enfoque en los costes "well-structured" de la fabricación aditiva que los costes "ill-structured". (1)

La fabricación aditiva reduce la cantidad de enlaces en la cadena de suministro y acerca la producción a los consumidores, por tanto, se reducirá la vulnerabilidad a los desastres y las interrupciones. Cada fábrica y almacén en la cadena de suministro de un producto es un punto potencial donde un desastre o interrupción puede detener o dificultar la producción y entrega de un producto. Una cadena de suministro más pequeña con menos enlaces significa que hay menos puntos vulnerables a posibles interrupciones. Las interrupciones en la cadena de suministro pueden provocar impactos localizados en lugar de impactos regionales o nacionales. En la Figura 4 hay un ejemplo que compara la fabricación tradicional con la fabricación aditiva. (1)

Figura 4. Comparación fabricación tradicional y aditiva



(1)

Bajo la fabricación tradicional, los proveedores de recursos dan a los fabricantes de piezas y componentes, que pueden entregar piezas y componentes entre sí y luego a una planta de ensamblaje. A partir de ahí, el producto ensamblado se entrega a un minorista o distribuidor. Una interrupción en cualquiera de los puntos en la fabricación o el montaje puede dar lugar a una interrupción de las entregas a todos los minoristas o distribuidores si no hay redundancia en el sistema. La fabricación aditiva con producción localizada no tiene esta vulnerabilidad. Una interrupción en la fabricación no afecta a todos los minoristas y distribuidores. (1)

Hay dos modelos de costes que reciben una atención significativa en la fabricación aditiva (1):

- Hopkinson y Dickens (2003)
- Ruffo et al. (2006a)

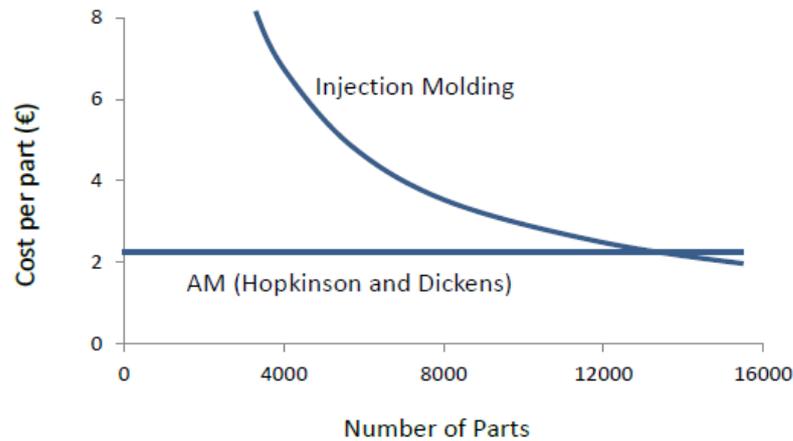
El coste de las piezas hechas con fabricación aditiva es calculado por Hopkinson y Dickens en base al cálculo del costo promedio por pieza y tres supuestos adicionales: 1) el sistema produce un solo tipo de pieza por un año, 2) utiliza volúmenes máximos, y 3) la máquina funciona el 90% del tiempo. En el análisis se incluyó mano de obra, materiales y costes de la máquina. Se consideraron otros factores, como el consumo de energía y el alquiler de espacio, pero contribuyeron con menos del uno por ciento de los costos; por lo tanto, no fueron incluidos en los resultados del informe (1). El coste promedio de la pieza se calcula dividiendo el coste total entre la cantidad total de partes fabricadas en un año. Los costes se pueden dividir en costes de la máquina, costes de mano de obra y costos de materiales. (1)

Hopkinson y Dickens estiman un coste anual de la máquina por pieza, donde la máquina se deprecia completamente después de ocho años. Esto quiere decir, que usan la suma del coste de depreciación por año (calculado como la máquina y el equipo auxiliar dividido por 8) y el

coste de mantenimiento de la máquina por año dividido por el volumen de producción. El resultado es un coste de la máquina por pieza que es constante en el tiempo, como se ve en la Figura 5. También se ve en la figura una comparación con el moldeo por inyección. (1)

Figura 5. Comparativa de fabricación aditiva con moldeo por inyección

Figure 4.1: Hopkinson and Dickens (2003) Cost Model Compared to Injection Molding



Adapted from Hopkinson and Dickens (2003)

(1) Página 15

Teniendo en cuenta que el número de piezas que se han impreso es muy inferior al punto crítico, donde costes de fabricación aditiva e inyección por moldeo se igualan, no tiene sentido comparar con otro método de fabricación. (1)

El coste de las piezas fabricadas con aditivos es calculado por Ruffo et al. utilizando un modelo de coste basado en actividades, donde cada coste se asocia con una actividad particular. Producen la misma palanca que Hopkinson y Dickens produjeron utilizando sinterización láser selectiva. En su modelo, el coste total de una construcción (C), es la suma de los costes de las materias primas y los costes indirectos. Están los costes de la materia prima como (Pmaterial), en (€/kg), multiplicado por la masa en kg (M). Los costes indirectos se calculan como el tiempo de construcción total (T) multiplicado por una tasa de costo (Pindirect). El coste total de una construcción se representa como (1):

Ecuación 1. Costes del proceso

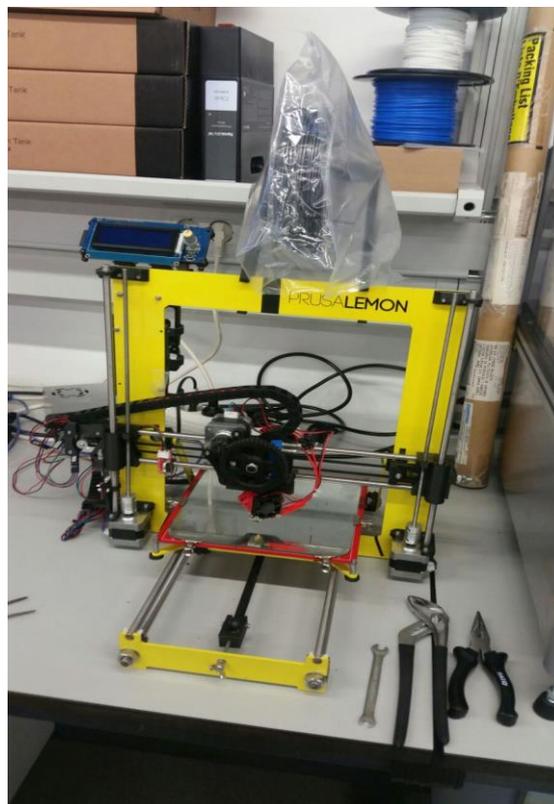
$$C = P_{material} * M + P_{indirect} * T$$

La conclusión más relevante para este TFG a la que se llega en el informe de (Thomas, Douglas.S.; Gilbert, Stanley.W 2014) es: “La investigación actual sobre los costes de fabricación aditiva revela que esta tecnología es rentable para la fabricación de lotes pequeños con una fabricación centralizada continua; sin embargo, con una mayor automatización, la producción distribuida puede ser rentable. Debido a la complejidad de medir los costes de fabricación aditiva, los estudios actuales tienen un alcance limitado.” (1)

1.5 Objetivos del proyecto

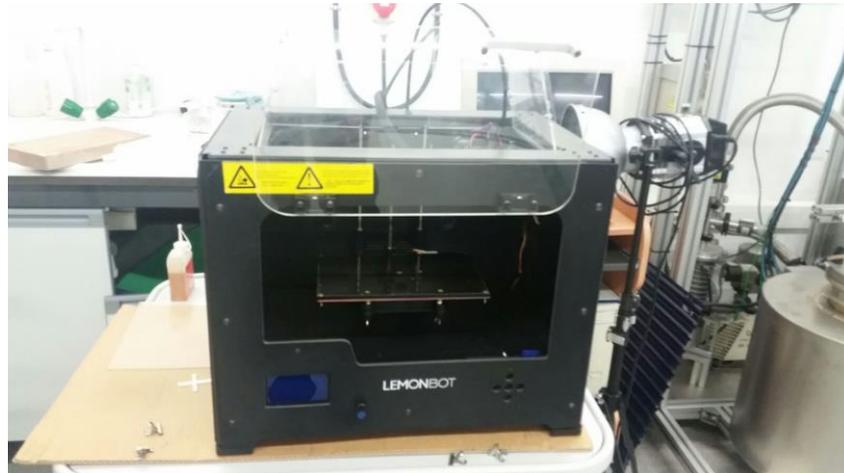
El objetivo de este TFG es estudiar las propiedades mecánicas a la tracción de un material impreso con FDM. Los parámetros principales por estudiar son: Resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, límite elástico y elongación máxima del material. Para ello se parte de un material de PLA con grafeno (6) cuyo modelo concreto es *GRAFYLON® 3D Ø 1,75 mm - 700 G*. Modelo: *IPLAGRAF7*. En principio la impresión de las probetas se hará en una impresora *Prusa Lemon* como la que se muestra a continuación en la Figura 6. Esta impresora 3D utiliza un filamento de diámetro = 2,85mm, sus características están en la referencia (7). Como se puede apreciar su descripción es idéntica al de 1,75 mm, salvo que el diámetro es diferente.

Figura 6. Impresora 3D Prusa Lemon



Por razones que serán expuestas más adelante, la impresora con la que se imprime, aproximadamente, la mitad de las probetas es una *Lemon Bot* como la que se muestra a continuación en la Figura 7. El material que emplea esta impresora es el primero descrito, el que se encuentra en la referencia (6). Durante el uso de ambas impresoras se seguirán que se cumplan las especificaciones recomendadas por los fabricantes en las referencias (6) y (7). Destacan que se imprimirá en principio a 190 °C (luego por causas que se explicarán algunas se harán a 200 °C) y que la velocidad de impresión será 40 mm/s. La temperatura de la cama será 60 °C. Es ligeramente superior a la recomendada. Pero este último parámetro solo influye en que las probetas se queden pegadas o no a la cama. Por tanto, tiene una influencia mínima.

Figura 7. Impresora 3D Lemon Bot



A partir de una serie de ensayos de tracción, se realizará un modelizado matemático de algunas de las principales propiedades mecánicas: resistencia a tracción, límite elástico, módulo de elasticidad y alargamiento de rotura. Se hará a partir de variar dos parámetros: el porcentaje de relleno y el ángulo de tramado. El objetivo se tratará de modelizar la tensión en función de esas dos variables de diseño. Se tratará de obtener el coste total de impresión y ensayos. La máquina empleada para los ensayos es la *Máquina universal de ensayos. Marca Hounsfield. Modelo H25 KS*. Se puede ver en la Figura 9, aunque para los ensayos llevará montada las mordazas de la Figura 8 (para ver cómo quedan después de montada ver Figura 126).

Figura 9. Máquina universal de ensayos

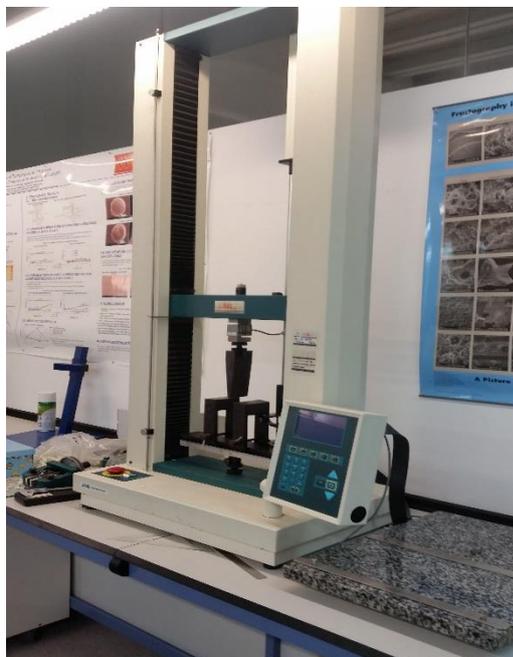


Figura 8. Mordazas de tracción.



Para realizar estudios comparativos de estos resultados se utilizarán los resultados obtenidos en el TFG (8).

Toda la experimentación del TFG se realizará de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 527. (9) (10)

1.6 Parámetros objetivo del TFG

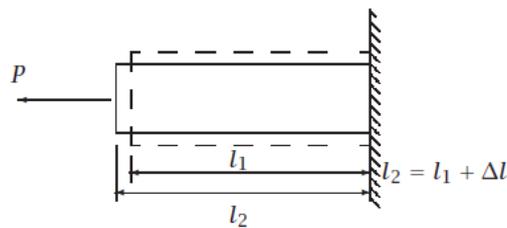
La Figura 10 muestra una barra de sección transversal uniforme en condiciones de ausencia de carga (línea discontinua) y con carga (línea continua). Sin carga, la longitud de la barra es l_1 y su sección transversal es A_1 . Cuando se carga con la fuerza P la longitud es l_2 , y por tanto un alargamiento de $\Delta l = l_2 - l_1$. El alargamiento por unidad de longitud se llama “deformación unitaria o nominal” y se designa con la letra e . (11)

Ecuación 2. Deformación unitaria

$$e = \frac{l_2 - l_1}{l_1} = \frac{\Delta l}{l_1} = \frac{l_2}{l_1} - 1$$

(11) Página 50

Figura 10. Barra de sección transversal uniforme cargada



(11) Página 50

La fuerza P , distribuida uniformemente sobre la sección transversal original, genera la “tensión nominal” que se designará por σ_{nom} :

Ecuación 3. Tensión nominal

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{A_1}$$

(11) Página 50

La variación de la carga con la deformación se ve en la Figura 11. Este diagrama puede ser transformado en un diagrama de tensión - deformación cambiando las unidades de los ejes: $\sigma_{nom} = P/A_1$ y $e = \Delta l/l_1$. El diagrama de la Figura 11 puede ser usado tanto como diagrama $P - \Delta l$ o como diagrama $\sigma_{nom} - e$.

Cuando se carga una probeta, la deformación será elástica hasta el punto “B”, lo cual significa que, si se quita la carga en esta región, la probeta regresará a su longitud original l_1 . El esfuerzo es proporcional a la deformación hasta el punto “A”, es decir, que el material cumple la ley de Hooke, la cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

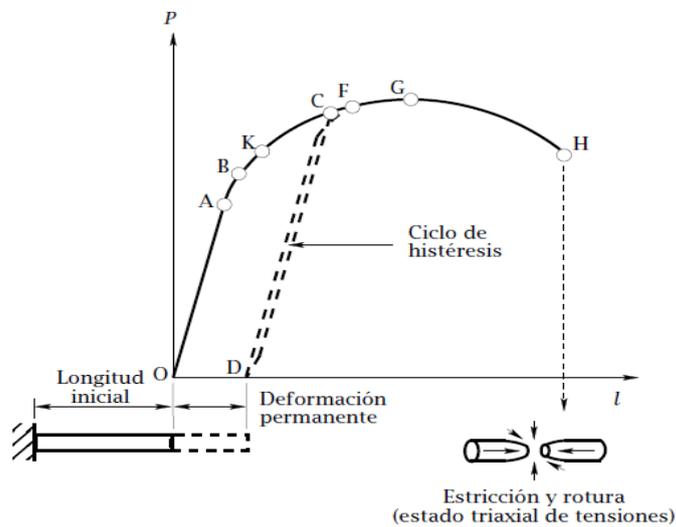
Ecuación 4. Módulo elástico

$$\sigma = Ee$$

(11) Página 50

donde “E” se conoce como módulo de elasticidad o módulo de Young. Este módulo es un número característico para cada material o grupo de materiales. Si la deformación continúa de “A” a “B”, seguirá siendo elástica, pero ya no será válida la proporcionalidad definida por la ecuación. El punto “A” es llamado límite de proporcionalidad y el punto “B” límite de elasticidad. Para la mayoría de los materiales el límite de elasticidad está ligeramente por encima del límite de proporcionalidad. Si la deformación continúa después del punto F, la carga crece hasta el punto G, donde alcanza su máximo valor de tensión el material (resistencia a la tracción), después de lo cual disminuye hasta el punto H, donde ocurre la fractura.

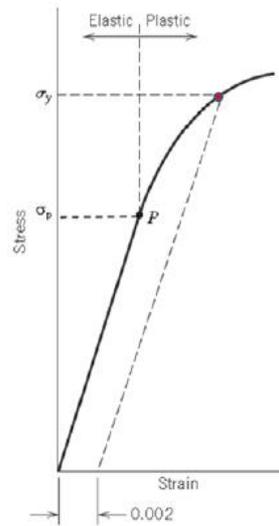
Figura 11. Diagrama fuerza alargamiento



(11) Página 51

El punto que delimita el paso de una zona a otra es el límite proporcional (σ_p). Este valor de tensión correspondiente al punto P de la Figura 12 sería el valor que calcular, lo que no es práctico ya que para ello habría que ir cargando y descargando la probeta con cargas crecientes y comprobando si se ha producido o no deformación plástica. El criterio práctico para su cálculo que consiste en buscar un punto cercano (σ_y) para el que la deformación plástica es muy pequeña. (12)

Figura 12. Gráfica de límite elástico



2. Metodología

2.1 Material

Según la norma UNE-EN ISO 527-1, punto 7 (9), el número de probetas por dirección requerida será de 5. Dado que además varía el porcentaje de relleno, hay 5 probetas por combinación posible.

Tabla 1. Previsión inicial de probetas según la Norma

Porcentajes de relleno (%)	Ángulo de inclinación	Número de probetas
20, 40, 60 y 80	0	20
20, 40, 60 y 80	22,5	20
20, 40, 60 y 80	45	20
20, 40, 60 y 80	67,5	20
20, 40, 60 y 80	90	20

El porcentaje de relleno es, básicamente, el porcentaje de la probeta dentro de las capas exteriores que se rellena de material. A continuación, se puede observar la diferencia entre el 20 y el 80 % de relleno:

Figura 13. Ejemplo de probeta rellena al 20% y 0° de tramado

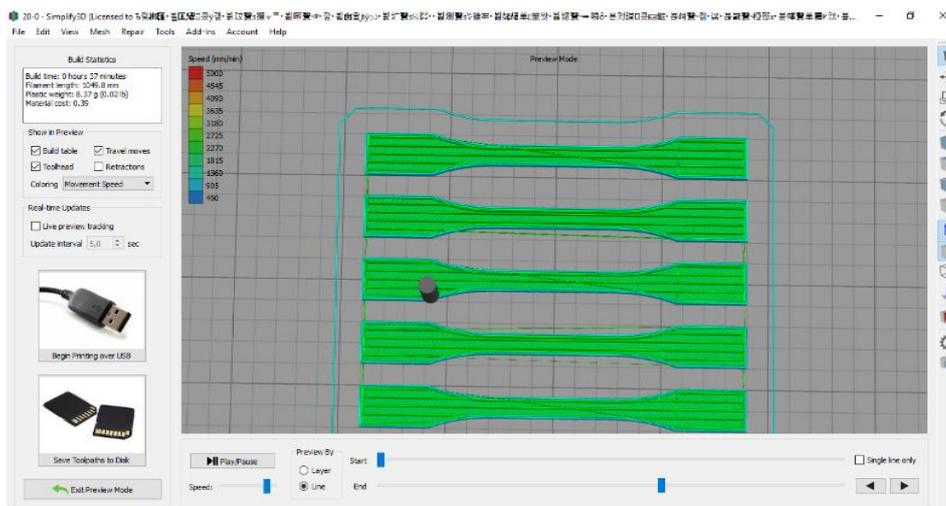
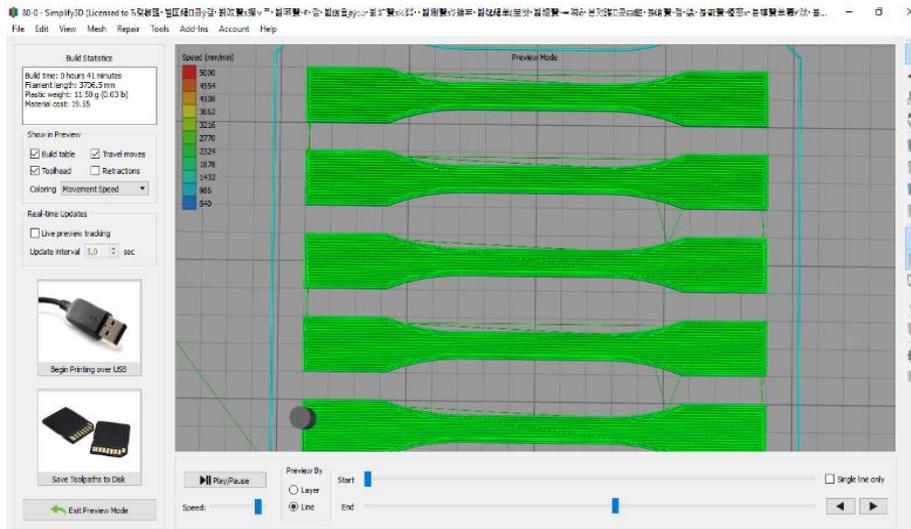
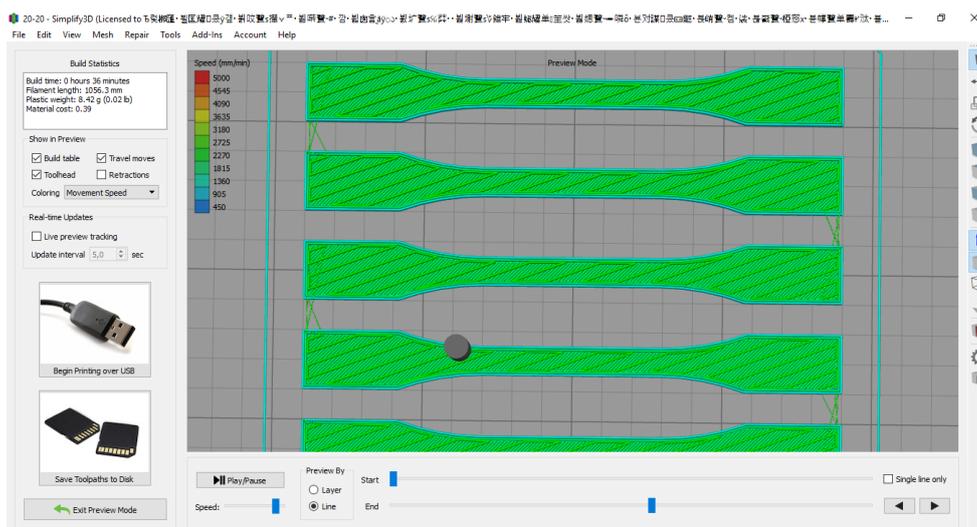


Figura 14. Ejemplo de probeta rellena al 80% y 0° de ángulo tramado



El ángulo de tramado se básicamente la orientación de las fibras interiores (ver Figura 15).

Figura 15. Ejemplo de probeta con ángulo a 20° y rellena al 20%



Inicialmente el material con el que se iba a hacer los ensayos era uno cuyo precio era mucho mayor al del material definitivo que se ha usado. Se hizo una discusión inicial en la que salía que hacían falta 212 gramos, lo que supone, más de dos bobinas. El precio de este material rondaba los 1700 (€/kg) por sus características conductivas especiales. Dado que los ensayos que se iban a realizar eran puramente mecánicos, se decidió utilizar otro material más barato. Este último material tiene un precio de 70(€/kg).

Inicialmente, cuando aún no se había cambiado el material, se decidió eliminar 10 probetas de los ensayos para no tener que comprar otra bobina de más. Las eliminadas fueron las de porcentaje de relleno de 20% y ángulos de 68° y 90° . Esto es así porque en principio no se esperaba una variación demasiado grande para este porcentaje de relleno con respecto al TFG (8). Si hubiera sido necesario. La previsión de masas y precios (usando el software de *Simplify* que se explicará con más detalle en el punto siguiente) en el material inicial era:

Tabla 2. Previsión de masas y tiempos con el material inicial

Estimación precios		Nota: El programa sólo permite poner números enteros en el ángulo.						
Ángulo	Porcentaje de relleno	Masa (g) /Probeta	N.º de probetas	Masa (g)	Coste (€/g)	Coste por ensayo (€)	Tiempo por ensayo (min)	
0	20	1,9	5	9,55	1,7	16,24	24	
0	40	2,05	5	10,23	1,7	17,39	26	
0	60	2,2	5	10,87	1,7	18,48	27	
0	80	2,35	5	11,71	1,7	19,91	28	
20	20	1,92	5	9,58	1,7	16,29	24	
20	40	2,06	5	10,28	1,7	17,48	25	
20	60	2,2	5	10,98	1,7	18,67	27	
20	80	2,34	5	11,69	1,7	19,87	28	
45	20	1,92	5	9,58	1,7	16,29	24	
45	40	2,06	5	10,28	1,7	17,48	25	
45	60	2,2	5	10,98	1,7	18,67	27	
45	80	2,34	5	11,69	1,7	19,87	28	
68	40	2,06	5	10,29	1,7	17,49	25	
68	60	2,2	5	10,99	1,7	18,68	27	
68	80	2,34	5	11,69	1,7	19,87	28	
90	40	2,06	5	10,28	1,7	17,48	25	
90	60	2,2	5	10,98	1,7	18,67	27	
90	80	2,34	5	11,68	1,7	19,86	28	
			MASA TOTAL (g)	193,33	COSTE TOTAL (€)	328,66	TIEMPO TOTAL IMPRESIÓN (min)	473
				Suma tanda 1	94,47		NÚMERO DE PROBETAS	90
				Suma tanda 2	98,86			

Los ángulos de tramado son 20° y 68°. En el TFG del año pasado de tracción (8) está escrito que usó 22,5 ° y 67,5 °, sin embargo, el programa de *Simplify* no admite ángulos con decimales. En consecuencia, se cambiaron los ángulos a 20 y 68 °.

Los resultados de la previsión con el material definitivo (sacados usando *Simplify*) es la que se muestra en la siguiente Tabla. Los pesos los calcula *Simplify* con la densidad, que en este caso es de 1,27 (g/cm³). Esta se ha medido a partir de un trozo de filamento con una balanza de la marca *Sartorius*. Para más detalles de su funcionamiento ver el punto 2.4.

Tabla 3. Previsión de masa y tiempos con material definitivo

Previsión inicial de costes y tiempo						
Ángulo	Porcentaje de relleno	N.º de probetas	Masa por ensayo (g)	Coste (€/g)	Coste por ensayo (€)	Tiempo por ensayo (min)
0	20	5	8,11	0,07	0,5677	37
0	40	5	9,12	0,07	0,6384	40
0	60	5	10,07	0,07	0,7049	43
0	80	5	11,32	0,07	0,7924	47
20	20	5	8,17	0,07	0,5719	37
20	40	5	9,21	0,07	0,6447	40
20	60	5	10,26	0,07	0,7182	43
20	80	5	11,32	0,07	0,7924	46
45	20	5	8,16	0,07	0,5712	37
45	40	5	9,22	0,07	0,6454	40
45	60	5	10,27	0,07	0,7189	43
45	80	5	11,32	0,07	0,7924	46
68	20	5	8,16	0,07	0,5712	37
68	40	5	9,22	0,07	0,6454	40
68	60	5	10,27	0,07	0,7189	43

68	80	5	11,32	0,07	0,7924	46	
90	20	5	8,17	0,07	0,5719	37	
90	40	5	9,21	0,07	0,6447	40	
90	60	5	10,26	0,07	0,7182	43	
90	80	5	11,31	0,07	0,7917	46	
		MASA TOTAL (g)	194,47	COSTE TOTAL (€)	13,61	TIEMPO TOTAL IMPRESIÓN (min)	831,00
						TIEMPO TOTAL IMPRESIÓN (horas)	13,85

La diferencia de tiempo de las Tablas 2 y 3 se debe a que inicialmente los ensayos se iban a hacer a 4800 mm/min. Pero finalmente se decidió que se hicieran a 2400 mm/min (las razones de esta decisión se indican en la sección 2.2 del TFG). En tiempo no habría una diferencia sustancial, sin embargo, en costes, como es lógico, las diferencias son muy notables. La comparación con los resultados reales está en la sección 2.4.1.

2.2 Norma de aplicación

El diseño de la probeta no ha sido objetivo de este TFG. Se ha usado el diseño que se hizo en el TFG (8). Se revisó la norma y se sacaron los puntos más importantes que hay en la misma para comprobar que efectivamente los cumple. En la norma UNE-EN ISO 527-1 se encuentran especialmente destacables los siguientes párrafos de los puntos 6.3 y 6.4 de la misma:

“Las marcas de referencia no debe arañarse, perforarse o imprimirse sobre la probeta en ninguna forma que dañe el material sometido a ensayo. Se debe asegurar que el medio utilizado para el marcado no tiene un efecto perjudicial sobre el material que se está sometiendo a ensayo y que, en el caso de líneas paralelas, éstas sean lo más estrechas posibles”

“Idealmente las probetas deben estar libres de torsión y debe tener pares de superficie paralelas mutuamente perpendiculares (véase la nota que aparece más abajo). Las superficies y los bordes deben estar exentos de rayas oquedades rechupes y rebabas”

“Las probetas que presenten cualquier incumplimiento, observable o medible, de uno o varios de estos requisitos, deben rechazarse. Si tienen que someterse a ensayos probetas con disconformidades, incluir los motivos en el informe del ensayo”

Respecto a las dimensiones de la probeta, el diseño en *SolidWorks* depende de la norma UNE-EN ISO 527-2. Respecto a las probetas se expone lo siguiente en el Anexo A de la norma (probetas pequeñas):

“Cuando se requiere determinar el módulo, se recomienda que la velocidad de ensayo corresponda a un índice de deformación del 1%min⁻¹. Puede ser difícil técnicamente medir el módulo sobre probetas pequeñas debido a las pequeñas longitudes de referencia y a los cortos tiempos de ensayo. Los resultados obtenidos con probetas pequeñas no son comparables a los obtenidos con probetas tipo I”

Se tendrá en cuenta que es posible que los resultados obtenidos serán más fiables si fueran probetas grandes. Además, el módulo seguramente presentará problemas para calcularse por lo tiempos pequeños. Respecto al índice de deformación se debe de cumplir la siguiente Tabla que está en la norma UNE-EN ISO 527-1 (Tabla 1 en la misma):

Figura 16. Tabla de velocidades de ensayo. UNE-EN ISO 527-1

Velocidad de ensayo v mm/min	Tolerancia %
0,125	± 20
0,25	
0,5	
1	
2	
5	
10	± 10
20	
50	
100	
200	
300	
500	

(9) Tabla 1. Página 13

Además, las dimensiones de esta deben cumplir:

Figura 17. Medidas de la probeta según norma UNE-EN ISO 527-2

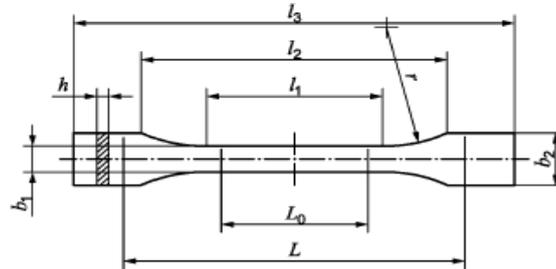


Figura A.1 – Probetas tipo 1BA y 1BB

Tabla A.1 – Medidas de las probetas tipo 1BA y 1BB

Medidas en milímetros

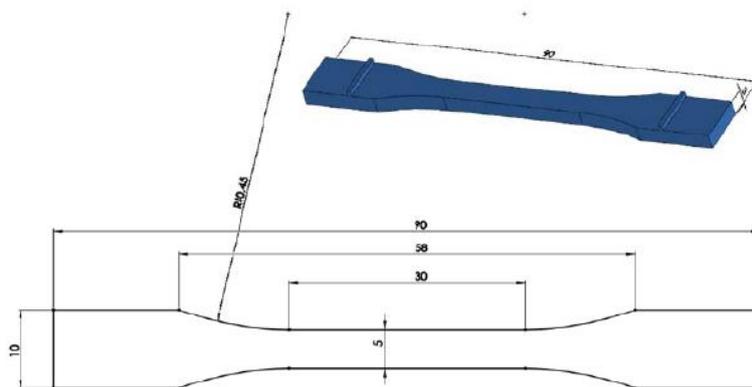
Tipo de probetas	1BA	1BB	
l_3	Longitud total	≥ 75	≥ 30
l_1	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	$30,0 \pm 0,5$	$12,0 \pm 0,5$
r	Radio	≥ 30	≥ 12
l_2	Distancia entre las partes anchas de caras paralelas	58 ± 2	23 ± 2
b_2	Anchura en los extremos	$10,0 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
b_1	Anchura de la parte estrecha	$5,0 \pm 0,5$	$2,0 \pm 0,2$
h	Espesor	≥ 2	≥ 2
L_0	Longitud de referencia	$25,0 \pm 0,5$	$10,0 \pm 0,2$
L	Distancia inicial entre las mordazas	$l_2 \begin{smallmatrix} +2 \\ 0 \end{smallmatrix}$	$l_2 \begin{smallmatrix} +1 \\ 0 \end{smallmatrix}$

NOTA Los tipos de probetas 1BA y 1BB son una reducción proporcional de las probetas tipo 1B con un factor de reducción del 1:2 y 1:5, respectivamente, con excepción del espesor.

(10) Figura A.1, Tabla A.1. Página 12

Según el TFG del año anterior, el diseño de la probeta se hizo según estas indicaciones (8). A continuación, las dimensiones del diseño final de la probeta:

Figura 18. Diseño de la probeta en SolidWorks



(8) Figura 3.4. Página 64

Se puede observar que las dimensiones de la probeta son correctas.

2.3 Costes y tiempos de impresión

NOTA: Inicialmente se han hecho una serie de pruebas con las probetas para comprobar que la configuración puesta era correcta. Después se han impreso las mismas. Las consideraciones y problemas en todas estas impresiones están en los Anexos I y II. Una vez se han impreso correctamente todas las probetas, se han ido pesando. Los detalles de la balanza y demás consideraciones respecto al pesaje están en el Anexo III.

Las masas obtenidas se muestran en la Tabla de la siguiente página. Las filas que están en rojo corresponden a las probetas que se imprimieron con la altura de la capa equivocada (se puso 0,2 en vez de 0,3). Dado que más adelante se repitieron estas probetas, las medidas que se utilizan para los ensayos son las de las filas en rojo.

Las que están en color rosa se pesaron para llevar un registro de los costes de este proyecto. Las filas en amarillo corresponden con los ensayos que se repitieron tras ver que los resultados en las curvas no cuadraban.

Cabe mencionar que, además de las anotaciones que hay sobre que probetas les falta una esquina, está anotado que en las probetas del 60% de relleno con 20° y 45° tienen un acabado superficial extraño en la primera capa. Aunque no está localizado este en la zona más delgada de la probeta.

Se puede observar claramente como las probetas con una altura de capa inferior tienen una masa visiblemente menor. Los tiempos de impresión 2, masa total 2 y coste total 2 corresponden a los que salen al sumar los datos correspondientes a las reimpresiones de probetas.

NOTA 2: El tiempo total de impresión que sale primero se ha calculado con las casillas en blanco de las primeras impresiones y las rojas de repeticiones para tener mayor precisión.

Tabla 4. Pesaje de las probetas

Ángulo	Porcentaje de	Probeta	Probeta	Probeta	Probeta 4	Probeta	Masa	Sin esquina		
0	20	1,4907	1,3557	1,3918	1,3348	1,4447	7,0177			
0	40	1,7142	1,7842	1,7016	1,7518	1,7423	8,6941	1		
0	60	1,8742	1,9003	1,8474	1,8711	1,9015	9,3945	1		
0	80	2,1389	2,1837	2,2466	2,0871	2,2029	10,8592	Ninguna		
20	20	1,3566	1,3921	1,3822	1,3447	1,4265	6,9021			
20	40	1,7833	1,7574	1,7321	1,7637	1,7024	8,7389	1		
20	60	2,0408	1,9847	1,9103	1,9953	1,9591	9,8902	5		
20	80	2,1527	2,2344	2,1243	2,0931	2,2204	10,8249	Ninguna		
45	20	1,3651	1,3994	1,4053	1,3216	1,4211	6,9125			
45	40	1,8284	1,7632	1,7101	1,7932	1,7653	8,8602	1		
45	60	1,9213	1,9724	1,9069	1,8788	1,8873	9,5667	5		
45	80	2,0506	2,0419	2,2237	2,0942	2,2451	10,6555	Ninguna		
68	20	1,5921	1,6639	1,5546	1,5579	1,5641	7,9326	1 y 5		
68	40	1,7171	1,6291	1,6506	1,7621	1,7157	8,4746	1		
68	60	1,9097	2,0278	2,0047	1,9716	1,9267	9,8405	1		
68	80	2,1745	2,1494	2,1283	2,2309	2,1123	10,7954	Ninguna		
90	20	1,6228	1,5451	1,5544	1,6006	1,5396	7,8625	1		
90	40	1,7645	1,7541	1,7204	1,7101	1,7413	8,6904	1		
90	60	1,9043	1,9088	1,9171	1,9607	1,9641	9,655	3	MASA TOTAL (g)	182,513
90	80	2,1242	2,1523	2,2203	2,2277	2,2205	10,945	Ninguna	COSTE TOTAL (€)	12,776
0	20	1,567	1,5781	1,5595	1,5882	1,5704	7,8632	Ninguna		
20	20	1,5461	1,5963	1,5988	1,5871	1,5878	7,9161	Ninguna		
45	20	1,5549	1,5321	1,5424	1,5548	1,5345	7,7187	Ninguna		
45-3	20	1,5731	1,5663	1,5694	1,5716	1,564	7,8444	4		
68-2	20	1,5718	1,5739	1,5719	1,5727	1,5653	7,8556	5	MASA TOTAL 2 (g)	229,579
90-2	20	1,5756	1,5721	1,5754	1,5741	1,5717	7,8689	5	COSTE TOTAL 2 (€)	16,071

Tabla 5. Tiempos reales

Ángulo	Porcentaje de relleno	Tiempo por ensayo de calentamiento (min)/(s)		Tiempo por ensayo de impresión (min)/(s)			
0	20	4	3,55	28	11,28		
0	40	3	50,79	41	55,84		
0	60	3	34	43	32,14		
0	80	x	x	44	27,62		
20	20	1	3'12	27	52,66		
20	40	3	55,45	41	7,72		
20	60	3	36,59	44	48,32		
20	80	x	x	44	18,14		
45	20	3	51,19	28	17,23		
45	40	3	48,24	41	11,83		
45	60	3	42,9	44	25,67		
45	80	x	x	44	43,27		
68	20	3	42,36	42	53,47		
68	40	3	44,18	41	41,11		
68	60	3	32,37	45	18,75		
68	80	x	x	46	39,39		
90	20	3	38,585	42	32,52		
90	40	4	3,35	42	21,85	TIEMPO TOTAL CALENTAMIENTO (min)	53,919
90	60	3	51,61	44	30,39	TIEMPO TOTAL IMPRESIÓN (min)	853,325
90	80	x	x	46	50,26	TIEMPO TOTAL IMPRESIÓN (horas)	14,222
0-2	20	x	x	34	30,25		
20-2	20	x	x	34	16,14		
45-2	20	x	x	34	34,11		
45-3	20	3	42,17	35	54,83	TIEMPO TOTAL CALENTAMIENTO 2 (min)	59,311
68-2	20	3	45,62	35	59,86	TIEMPO TOTAL DE IMPRESIÓN 2 (min)	1041,019
90-2	20	3	55,69	38	6,5	TIEMPO TOTAL DE IMPRESIÓN 2 (horas)	17,350

2.3.1 Comparación de costes y tiempos reales y teóricos

Se comparan los resultados de la Tabla 3 con los de la Tabla 4 del apartado anterior. Los resultados se encuentran resumidos en la siguiente Tabla.

Tabla 6. Comparativa de masas y tiempos

Mediciones reales		Previsiones del programa		Variación (%)
TIEMPO TOTAL IMPRESIÓN (min)	853,32	TIEMPO TOTAL IMPRESIÓN (min)	831,00	2,69
TIEMPO TOTAL IMPRESIÓN (horas)	14,22	TIEMPO TOTAL IMPRESIÓN (horas)	13,85	
MASA TOTAL (g)	182,51	MASA TOTAL (g)	194,47	6,15
COSTE TOTAL (€)	12,78	COSTE TOTAL (€)	13,61	

Ninguna de las variaciones parece porcentualmente significativa. Sin embargo, merece la pena prestar atención a la variación en el de la masa. Al parecer, la aproximación del programa es al alza. Para un material tan barato como el empleado en este estudio, y que además se han impreso un número relativamente reducido comparado con el sector industrial, no tiene ningún efecto. Sin embargo, para el material inicial que fue objeto de la discusión sería una variación notable. Es posible que merezca la pena estudiar por otros medios además de la aproximación de *Simplify* si la impresora está en un sector industrial con un volumen elevado de producción.

2.3.2 Balance económico

Tomando como fuente de los datos la referencia (13), la tarifa contratada a fecha de 2013 es la 6.1A. Esta tarifa es en alta tensión, para potencia de más de 450 kW en uno o más de cada uno de los 6 periodos. De los 6 periodos, se ha trabajado en el P3, P4 y P5 por lo que indica el TFG. Los términos de potencia se muestran a continuación:

Figura 19. Tabla de términos de potencia

Términos de energía €/KWh

Peaje	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6
6.1A	0,026674	0,019921	0,010615	0,005283	0,003411	0,002137
6.1B	0,023381	0,017462	0,009306	0,004631	0,002990	0,001871

(14) Página 13

Como se puede comprobar en la referencia (13), estos periodos comprenden las horas de la jornada laboral de los días laborables de: marzo, abril y mayo. No se han tomado los costes reflejados en la Tabla 12 de la referencia (13). Los datos más recientes encontrados son los de la referencia (14). Según se puede ver en esa página, el Anexo I de la referencia (13), que es de donde sale la Figura 19, sigue siendo válido. Se puede descargar el PDF de esta página también. No se apuntó exactamente en qué meses se ensayó, y las impresiones se han hecho de forma

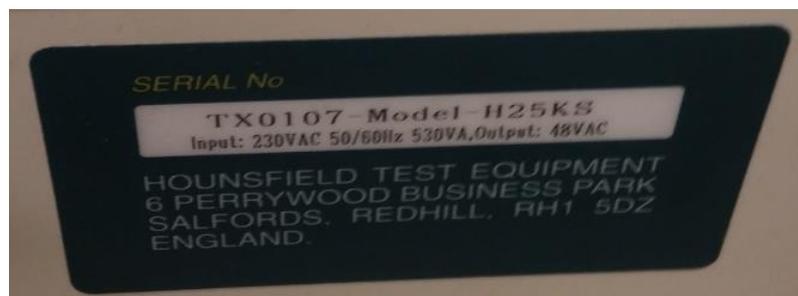
repartida a lo largo de los meses (aunque mayormente mayo). Por ello, se toma la media del precio del KWh, que es 0,0064363 €/KWh.

El TFG de la referencia (13) toma como factor de potencia uno que varía de 0,995 inductivo a 0,995 capacitivo.

La potencia que consume una impresora 3D de media, por indicación del profesor Rosendo Zamora Pedreño, es de 130-140 W. Se toman 140 W para los cálculos por ser el caso más desfavorable del rango.

La máquina de ensayos de tracción tiene las siguientes especificaciones:

Figura 20. Especificaciones de la máquina de ensayos



El consumo se da en potencia aparente. Se puede observar que es de 530 (VA), teniendo en cuenta el factor de potencia, se obtiene que la potencia sería de 527,35 (W). Este valor probablemente sea trabajando a máxima capacidad. Se tomará como referencia igualmente.

En la Tabla 20 del TFG se muestran los resultados de las elongaciones máximas. Sin embargo, todos estos valores han sido corregidos restando de forma aproximada los valores de los deslizamientos. La elongación máxima total es de 2,292 mm. Teniendo en cuenta que, como se indica en el punto 3.1 a continuación de este, la velocidad de los ensayos ha sido 1mm/min el tiempo medio de los ensayos es 2,292 minutos.

Se tomará que el tiempo en el que las impresoras o la máquina de ensayos no estén imprimiendo/ensayando genera un consumo eléctrico despreciable frente al de funcionamiento. El valor del tiempo de impresión total que aparece en la Tabla 7 es teniendo en cuenta las reimpressiones de las probetas defectuosas.

Los resultados se pueden ver en la siguiente Tabla resumen.

Tabla 7. Consumo eléctrico del trabajo

TIEMPO TOTAL DE IMPRESIÓN (Horas)	TIEMPO TOTAL DE ENSAYOS (Horas)	CONSUMO TOTAL (Wh)	COSTE TOTAL (€)
17,350	4,393	4745,693	0,03

Teniendo esto en cuenta, se observa que realmente lo expuesto en el punto 1.4 es correcto. Los costes eléctricos son completamente despreciables incluso para un material tan barato. Por lo tanto, los costes indirectos por consumo eléctrico que hay son despreciables. Si se quiere calcular el coste total habrá que tener en cuenta el “COSTE TOTAL 2” de la Tabla 4.

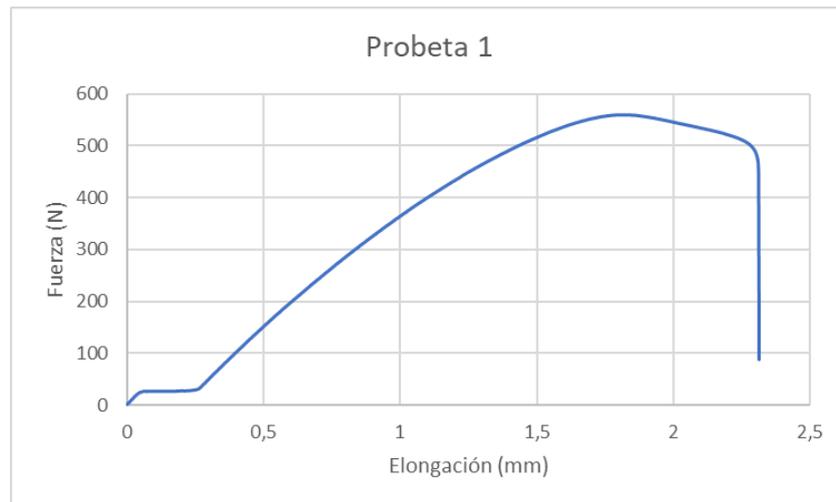
3. Resultados

3.1 Gráficas tensión/deformación

Teniendo en cuenta los datos obtenidos las gráficas pueden salir de 5 formas principales:

- La primera, y más habitual, es la que se muestra a continuación. Es una rotura normal habiendo un deslizamiento inicial. La Figura corresponde con la probeta 1, ensayo de probetas con 20% de relleno y ángulo de tramado de 0°.

Figura 21. Gráfica de rotura con deslizamiento



- La segunda gráfica ocurre cuando rompe con deslizamiento, pero al final la probeta tiene un comportamiento de “deshilachado”. La Figura corresponde con la probeta 3, ensayo de probetas con 20% de relleno y ángulo de tramado de 0°.

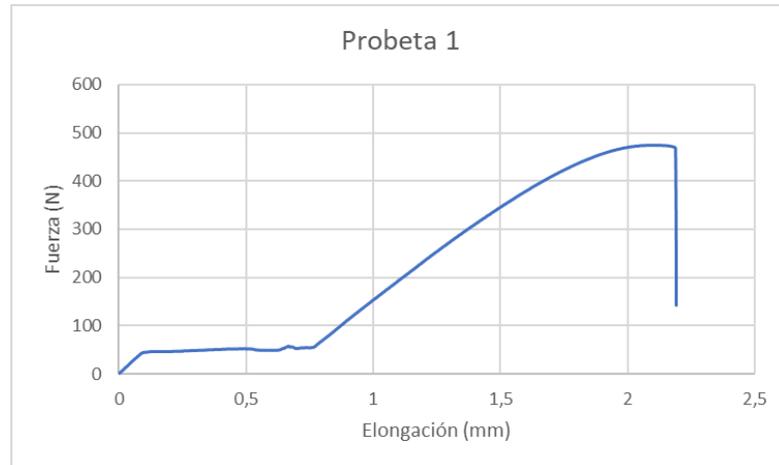
Figura 22. Gráfica de rotura con comportamiento final dúctil



- La tercera es posible que la probeta tenga un comportamiento similar a la primera, pero que rompa cuando apenas ha comenzado el declive de la fuerza. La Figura corresponde con la probeta 1, ensayo de probetas con 40% de relleno y ángulo de tramado de 20° y

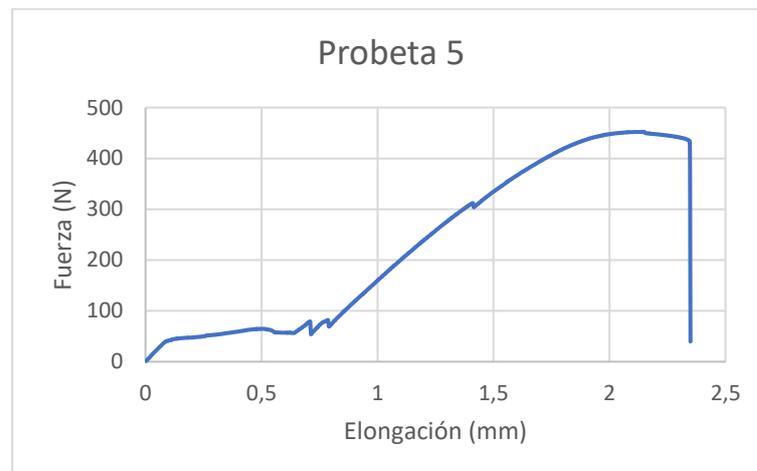
45° (sólo se ha dado en esos casos en concreto).

Figura 23. Gráfica de rotura con deslizamiento y rotura muy frágil



- La cuarta ocurre cuando hay más de un deslizamiento a lo largo de la tracción de la probeta. No da problemas a la hora de determinar la fuerza máxima, y por tanto no se estima inicialmente que tenga una influencia demasiado notoria.

Figura 24. Gráfica de rotura con varios deslizamientos



- Por último, está el caso de que rompa sin deslizamiento inicial. En la gráfica que se muestra a continuación prácticamente no ocurre este deslizamiento. Este caso es el ideal. Pero, sin embargo, este deslizamiento vuelve a estar presente en las siguientes probetas de ese mismo ensayo. Esto se ha dado en la repetición del ensayo de probetas con 20% de relleno y ángulo de tramado de 45 °. Como se ve según se hacen más ensayos, aunque sólo sean 4, el deslizamiento reaparece incluso tras estar recién calibrada como ocurrió ese día. Esto hace pensar que es inevitable, por lo tanto, habrá que cambiar el procedimiento para hallar el módulo de Young respecto a cómo se muestra en la Norma UNE-EN ISO 527-1 (9).

Figura 26. Probeta 1 de 20% de relleno, ángulo de tramado de 45 ° Figura 25. Probeta 2 de 20% de relleno, ángulo de tramado de 45 °

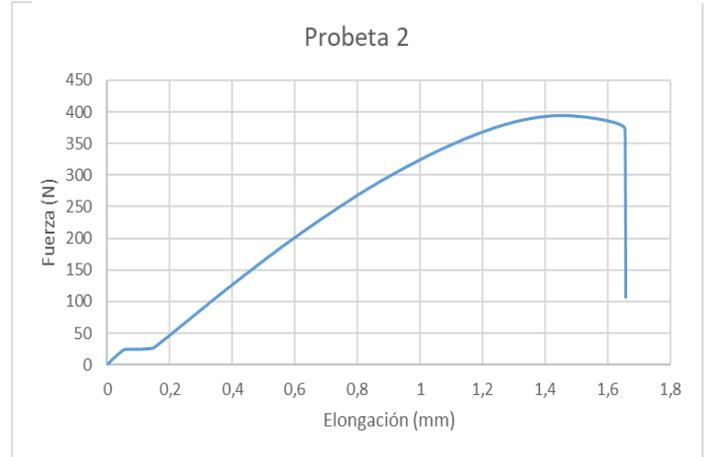
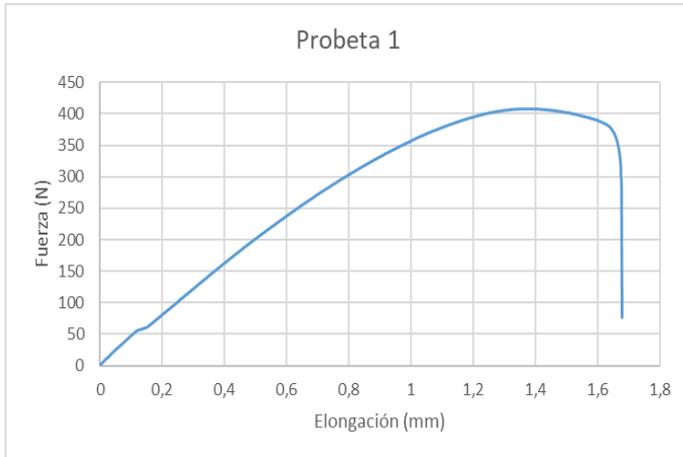


Figura 28. Probeta 3 de 20% de relleno, ángulo de tramado de 45 °

Figura 27. Probeta 4 de 20% de relleno, ángulo de tramado de 45 °

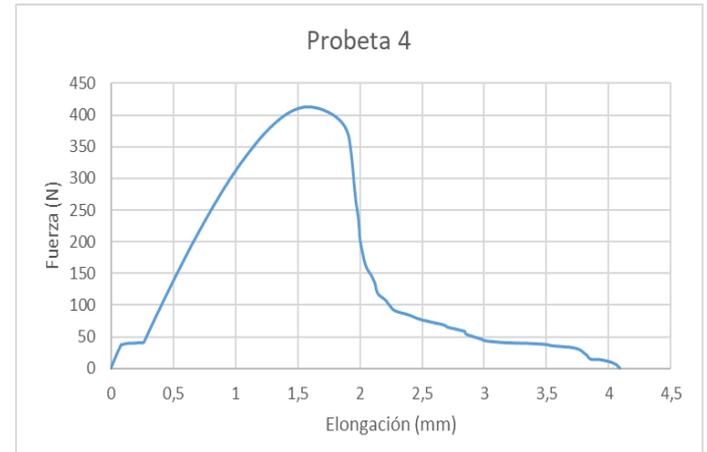
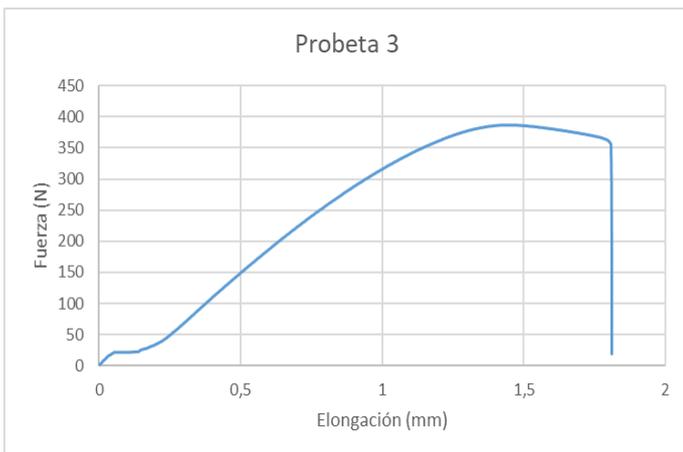
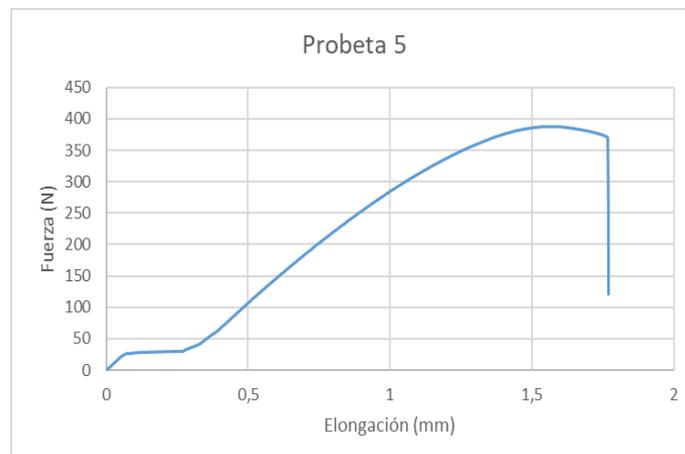


Figura 29. Probeta 5 de 20% de relleno, ángulo de tramado de 45 °



3.2 Criterio de selección de resultados

Si bien la norma UNE-EN ISO 527 da unos criterios para eliminar probetas de los ensayos, estos criterios que da se pueden aplicar sólo antes de ensayar. Por ello, se ha aplicado el criterio de *Chauvenet* para descartar las probetas que dentro de un mismo ensayo dan variaciones demasiado grandes.

Dependiendo del método empleado para su determinación numérica, las componentes de la incertidumbre de medida pueden agruparse en dos categorías:

1. Las que se estiman mediante procedimientos estadísticos (tipo A), y
2. Las que se aprecian por otros métodos (tipo B). Ambos tipos de componentes deben cuantificarse mediante varianzas o cantidades equivalentes, debiendo caracterizarse las situaciones de dependencia por las correspondientes covarianzas. La incertidumbre así determinada, puede multiplicarse por un factor superior a la unidad k , al objeto de obtener una incertidumbre total mayor, pero a condición de indicar siempre el valor de dicho factor.

Ecuación 5. Valoración de medidas

$$U = ku$$

(15) Página 14

Figura 30. Tabla de factores de incertidumbre de Chauvenet

n	$k(n)$	n	$k(n)$
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

(15) Tabla 2.2 Página 15

Cabe destacar que estos factores serían equivalentes al factor “ $k\alpha$ ” utilizado para determinar intervalos de confianza en una distribución normal.

El criterio de *Chauvenet* básicamente consiste en rechazar todas aquellas medidas cuya probabilidad de aparición sea inferior a $\alpha = \frac{1}{2n}$, siendo n el número de reiteraciones de la medida. Esto supone que se deben rechazar aquellas medidas cuya desviación a la media sea superior a un determinado valor (función de la desviación típica muestral). Por lo tanto, el criterio se simplifica a la siguiente expresión:

Ecuación 6. Criterio simplificado

$$|x^i - \bar{x}| > k(n)s$$

(15) Ecuación 2.8 Página 15

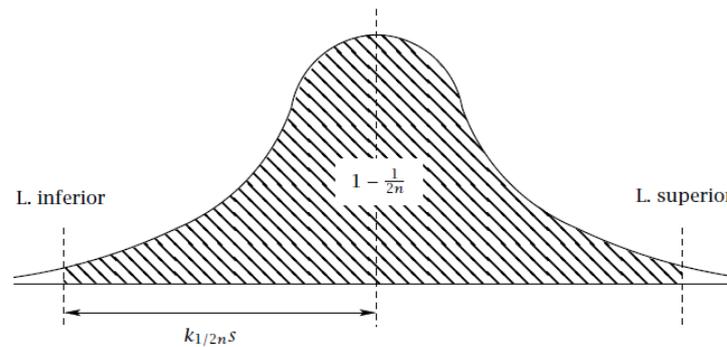
Donde $k(n) = k\alpha = 1/2n$ se obtiene a partir de la distribución normal (véase la figura 31), su valor se puede obtener de la Tabla de la Figura 30. Si se elimina el valor absoluto y se cambia la desigualdad anterior en términos de aceptación, se puede obtener la siguiente expresión:

Ecuación 7. Criterio simplificado con rango

$$\bar{x} - k(n)s \leq x^i \leq \bar{x} + k(n)s$$

(15) Ecuación 2.9 Página 15

Figura 31. Distribución normal



(15) Figura 2.1. Página 16

Para aplicar el criterio de *Chauvenet* hay que tener en cuenta lo siguiente:

- El criterio de *Chauvenet* se realizará de manera continuada hasta que no se rechace ninguna medida.
- El número máximo de rechazos que se aceptan es 1 si el número de reiteraciones de la medida es menor o igual a 10 y 2 si se encuentra entre 10 y 20. Si hubiese más rechazos, la serie de medidas debe ser anulada y revisado el método empleado. Debe tenerse en cuenta que, si en una iteración de aplicación del criterio salen del intervalo más de un dato, sólo se rechaza el más alejado. Por tanto, en cada iteración sólo se puede rechazar un dato. Así, para muestras con 10 o menos datos, como máximo se podrán hacer 2 iteraciones y para muestras con datos entre 10 y 20, como máximo se podrán hacer 3 iteraciones.

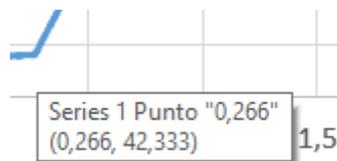
3.3 Determinación del módulo de Young y límite elástico

Para determinar el módulo de Young se ha tomado como referencia la Norma UNE-EN ISO 527-1 :2012 (9). En el punto 10.3 de la norma (página 23) está el punto que se busca.

Hay dos métodos posibles por los que hallar el módulo elástico: Recta secante (10.3.2 de la norma) y pendiente de la recta de regresión (10.3.3 de la norma). Se aplica lo explicado en el punto 10.3.3. Según la norma, hay que trazar a la recta en el rango de deformación que viene dado por: $0,0005 \leq \varepsilon \leq 0,0025$. Sin embargo, esto no es aplicable en este caso. Dado que en prácticamente todas las gráficas que proporciona el programa hay deslizamiento, si se aplica esto en este caso no saldrá el valor correcto. Inicialmente, se pensó en aplicarlo en el tramo inicial tras el deslizamiento, pero determinar su inicio es complicado ya que no hay más remedio que hacerlo de forma aproximada a golpe de vista.

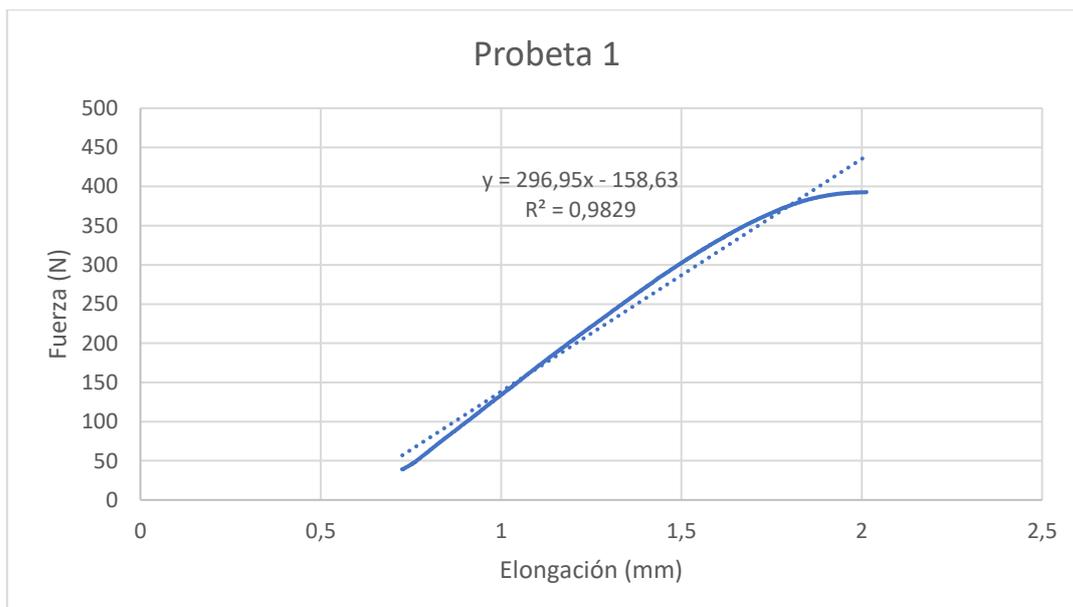
Por tanto, lo que se hará, es coger el mayor número de puntos posibles que entran en la zona lineal de la curva. Se coge inicialmente un punto donde se vea que la gráfica empieza a crecer. Al poner el ratón encima de la gráfica, como es apreciado en la siguiente Figura, Excel muestra en un cartel el punto al que corresponde.

Figura 32. Cartel de punto de inicio de la recta de módulo elástico



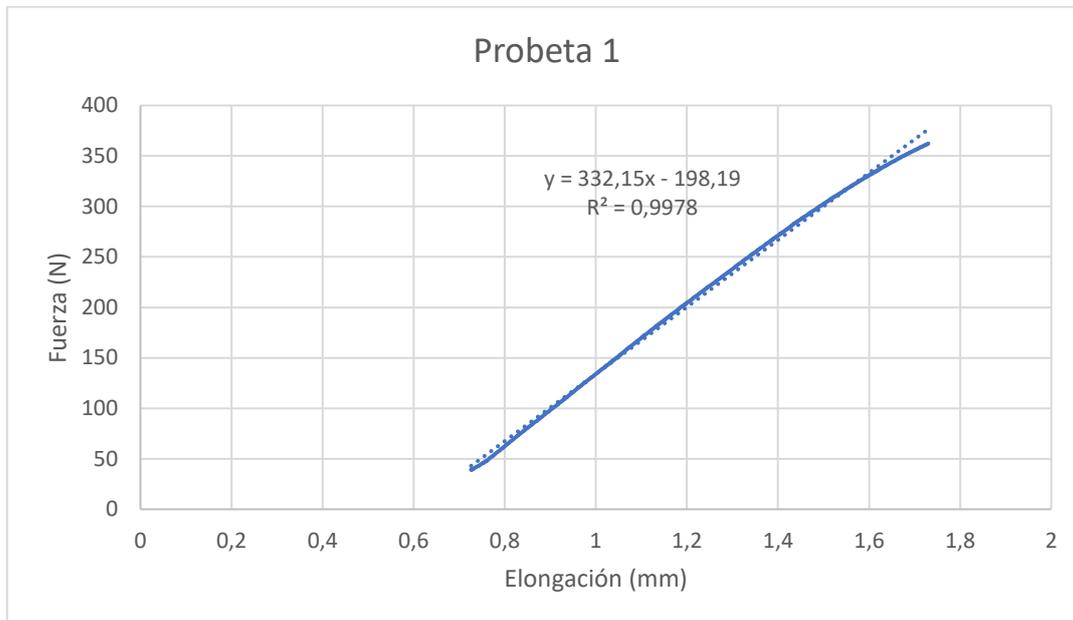
Este punto del cartel da un punto de deformación muy aproximada a partir del cual buscar donde empieza a crecer de manera constante. El punto máximo para sacar la recta de regresión, inicialmente, es el punto donde se da la tensión máxima. Obviamente al hacer esto, hay una pequeña zona curva al final que no pertenece a la zona lineal como se puede ver a continuación:

Figura 33. Gráfica de zona lineal. Primera aproximación



Eliminando una cierta elongación, sin excederse, se busca que la recta quede ajustada con un R^2 cercano al 0,99 o superior, en la mayoría de los casos.

Figura 34. Gráfica de zona lineal. Aproximación final



Nótese que la pendiente que se da en la Gráfica es en (N/mm). Para sacarla en (MPa) hay que dividir por 15 mm² (la sección), y multiplicar por la distancia entre las mordazas de 70 (mm).

Nótese cómo además la variación de la pendiente es mucha comparando las dos aproximaciones.

Para hallar el límite elástico es necesario hallar la recta paralela a la del módulo de Young desplazada un $\epsilon = 0,2\%$. Se ha desarrollado un programa simple que despeja la recta paralela a la que le se le proporcione. Se ha escrito en el lenguaje de programación C# con la herramienta *Visual Studio 2017* (para más detalles del programa ver el Anexo V).

A continuación, se muestra con un ejemplo el despeje necesario.

$$\text{Recta de módulo de Young: } Y=140'47*X - 56'57$$

Se sustituye en $Y=0$. En ese punto, se halla la X de la ecuación. A esa X se le suma el desplazamiento del $0'2\%$ que corresponde en este TFG con $0'002*70$. Con esto ya hay un punto definido de la nueva recta y la pendiente, ya que es paralela. En este caso la X es $0,5427$. Despejando:

$$\text{Recta de módulo elástico: } Y = 140'47*(X-0.5427) \rightarrow Y = 140,47*X - 76,2358$$

Este será el despeje que se realizará de forma recurrente con la ayuda del programa.

Al hallar el límite elástico de las probetas con 40% de relleno y ángulo de 20° sale por encima del máximo. Como la curva es aproximada, y casualmente corta en un punto superior a la curva, se presenta así. Como se ha visto en el punto 4.1, la gráfica aparentaba ser más frágil de lo normal. Por esto, es posible que, al intentar aproximar el módulo elástico por la recta, salga con un valor superior a la tensión máxima. A fin de cuentas, que sea frágil implica que rompe sin

deformarse mucho, es lógico que el límite elástico coincida con el punto de tensión máxima. Por ello, se aproxima su valor de módulo elástico a la tensión máxima.

El criterio de *Chauvenet* se ha aplicado para la tensión máxima. De las probetas válidas se halla el módulo de Young y el límite elástico. Esto es así porque se supone que estas 3 variables están íntimamente relacionadas.

3.4 Ensayo en función del ángulo de tramado

Las gráficas de tensión máxima - porcentaje de relleno, y las de límite elástico-porcentaje de relleno, se han ajustado todas a una ecuación polinómica de segundo grado. Es la usada también en la de coste-tensión máxima y en las de módulo de Young-porcentaje de relleno. En el resto son lineales.

Esto no es así porque sean las que mejor se ajusten siempre, sino porque se espera que, tomando como referencia los resultados de (8), la tensión máxima, módulo de Young y límite elástico crezcan muy poco al principio con el porcentaje de relleno y posteriormente se incremente el crecimiento.

Como los datos del módulo de Young y el límite elástico se calcularon después de repetir los ensayos, sólo se muestran los gráficos y datos de estos tomando las repeticiones en cuenta. No se estima necesario mostrar los datos en los otros, al final cuentan sólo los datos con las repeticiones hechas.

El criterio de *Chauvenet* se aplicará también para las medidas de la elongación. Teóricamente, si una probeta es válida en cuanto a que su rango entra en el rango de *Chauvenet* para la tensión máxima, debería serlo también su valor de elongación. Sin embargo, algunas de estas probetas que rompieron con deslizamiento final entraban en el rango para tensión máxima. Para la elongación esto no es así, ya que con ver la gráfica de la probeta sin más se ve que no es correcta en cuanto a la elongación. Por ello, para aplicar *Chauvenet* para la elongación, primero se descarta estas probetas. Con las que queden se aplica *Chauvenet*. Los datos para el criterio de *Chauvenet* se calcularon después de repetir los ensayos. Sólo se muestran los gráficos y datos de estos tomando las repeticiones en cuenta.

3.4.1 Ángulo de 0°

Se ha aplicado Chauvenet en todas las curvas tensión/deformación. Se ha descartado la probeta 1 del 20% de relleno. Salían dos medidas fuera de rango, pero sólo se ha desechado la más alejada. También se ha descartado la probeta 2 del 80% de relleno. En ambos casos han salido todas las medias en el rango en la segunda iteración.

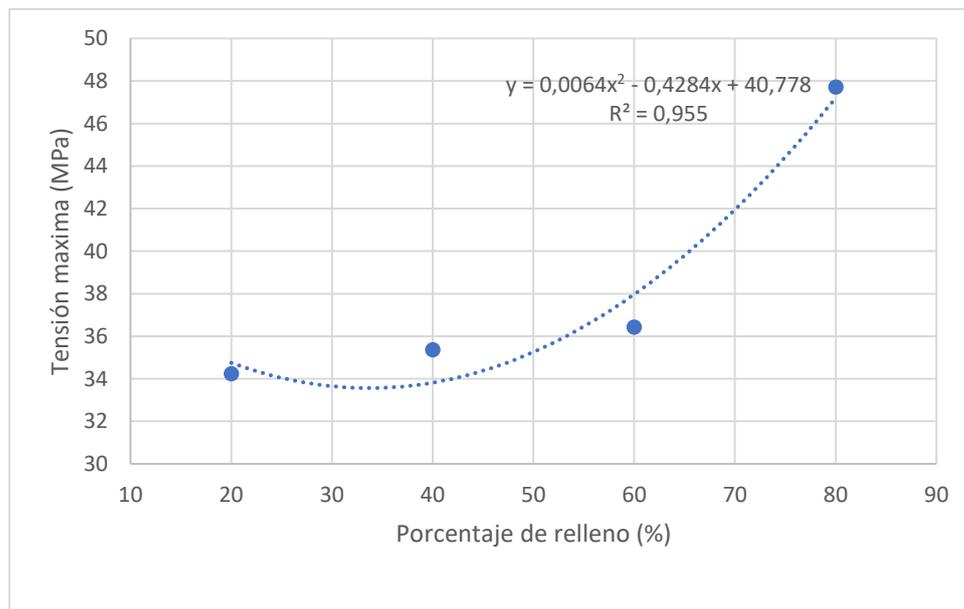
Los resultados que se han obtenido de todo lo anterior, junto con los datos de las masas de los pesajes y los tiempos de impresión se muestran a continuación:

Tabla 8. Tabla resumen para 0° de ángulo de tramado

Porcentaje de relleno	Tensión máxima (MPa)	Tiempo (min y s)	Tiempo (min)	Masa por ensayo (g)	Coste por ensayo (€)
20	34,240	34	30,250	7,863	0,550
40	35,360	41	55,840	8,694	0,609
60	36,427	43	32,140	9,395	0,658
80	47,722	44	27,620	10,859	0,760

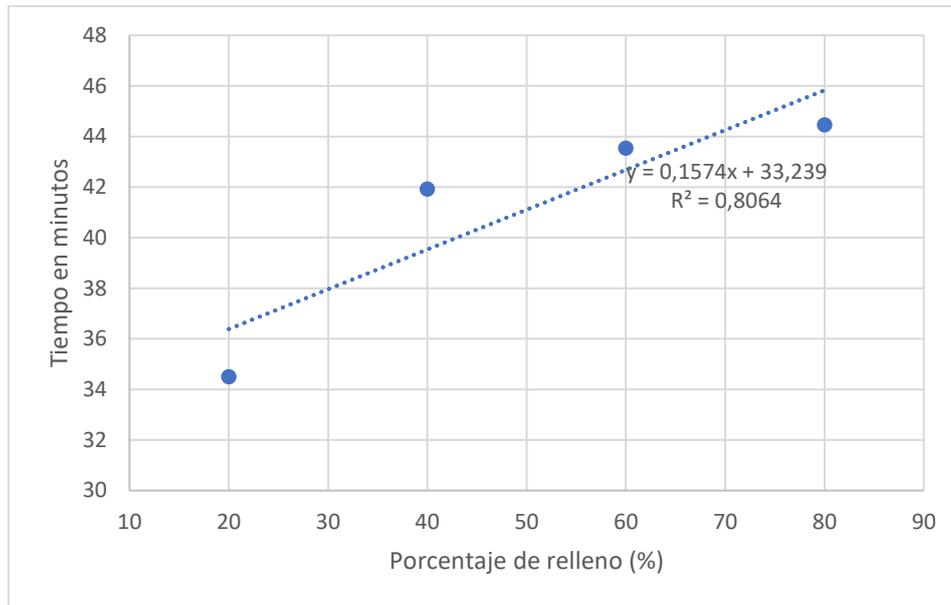
A partir de estos datos se han sacado una serie de gráficas que ilustran mejor el comportamiento del material.

Figura 35. Tensión máxima-relleno para 0° de ángulo de tramado



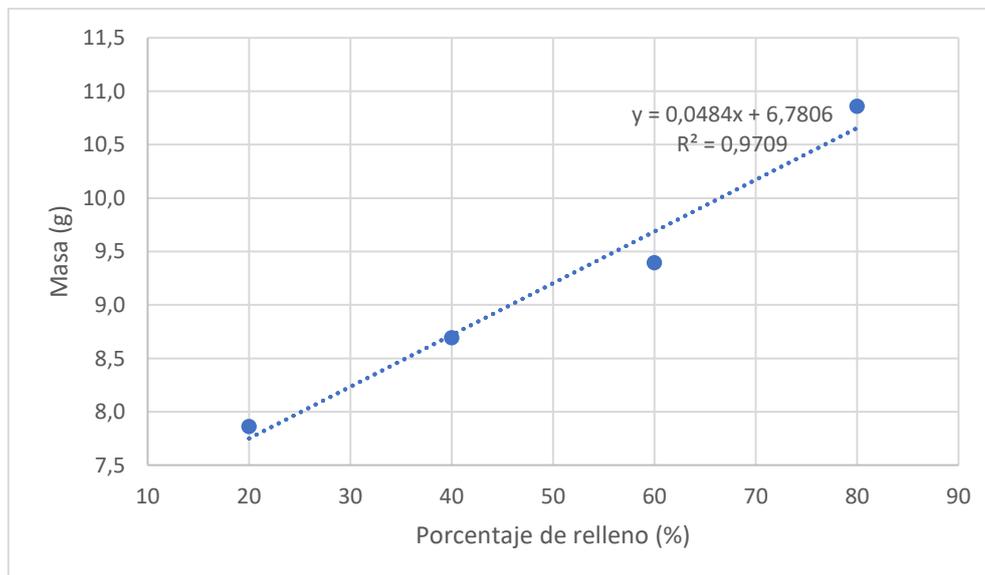
Como era de esperar la tensión es creciente con el porcentaje de relleno. Como puede apreciarse la ecuación que se muestra en pantalla se ajusta a esos datos muy bien. Inicialmente, se observa que el porcentaje de relleno no influye demasiado mientras sea menor del 50%. Pero cuando el porcentaje de relleno ronda el 80% puede apreciarse que las tensiones que aguanta la probeta son muy superiores.

Figura 36. Tiempo-relleno para 0° de ángulo de tramado



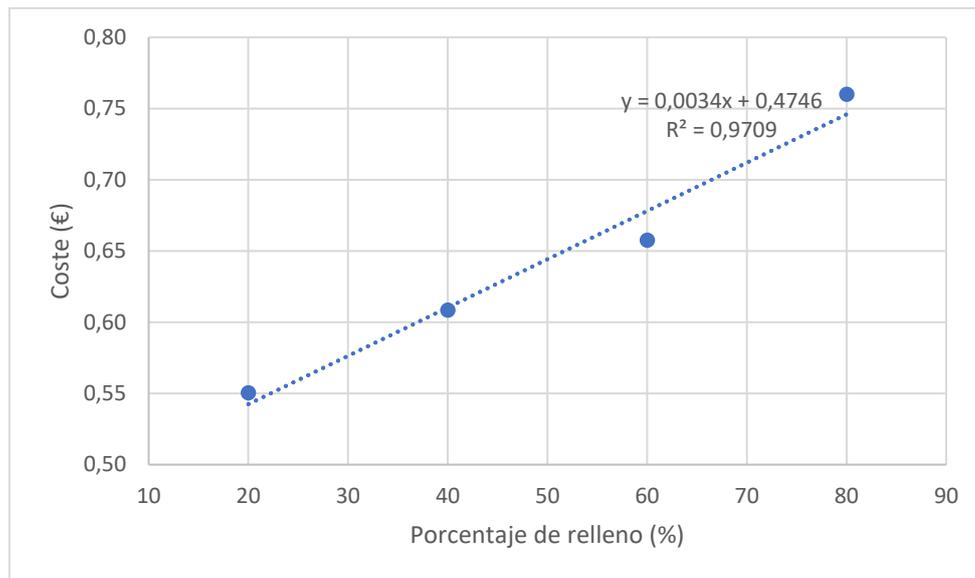
Aquí el tiempo no es exactamente lineal, aunque la recta se ajusta razonablemente bien. Esto se debe a que, como se veía en la columna de tiempos, el tiempo para el porcentaje de relleno en la impresora *LemonBot* es significativamente menor al esperado. Se verá en la repetición de los ensayos del 20% en la *PrusaLemon* que el tiempo ronda los 37 minutos, lo cual se ajustaría mucho mejor a esta recta de regresión lineal. Además, la del 80% de relleno también se ha hecho en la impresora *LemonBot*.

Figura 37. Masa-relleno para 0° de ángulo de tramado



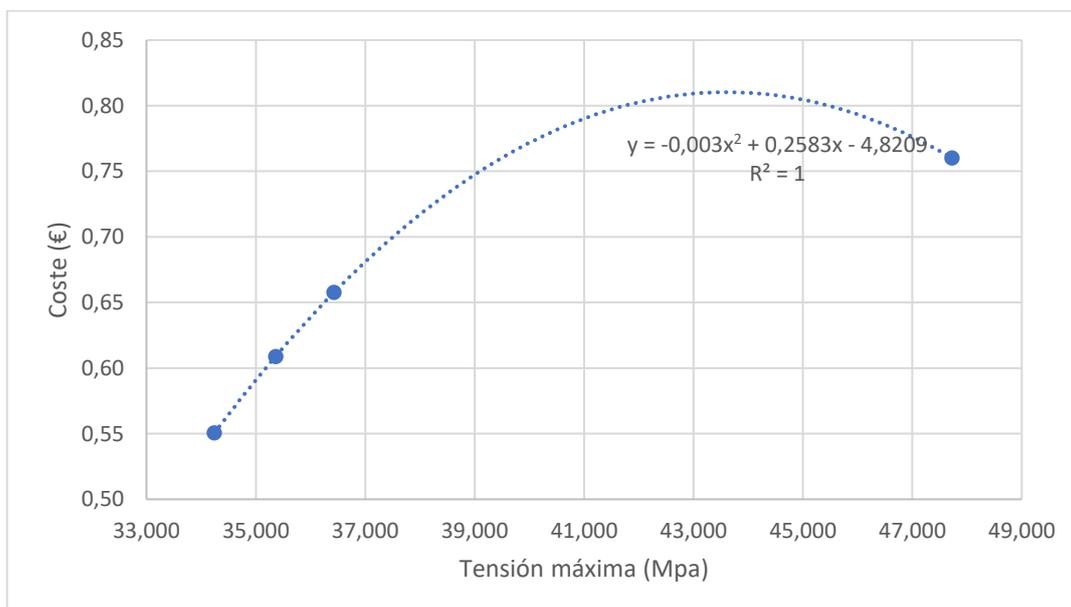
Aquí también se obtienen los resultados esperados. Era lógico esperar que el cuanto más se rellenara la probeta, mayor sería su masa.

Figura 38. Coste-relleno para 0° de ángulo de tramado



En este caso tampoco hay resultados inesperados. Era de esperar que ya que, como se ve en la gráfica anterior, a más porcentaje de relleno más masa y costes.

Figura 39. Coste-tensión máxima para 0° de ángulo de tramado



Aquí, sin embargo, si hay un resultado inesperado. Ya que era de esperar que, a mayor coste, y por tanto más masa, soportará más tensión. Pero no era de esperar que la relación creciese de esta manera como se ha indicado a continuación de la Figura 35. Lo que indica esto, es que las diferencias de porcentaje de relleno tienen un coste alto al principio. Ya que, para que una probeta aguante 2,187 MPa más, el porcentaje de relleno ha de subir inicialmente del 20 al 60% aproximadamente. Esto supone que el coste se ha de incrementar 0,108 €. Sin embargo, para una probeta que pasa del 60 al 80% de relleno, hay un aumento de la tensión máxima de más de 11,295 MPa. El coste en este caso se incrementa 0,102 €. Se ve que el porcentaje de relleno, inicialmente, sólo conviene que esté lo más cercano a los extremos posibles. Esto será según se busque economía o mayor resistencia. Pero los porcentajes de relleno intermedios no parecen

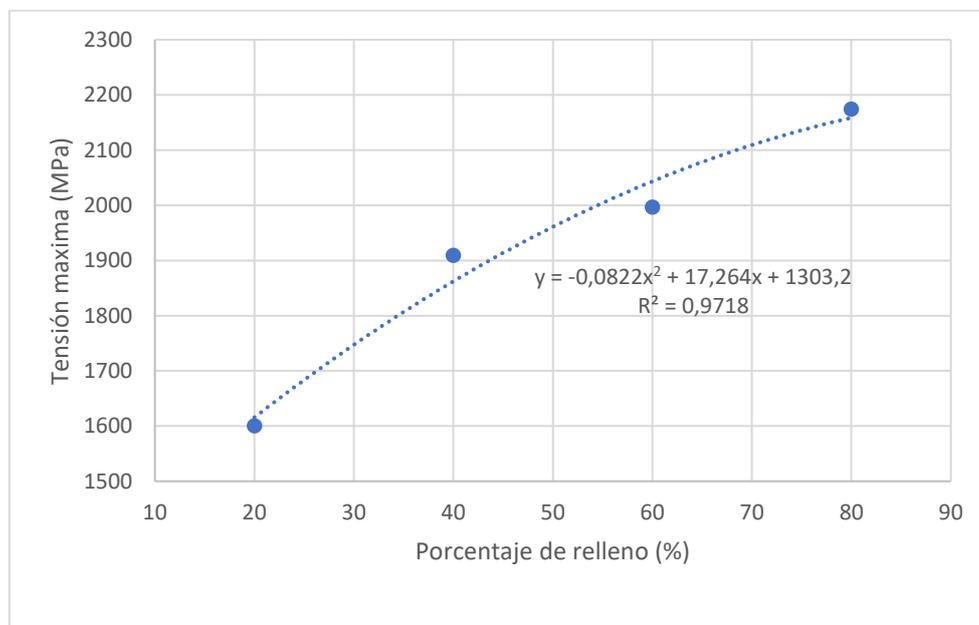
estar justificados. Cabe mencionar también que la curva real si se hubiese tomado más porcentaje de relleno intermedios entre 60 y 80% no tendría esta forma seguramente. No es de esperar que la tensión máxima se alcance para un porcentaje de relleno menor.

Los resultados hallados del módulo de Young y límite elástico son los de la siguiente Tabla.

Tabla 9. Módulo de Young y límite elástico para 0 ° de ángulo de tramado

Porcentaje de relleno	Módulo de Young (MPa)	Límite elástico (N)	Límite elástico (MPa)
20	1600,060	481,673	32,112
40	1909,180	482,707	32,180
60	1996,521	531,227	35,415
80	2174,200	678,762	45,251

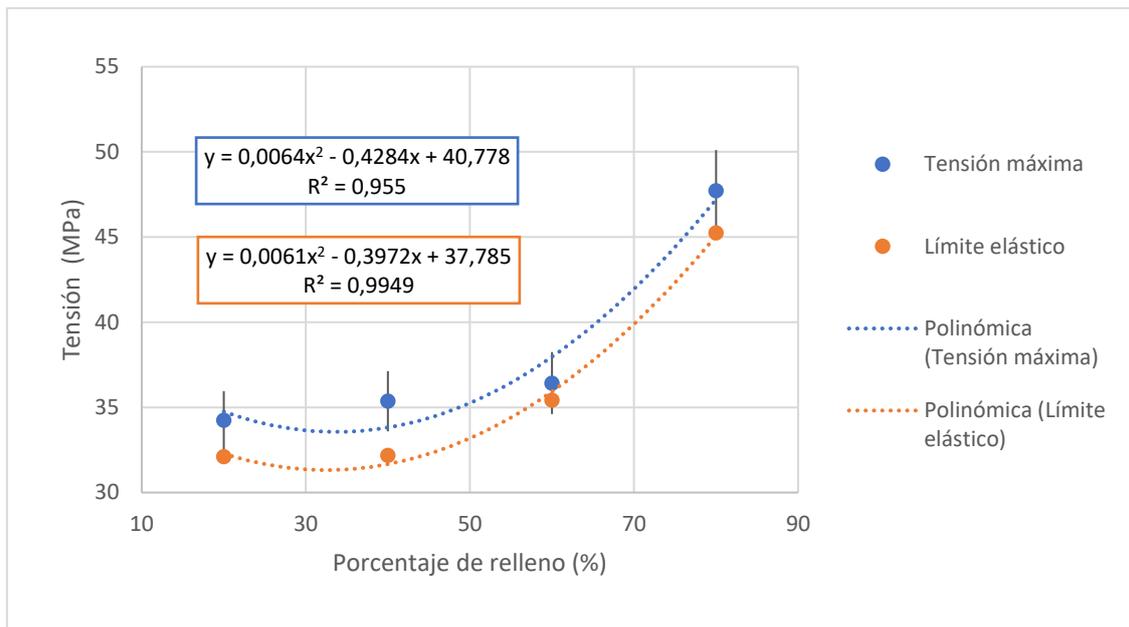
Figura 40. Módulo de Young-relleno para 0° de ángulo de tramado



Dado el valor de R^2 de la imagen, el ajuste es bueno. Esto era de esperar porque también lo es para la tensión máxima. Sin embargo, en el módulo de Young no se observa una gran mejora conforme se aumenta el porcentaje de relleno.

A continuación, se realiza una comparación de las gráficas de la tensión máxima con el límite elástico.

Figura 41 Gráfica tensión máxima/límite elástico-relleno para 0° de ángulo de tramado



Por la Figura 41, se puede decir que el método para deducir el límite elástico ha sido correcto al menos para la serie de datos con 0°. Las curvas son muy similares, aunque la del límite elástico está desplazada debajo de la de tensión máxima como era de esperar.

3.4.2 Ángulo de 20°

Los resultados obtenidos a lo largo del trabajo para el ángulo de tramado de 20° se muestran en la siguiente Tabla resumen.

Tabla 10. Tabla resumen para 20° de ángulo de tramado

Porcentaje de relleno	Tensión máxima (MPa)	Tiempo (min y s)		Tiempo (min)	Masa por ensayo (g)	Coste por ensayo (€)
20	29,298	34	16,140	34,269	7,916	0,554
40	31,483	41	7,720	41,129	8,739	0,612
60	32,280	44	48,320	44,805	9,890	0,692
80	41,427	44	18,140	44,302	10,825	0,758

A partir de estos datos se han sacado una serie de gráficas que ilustran mejor el comportamiento del material.

Figura 42. Tensión máxima-relleno para 20° de ángulo de tramado

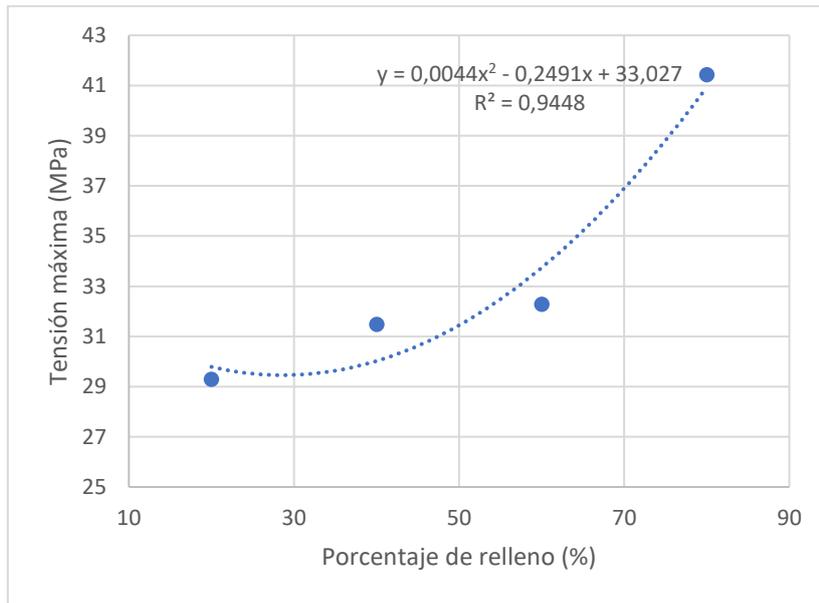


Figura 44. Tiempo-relleno para 20° de ángulo de tramado

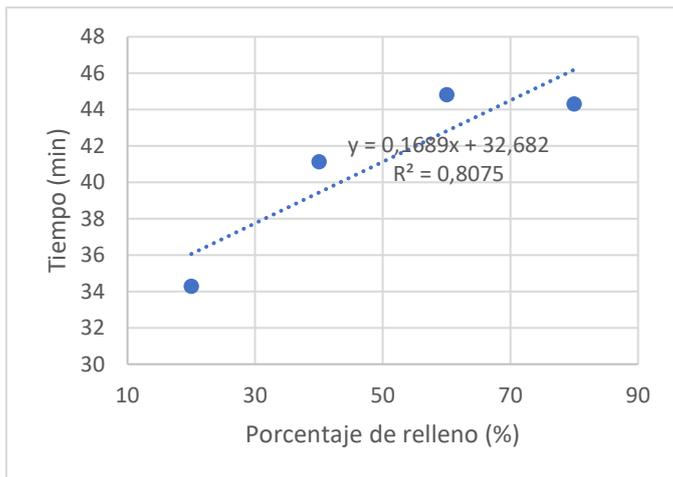


Figura 43. Masa-relleno para 20° de ángulo de tramado

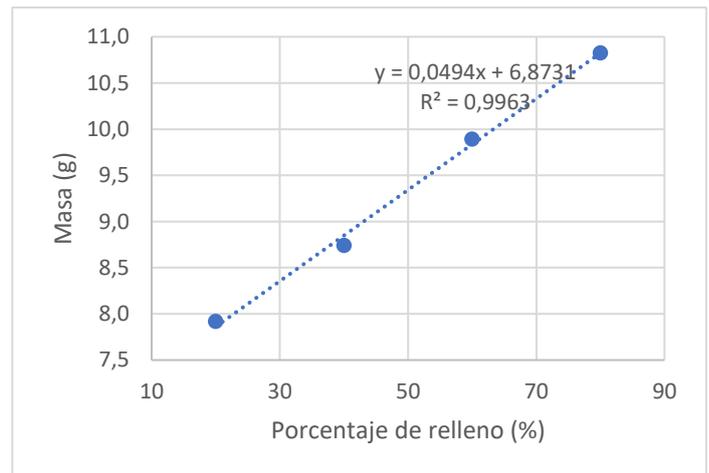


Figura 45. Coste-relleno para 20° de ángulo de tramado

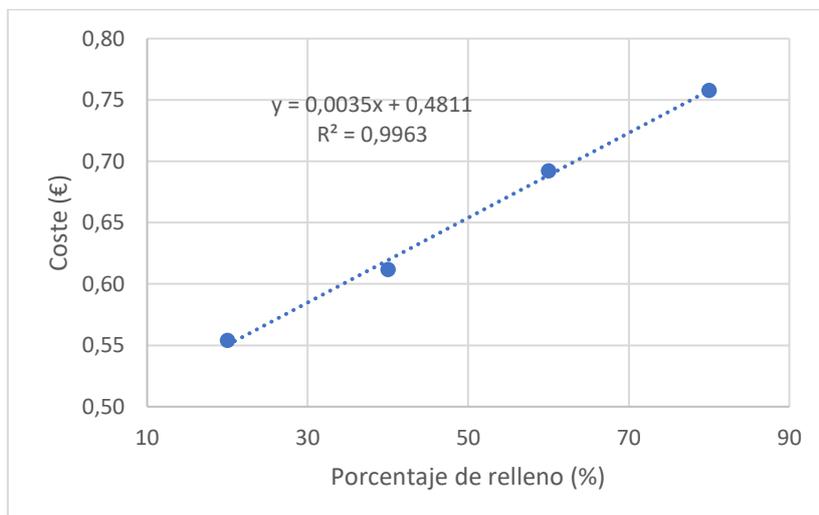
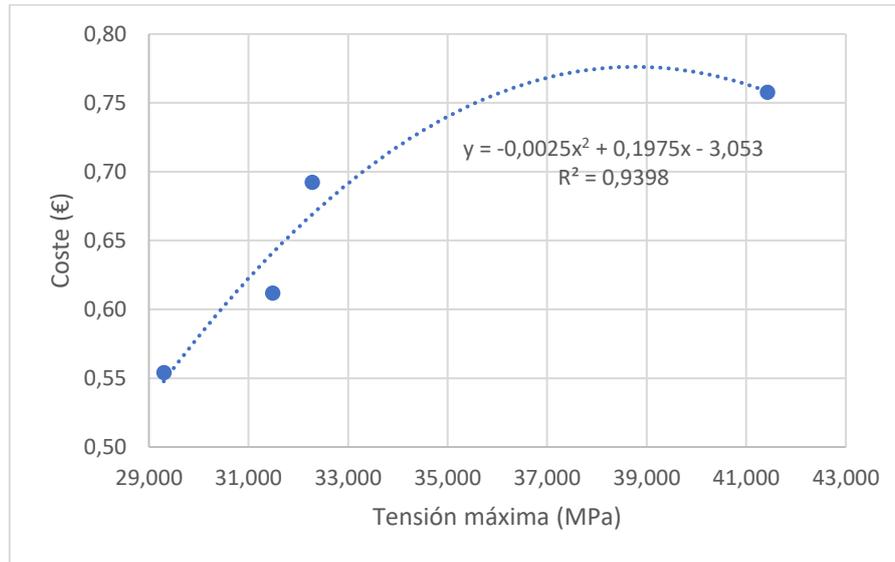


Figura 46. Coste-tensión máxima para 20° de ángulo de tramado



Se observa que los datos son más dispersos que antes. Sin embargo, la curva se ajusta razonablemente bien. Igualmente, esta curva da una aproximación suficientemente buena.

Los datos del límite elástico y módulo de Young se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 11. Módulo de Young y límite elástico para 20 ° de ángulo de tramado

Porcentaje de relleno	Módulo de Young (MPa)	Límite elástico (N)	Límite elástico (MPa)
20	1599,990	429,309	28,621
40	1765,295	449,440	29,963
60	1802,071	459,860	30,657
80	2200,483	599,800	39,987

Figura 47. Módulo de Young-relleno para 20° de ángulo de tramado

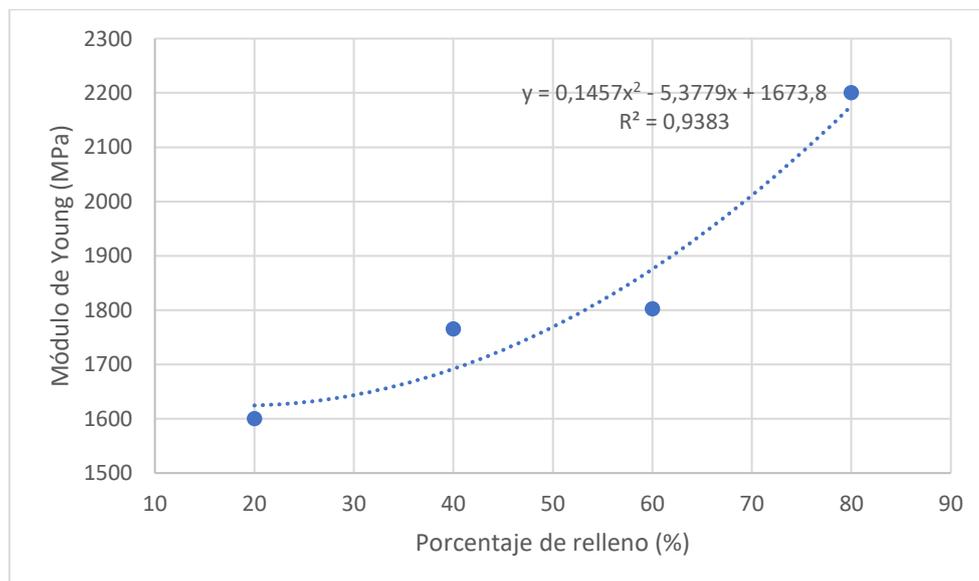
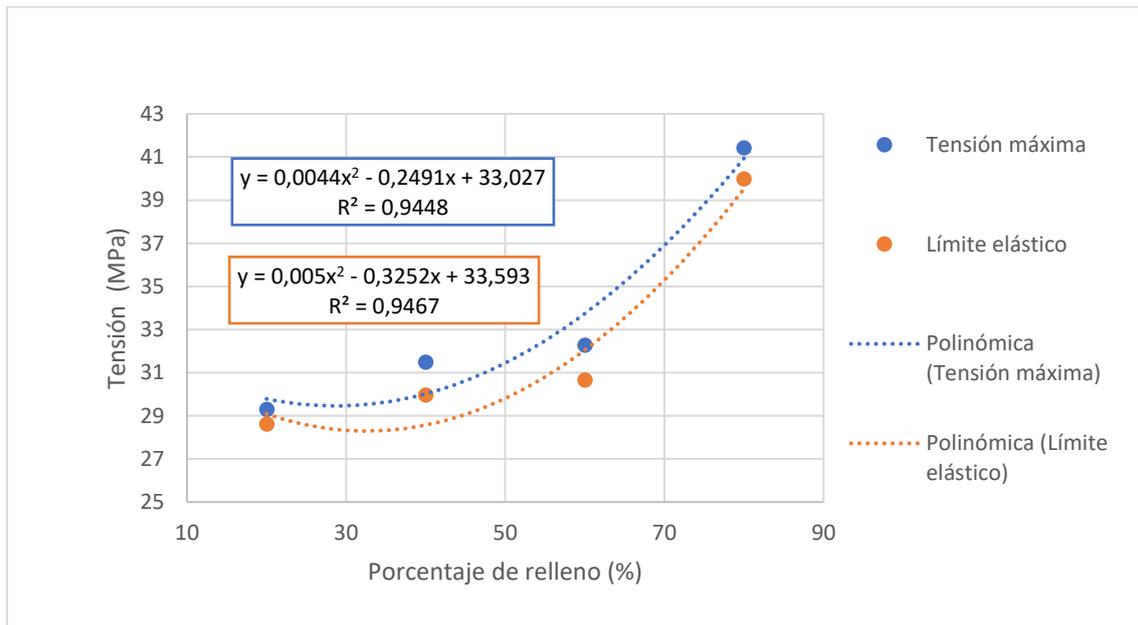


Figura 48. Tensión máxima/límite elástico-relleno para 20° de ángulo de tramado



Por lo mismo que se ha argumentado en el punto anterior, estas gráficas son correctas. Por ello, en lo que sigue si no se comenta nada de alguna de estas gráficas, es porque las conclusiones son las mismas que se han mencionado antes para otro ángulo de tramado.

3.4.3 Ángulo de 45°

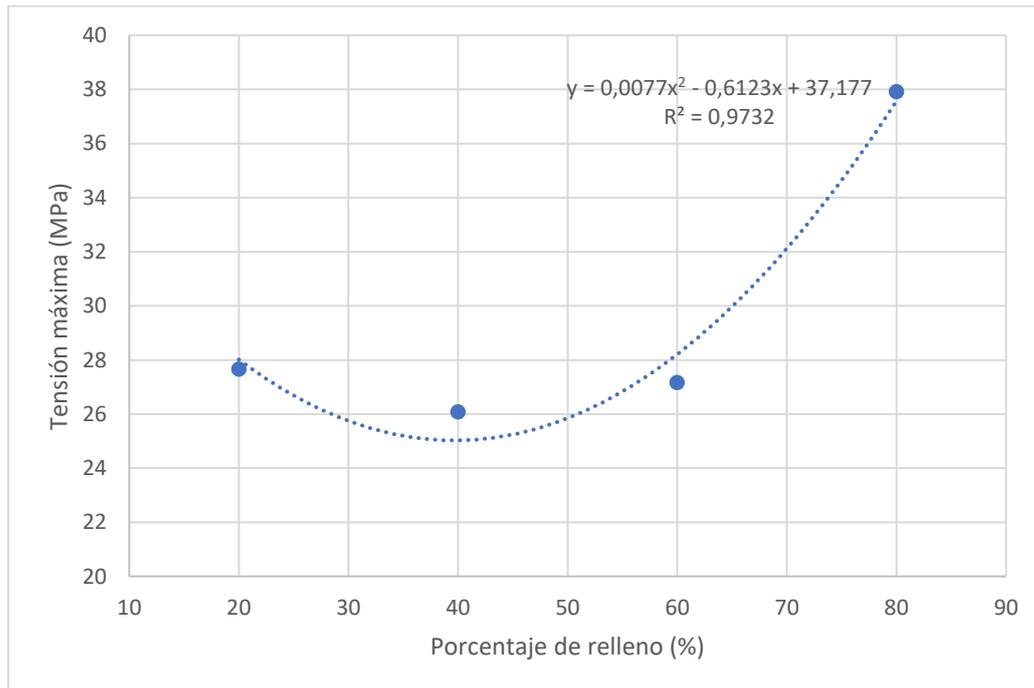
Los resultados obtenidos a lo largo del trabajo para el ángulo de tramado de 45° se muestran en la siguiente Tabla resumen.

Tabla 12. 45° de ángulo de tramado

Porcentaje de relleno	Tensión máxima (MPa)	Tiempo (min y s)		Tiempo (min)	Masa por ensayo (g)	Coste por ensayo (€)
20	27,667	34	34,110	34,569	7,719	0,540
40	26,077	41	11,830	41,197	8,860	0,620
60	27,165	44	25,670	44,428	9,567	0,670
80	37,920	44	43,270	44,721	10,656	0,746

Inicialmente en esta Tabla ya se observa que el dato de tensión para el 20% es superior al de 40 y 60%, lo cual es imposible.

Figura 49. Tensión máxima-relleno para 45° de ángulo de tramado



Como era de esperar por la Tabla, la curva ajustada presenta un valle en 40%. Esto indica que la tensión máxima que aguanta la probeta es menor al 40 que al 20% de relleno. Esto se discutirá más adelante.

Figura 50. Tiempo-relleno para 45 ° de ángulo de tramado

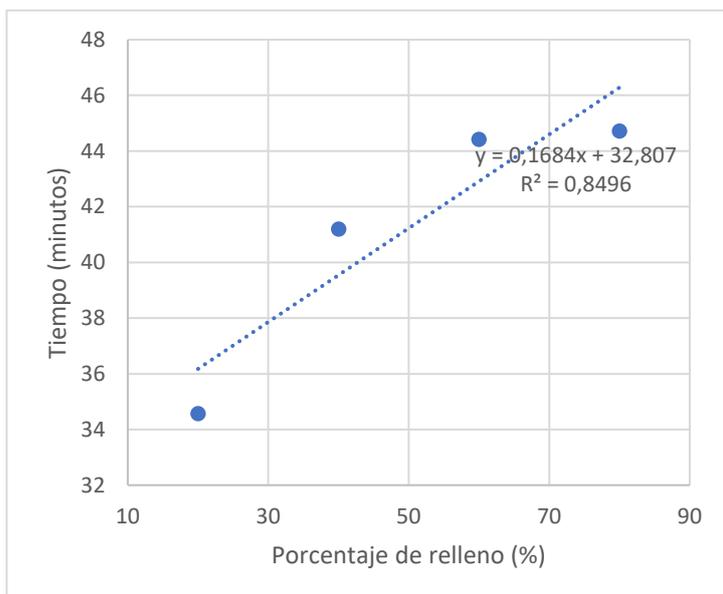
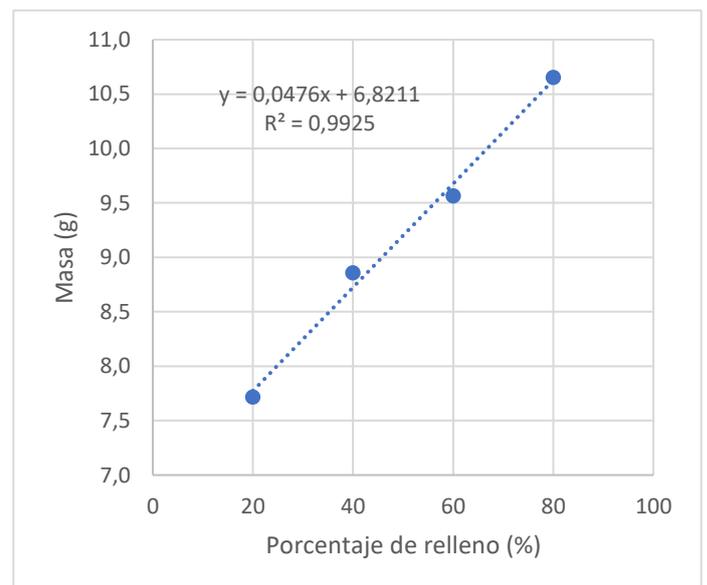


Figura 51. Tiempo-relleno para 45° de ángulo de tramado



La masa sigue siendo lineal con el relleno. En este caso, esto indica que no ha habido confusión a la hora de imprimir el archivo, al menos en lo relacionado con el porcentaje de relleno.

Figura 52. Gráfica coste-relleno para 45 ° de ángulo de tramado

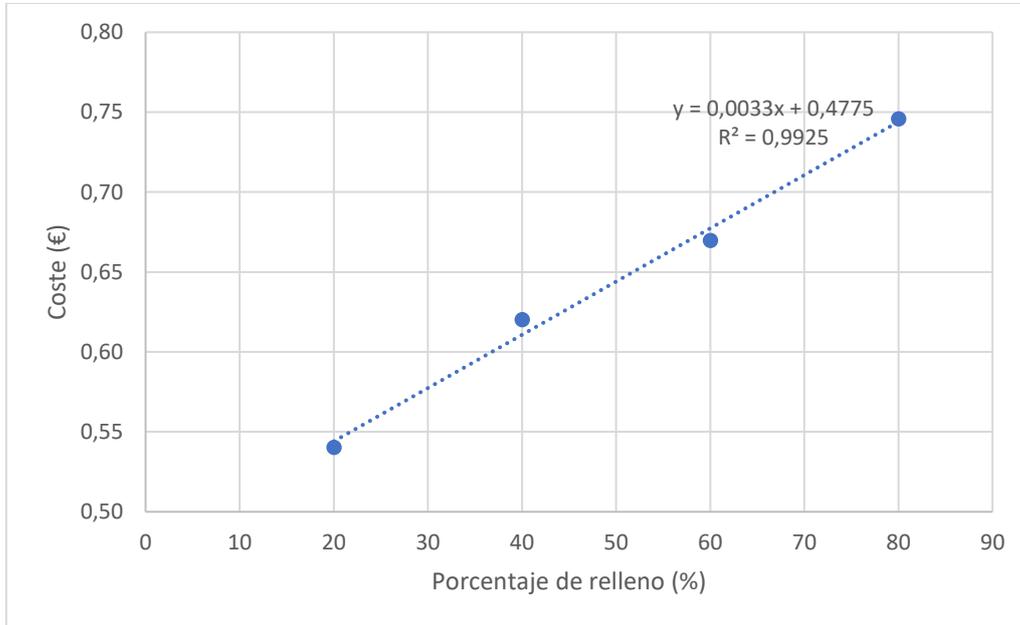
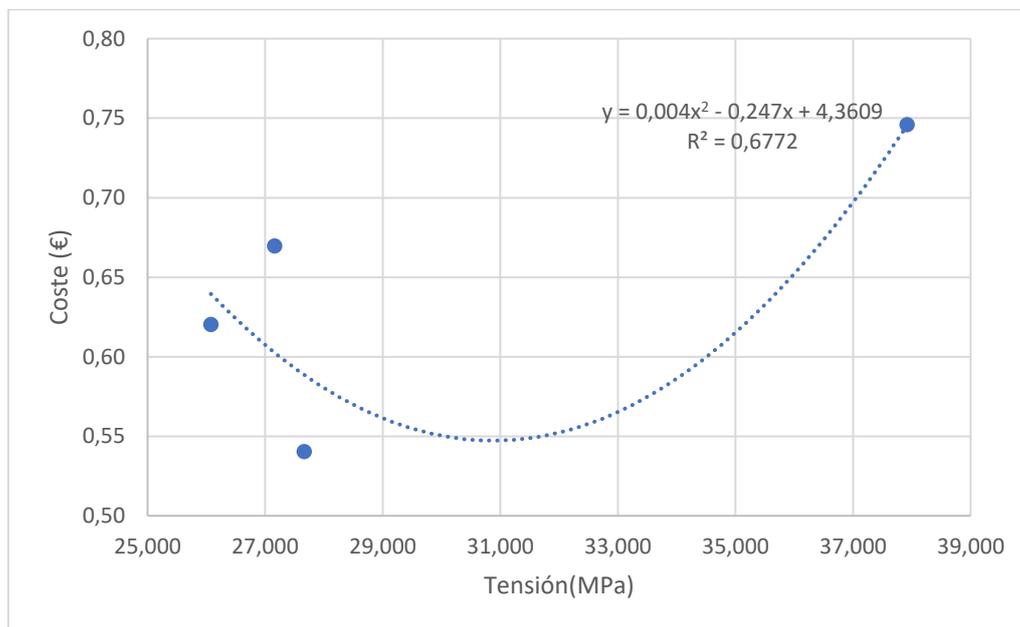


Figura 53. Coste-tensión máxima para 45° de ángulo de tramado



Como la tensión que aguanta la probeta de 20% de relleno (siendo la más barata) es mayor que la que aguanta con 40 y 60%, sale una nube de puntos que no se ajusta a lo esperado.

3.4.4 Ángulo de 68°

Los resultados obtenidos a lo largo del trabajo para el ángulo de tramado de 68 ° se muestran en la siguiente Tabla resumen.

Tabla 13. Tabla resumen para 68 ° de ángulo de tramado

Porcentaje de relleno	Tensión máxima (MPa)	Tiempo (min y s)		Tiempo (min)	Masa por ensayo (g)	Coste por ensayo (€)
20	26,266	42	53,47	42,891	7,933	0,555
40	23,360	41	41,11	41,685	8,475	0,593
60	26,618	45	18,75	45,313	9,841	0,689
80	39,573	46	39,39	46,657	10,795	0,756

Una vez más el porcentaje de 20% aguanta una tensión mayor que el de 40%. Sin embargo, en esta ocasión el de 60% es mayor que el de 20% aunque por poco. Hasta ahora todas las tensiones máximas se han reducido apreciablemente, pero la del 20% prácticamente no. Se intuye que el fallo ocurrió durante la impresión de las probetas del 20% de relleno. Destaca también que la del 40% de relleno se ha reducido mucho más de lo que cabría esperarse viendo los valores de las Tablas anteriores de datos.

La tensión del 80% de relleno sale más grande ahora que en 45°, es posible que hubiera fallo en la impresión de esa tanda.

Figura 54. Tensión máxima-relleno para 68° de ángulo de tramado

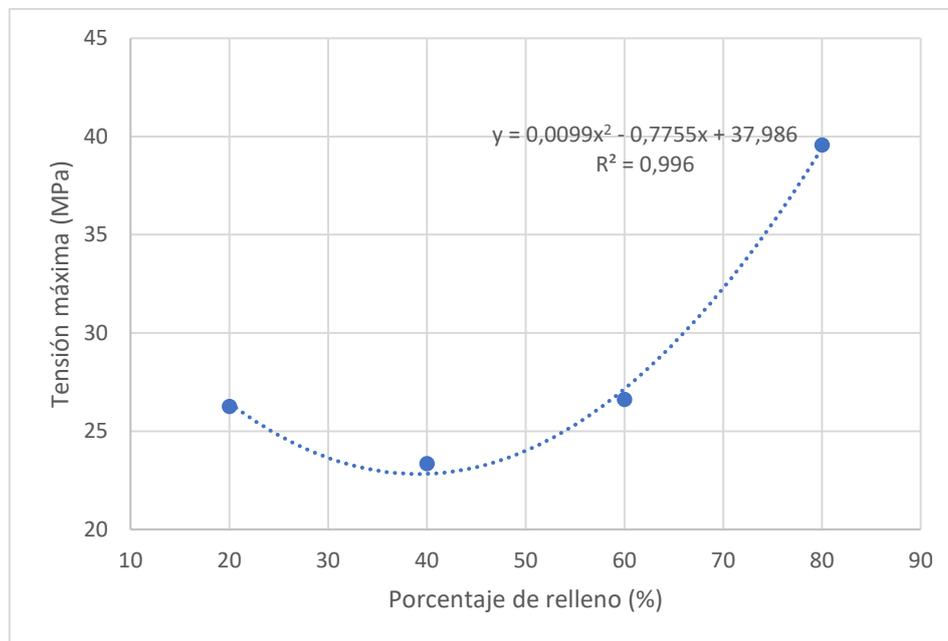
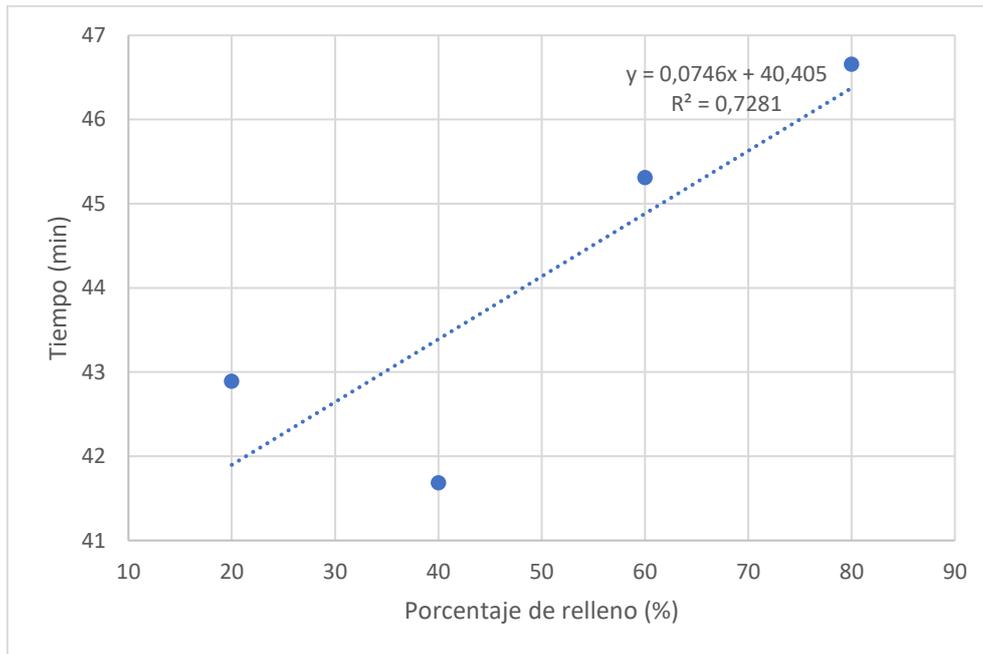


Figura 55. Tensión-relleno para 68° de ángulo de tramado



Se aprecia que el tiempo de impresión de las probetas del 40% ha sido notablemente menor. Es posible que hubiera alguna clase de problema durante la impresión de las probetas del 40% de relleno.

Figura 57. Masa-relleno para 68° de ángulo de tramado

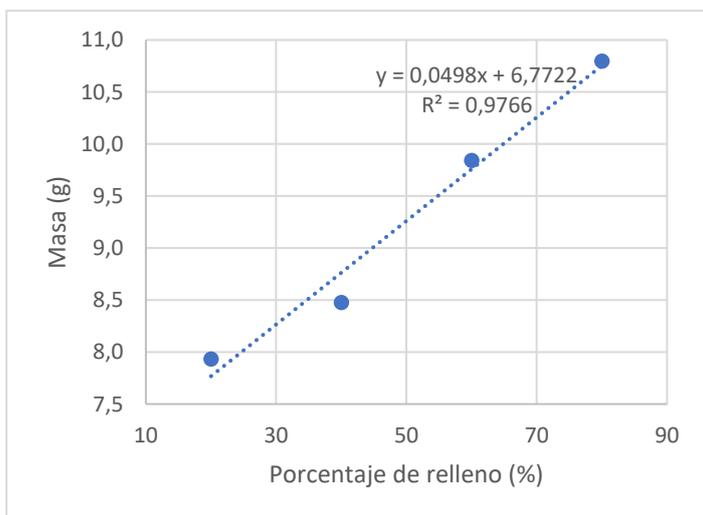


Figura 56. Coste-relleno para 68° de ángulo de tramado

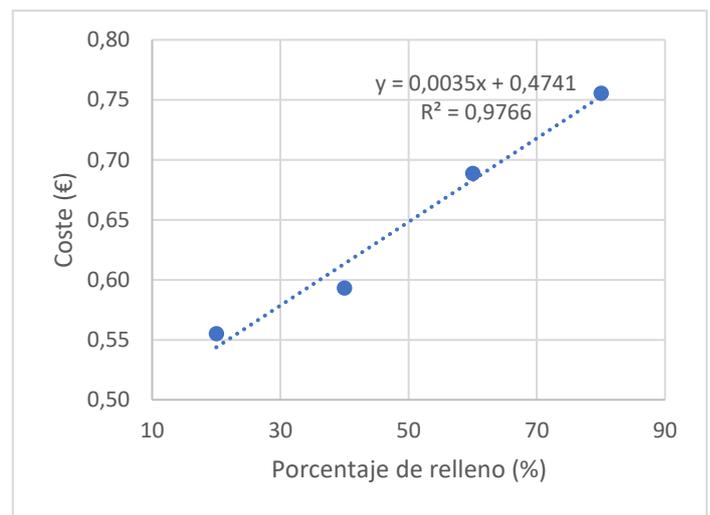
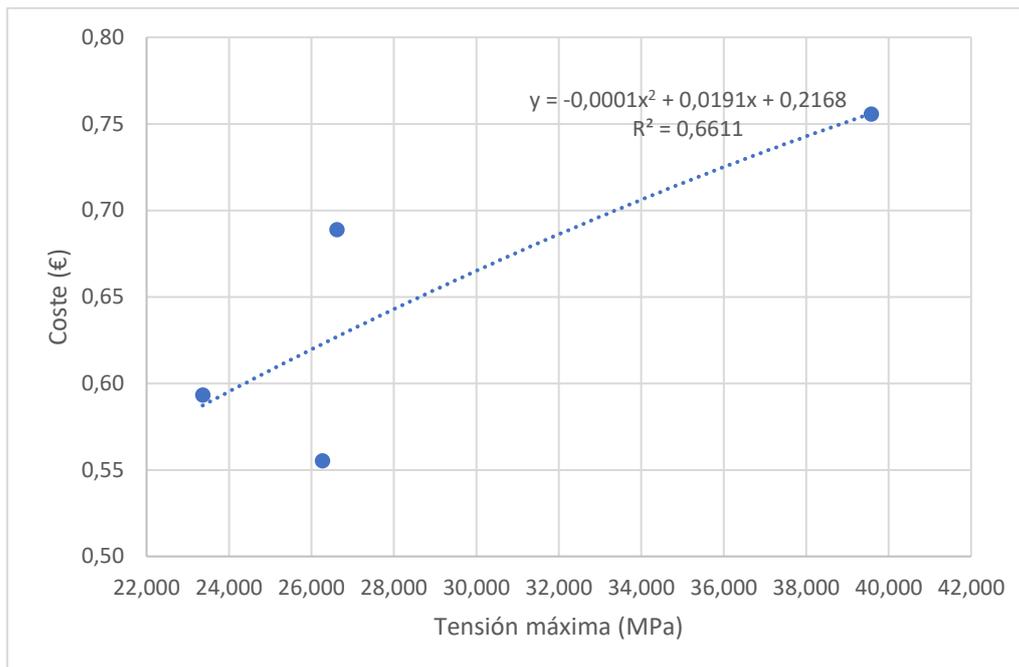


Figura 58. Coste-tensión máxima para 68° de ángulo de tramado



3.4.5 Ángulo de 90°

Los resultados obtenidos a lo largo del trabajo para el ángulo de tramado de 90 ° se muestran en la siguiente Tabla resumen.

Tabla 14. Tabla resumen para 90 ° de ángulo de tramado

Porcentaje de relleno	Tensión máxima (MPa)	Tiempo (min y s)		Tiempo (min)	Masa por ensayo (g)	Coste por ensayo (€)
20	26,089	42	32,52	42,542	7,863	0,550
40	24,747	42	21,85	42,364	8,690	0,608
60	25,716	44	30,39	44,507	9,655	0,676
80	38,995	46	50,26	46,838	10,945	0,766

Una vez más la probeta de 40% presenta el mínimo, y que la del 20% de relleno es superior a las probetas con el 40 y el 60% de relleno. Los resultados de la probeta del 40% de relleno muestran que ha aumentado su resistencia respecto a las de 68 °. Esto sería imposible de no ser porque probablemente las probetas del 40% con 68 ° han salido mal. También se observa que las probetas del 20% además mantienen un valor casi constante, lo cual no encaja con la tendencia decreciente que se ve por lo general conforme aumenta el ángulo de tramado.

Es posible que el mayor problema esté en estas probetas del 20% de relleno.

Figura 59. Tensión máxima-relleno para 90° de ángulo de tramado

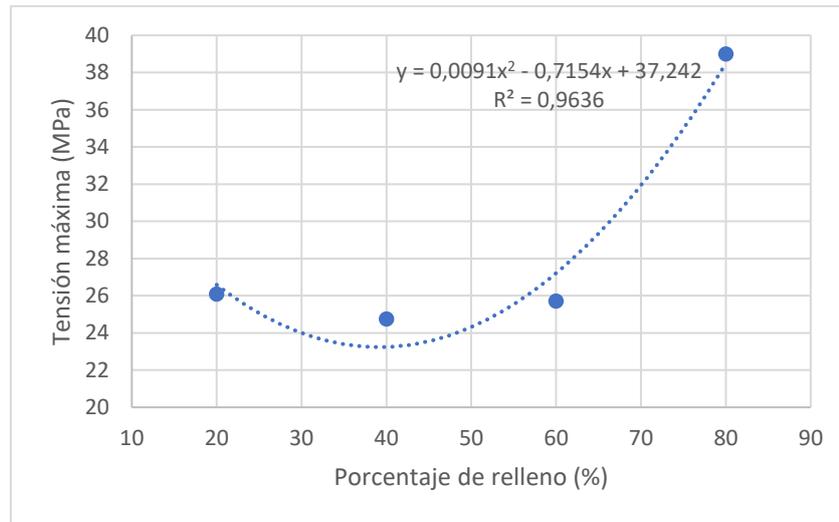


Figura 61. Tiempo-relleno para 90° de ángulo de tramado

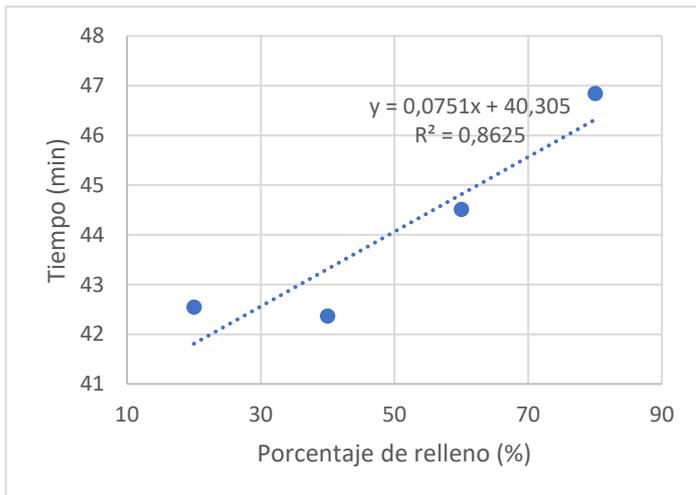


Figura 60. Masa-relleno para 90° de ángulo de tramado

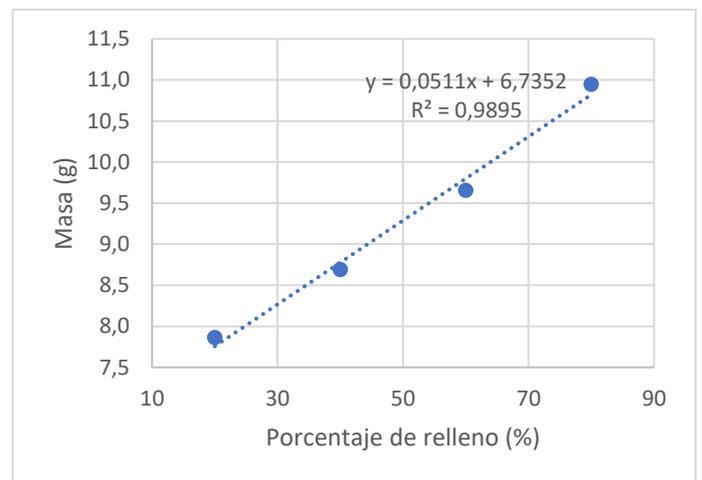


Figura 63. Coste-relleno para 90° de ángulo de tramado

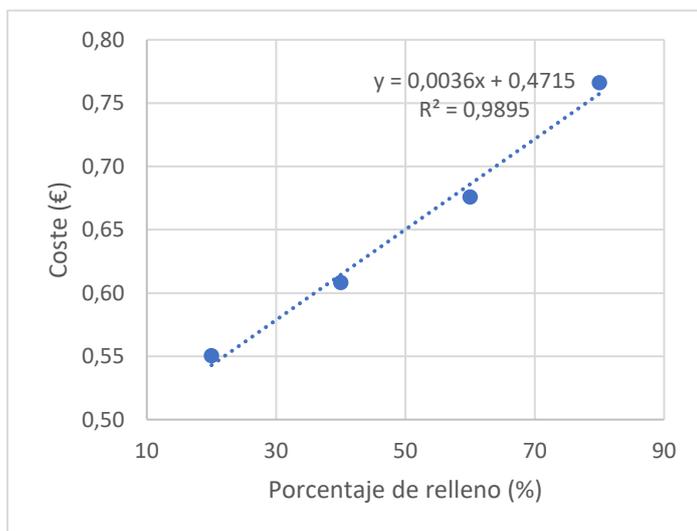
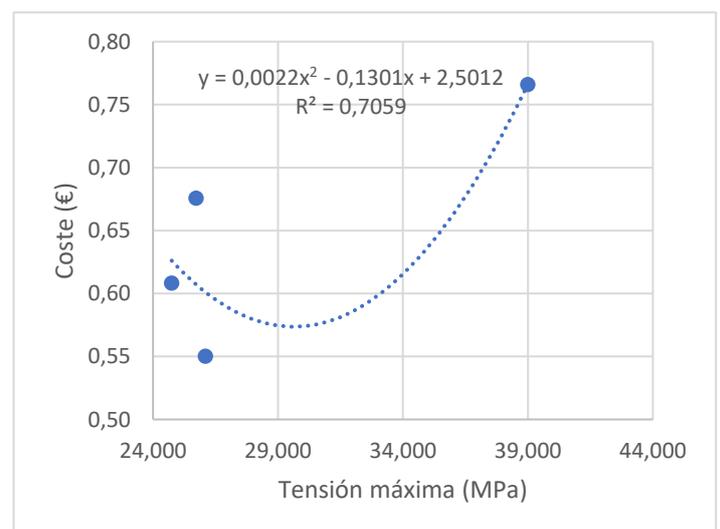


Figura 62. Coste-tensión máxima para 90° de ángulo de tramado



Las conclusiones son análogas para todas menos para la del tiempo-relleno. En este caso han encajado con un R^2 mejor.

3.5 Repetición de ensayos

Observando los datos obtenidos, es obvio que hay que repetir ensayos para los ángulos de tramado de 45° , 68° y 90° . De entre todos los ángulos, lo que más destaca es el valor superior de las probetas con el porcentaje de relleno del 20%. Teniendo esto en cuenta, y observando que sólo serían 15 probetas para repetir, se optó por esta opción.

Además de lo anterior, la bobina utilizada en la impresora PrusaLemon, y la que se utilizará para imprimir el resto de las probetas de repetición, se compró el año anterior. La bobina estaba más fragilizada que la usada en la impresora *LemonBot*. Además, durante el tiempo que se ha impreso en esta impresora, la bobina sólo estaba cubierta por un plástico. Por lo general, dado que se imprimía frecuentemente, no se guardaban al vacío. Un material fragilizado es causa de atascos en la boquilla, cosa que pasaba con cierta frecuencia.

También cabe indicar que, como se ha mencionado en el punto 2.3.4, las piezas que se cree que eran las problemáticas se volvieron a fabricar.

Como se ha visto en los resultados (y como se puede observar en el TFG (8)) la tensión máxima que soporta una probeta a tracción tiene un valor muy similar para porcentajes de relleno bajos. Además, para los datos con el ángulo de tramado de 0° son todos crecientes como cabría esperar. Pero la curva ajustada presenta un mínimo en el porcentaje de relleno del 40% igualmente. Por tanto, la curva que caracteriza el material para tensión-porcentaje de relleno, para módulo de Young-porcentaje de relleno y para módulo elástico-porcentaje de relleno no se verían afectadas notablemente. Si bien es cierto que en el mejor de los casos no se tendría el mínimo en el 40% que aparece tan a menudo, las diferencias cualitativas no serían demasiado grandes teniendo en cuenta la cantidad de recursos que habría que emplear.

3.5.1 Ángulo de tramado de 45°

Los resultados obtenidos a lo largo del trabajo para el ángulo de tramado de 45° , teniendo en cuenta las 10 muestras en total, se muestran en la siguiente Tabla resumen.

Tabla 15. Tabla resumen para 45° de ángulo de tramado

Porcentaje de relleno	Tensión máxima (MPa)	Tiempo (min y s)		Tiempo (min)	Masa por ensayo (g)	Coste por ensayo (€)
20	27,102	35	54,83	35,914	7,719	0,540
40	26,078	41	11,83	41,197	8,860	0,620
60	27,165	44	25,67	44,428	9,567	0,670
80	37,920	44	43,27	44,721	10,656	0,746

La tensión se ha reducido sólo un poco. Las conclusiones son idénticas a las que hay para en el punto 3.4.3 salvo en las de tiempo.

Figura 64. Tensión máxima-relleno para 45° de ángulo de tramado (repetición)

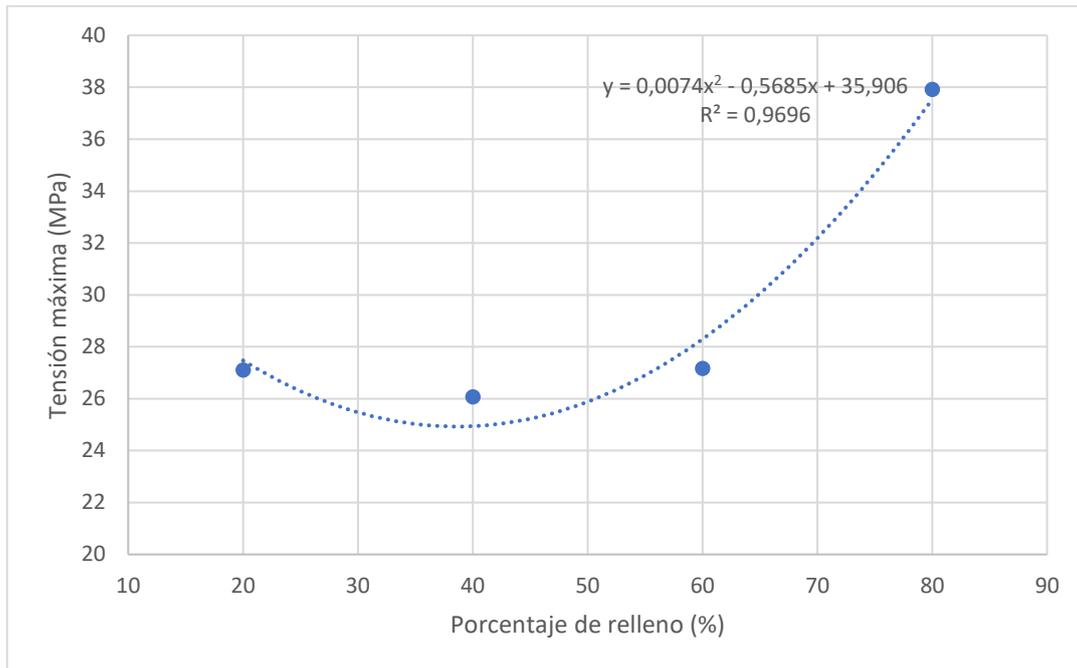
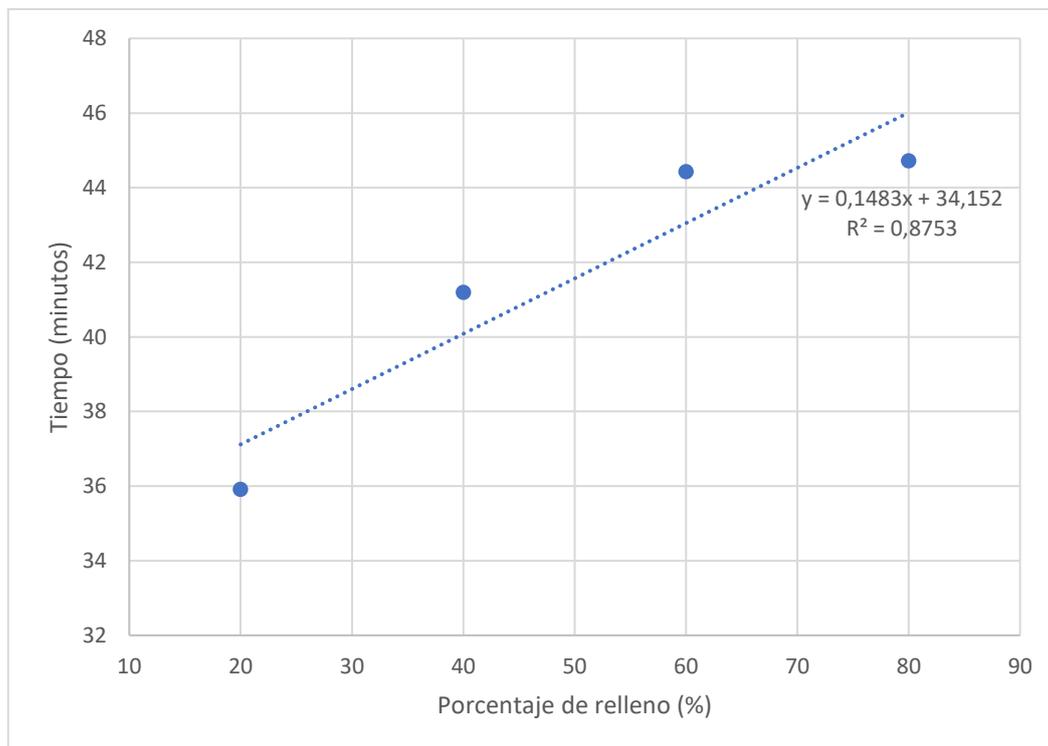


Figura 65. Tiempo-relleno para 45° de ángulo de tramado (repetición)



Ha mejorado el ajuste de esta gráfica respecto al de la Figura 50. Esto indica que quizás la diferencia en los tiempos era por una distribución diferente en la cama de la impresora 3D.

Figura 67. Masa-relleno para 45° de ángulo de tramado (repetición)

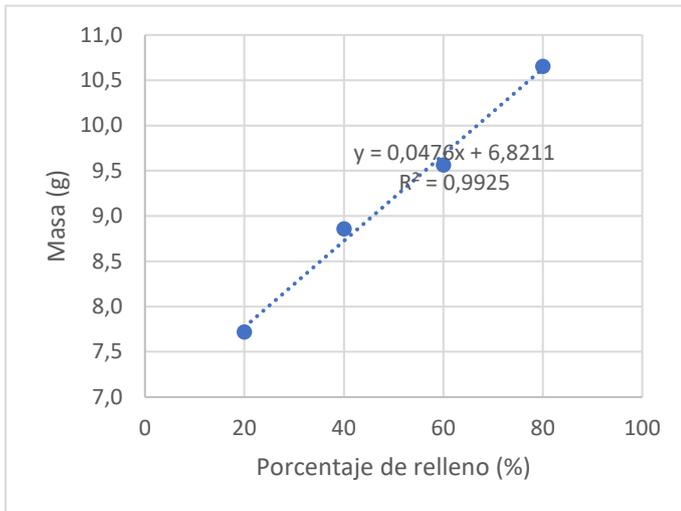


Figura 66. Coste-relleno para 45° de ángulo de tramado (repetición)

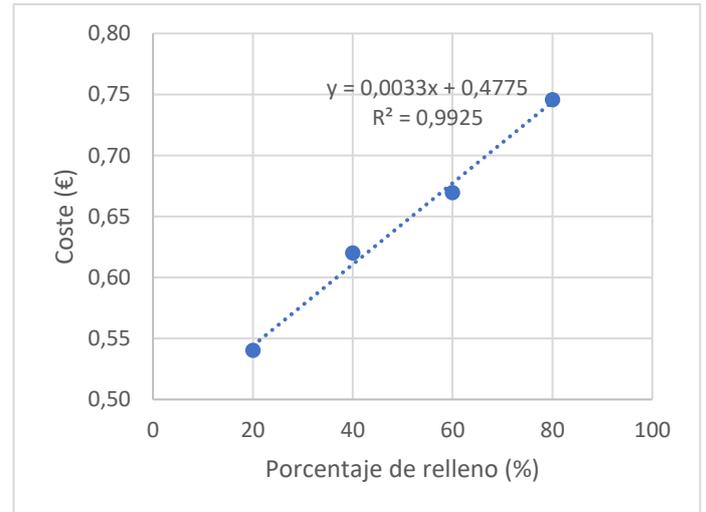
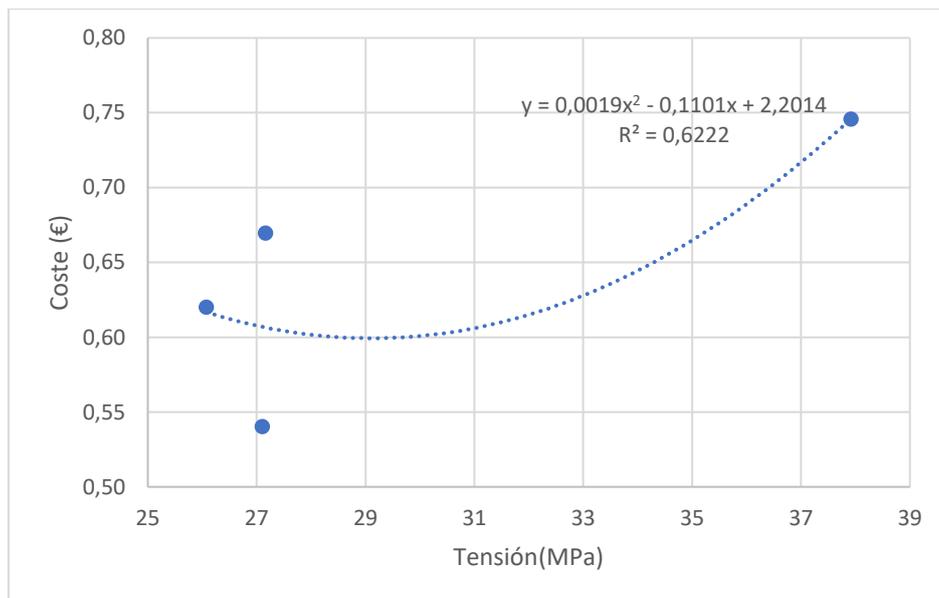


Figura 68. Coste-tensión máxima para 45° de ángulo de tramado (repetición)



Los datos del módulo de Young, límite elástico y elongación máxima son los de la Tabla a continuación.

Tabla 16. Módulo de Young y límite elástico para ángulo de tramado de 45 °

Porcentaje de relleno	Módulo de Young (MPa)	Límite elástico (N)	Límite elástico (MPa)
20	1497,655	390,883	26,059
40	1488,993	374,073	24,938
60	1551,116	390,853	26,057
80	2047,500	543,960	36,264

Figura 69. Módulo de Young-relleno para 45° de ángulo de tramado

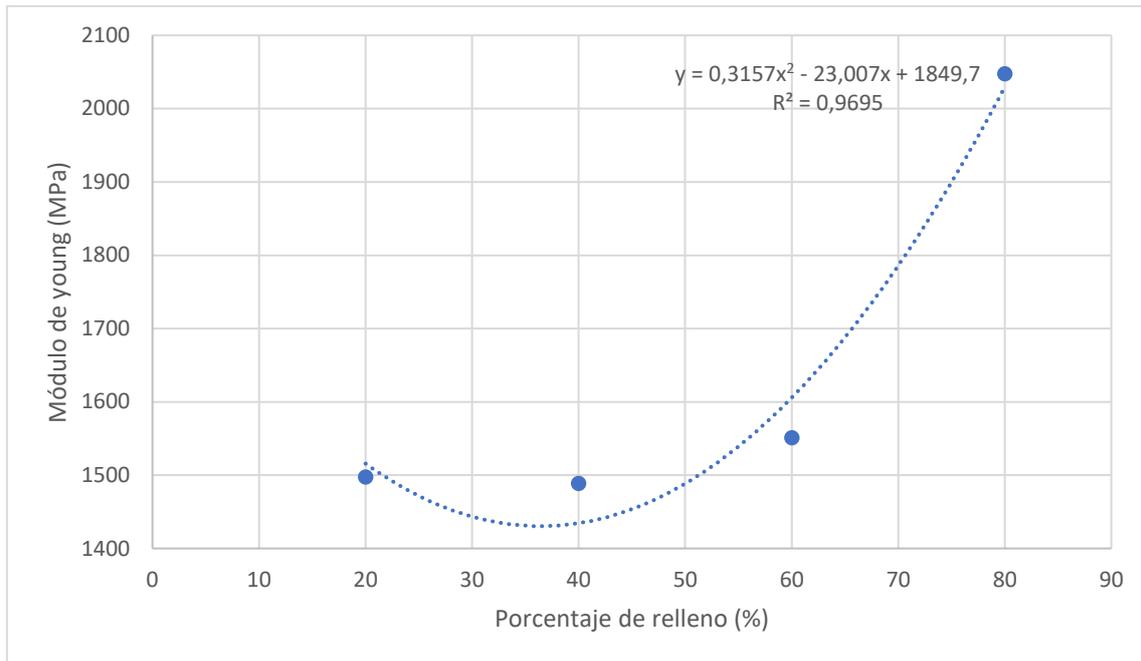
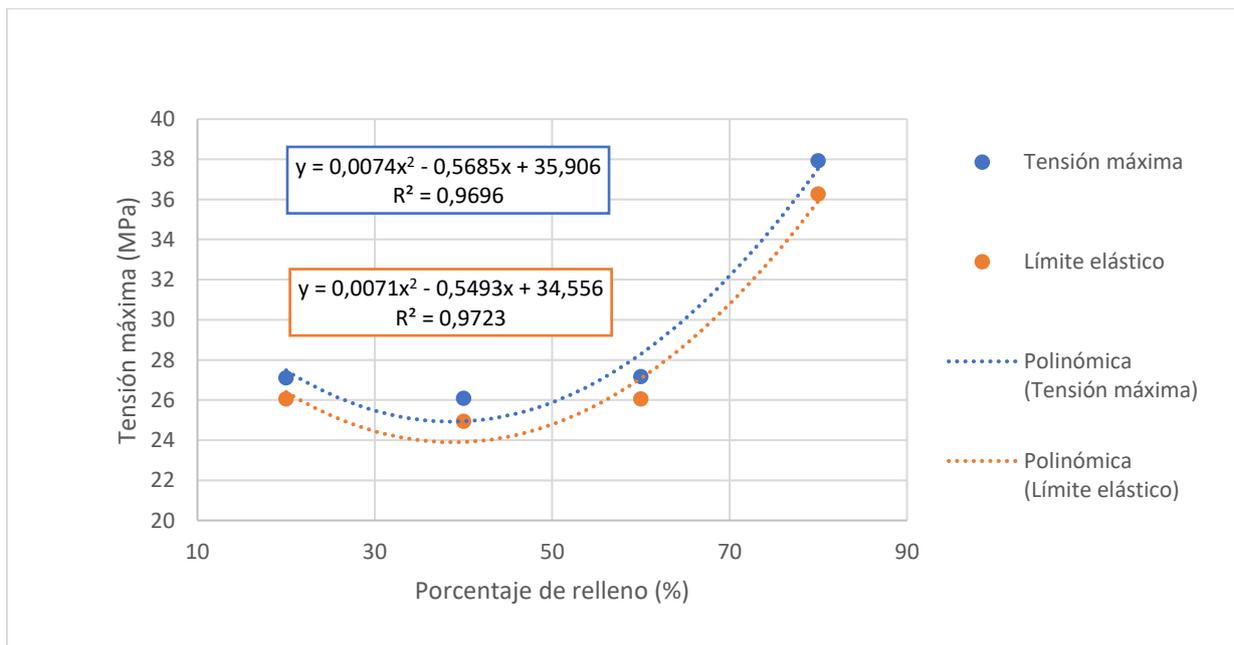


Figura 70. Tensión máxima/límite elástico-relleno para 45° de ángulo de tramado



Las tendencias de estas curvas siguen las tendencias a esperar previamente explicadas.

3.5.2 Ángulo de tramado de 68°

Los resultados obtenidos a lo largo del trabajo para el ángulo de tramado de 68 °, teniendo en cuenta las 10 muestras en total, se muestran en la siguiente Tabla resumen.

Tabla 17. Tabla resumen para 45° de ángulo de tramado (repetición)

Porcentaje de relleno	Tensión máxima (MPa)	Tiempo (min y s)		Tiempo (min)	Masa por ensayo (g)	Coste por ensayo (€)
20	26,526	35	59,86	42,891	7,933	0,555
40	23,360	41	41,11	41,685	8,475	0,593
60	26,618	45	18,75	45,313	9,841	0,689
80	39,573	46	39,39	46,657	10,795	0,756

Las conclusiones son idénticas a las que hay para en el punto 3.4.4 salvo la del tiempo.

Figura 71. Tensión máxima-relleno para 68° de ángulo de tramado (repetición)

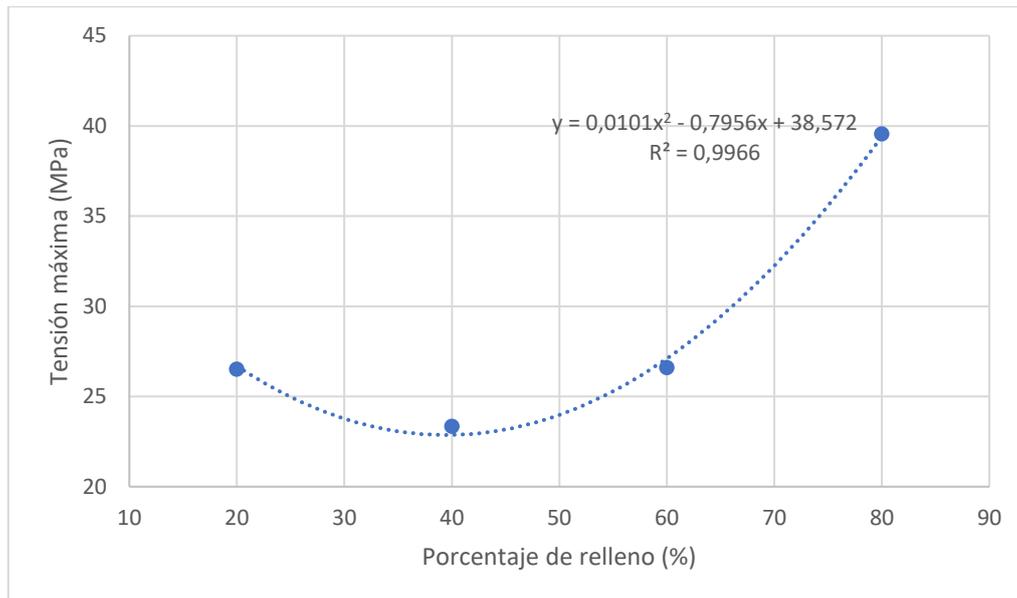
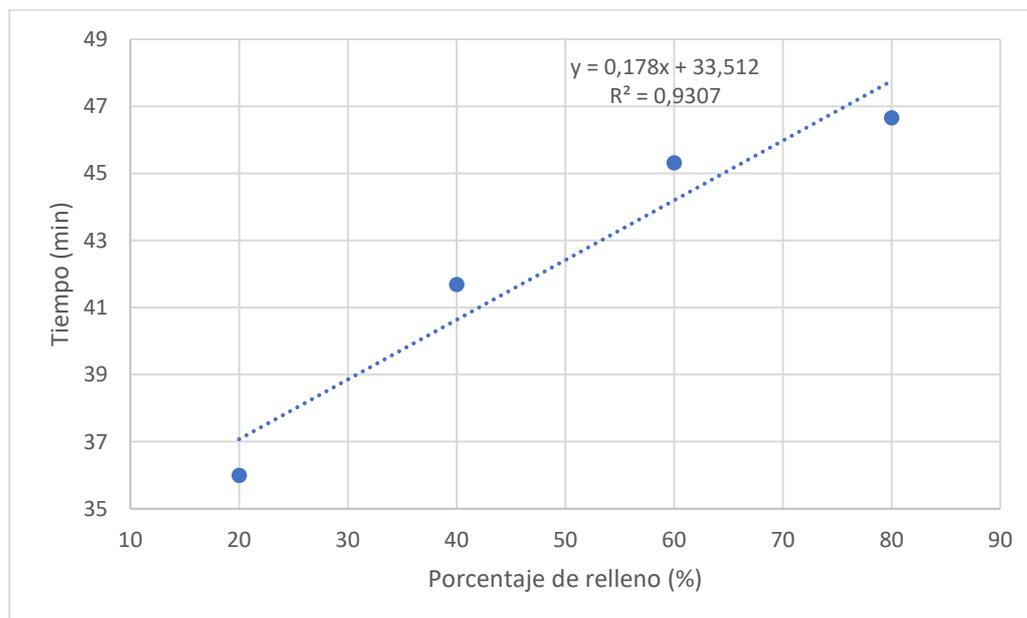


Figura 72. Tiempo-relleno para 68° de ángulo de tramado (repetición)



La gráfica del tiempo ahora cuadra más que antes.

Figura 74. Tiempo-relleno para 68° de ángulo de tramado (repetición)

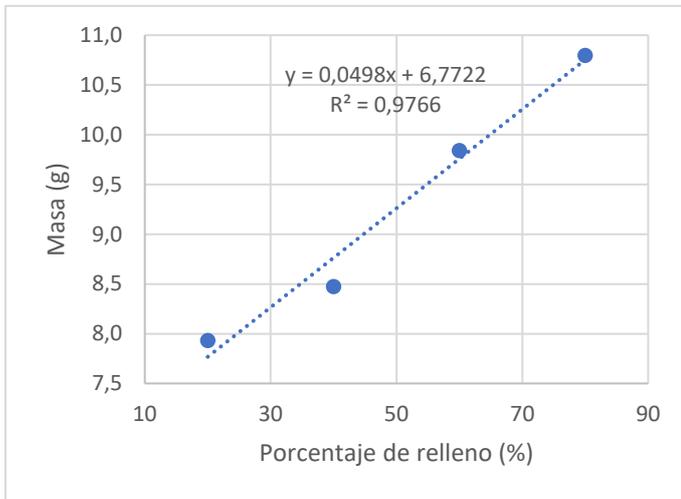


Figura 73. Coste-relleno para 68° de ángulo de tramado (repetición)

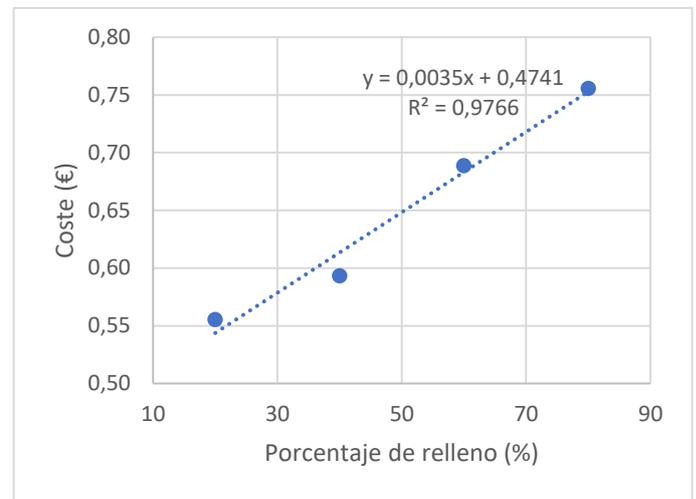
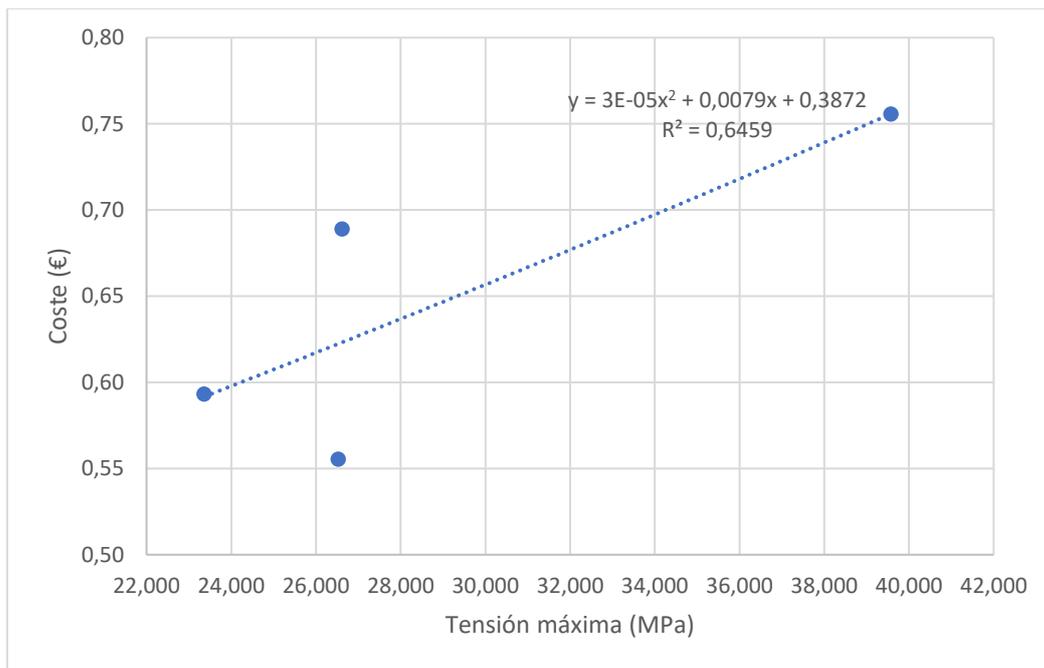


Figura 75. Coste-tensión máxima para 68° de ángulo de tramado (repetición)



Los datos para el módulo de Young y límite elástico son los que se muestran en la Tabla a continuación.

Tabla 18. Módulo de Young y límite elástico para ángulo de tramado de 68 °

Porcentaje de relleno	Módulo de Young (MPa)	Límite elástico (N)	Límite elástico (MPa)
20	1503,278	382,562	25,504
40	1393,915	334,441	22,296
60	1457,409	382,763	25,518
80	2189,572	577,909	38,527

Figura 76. Módulo de Young-relleno para 68° de ángulo de tramado

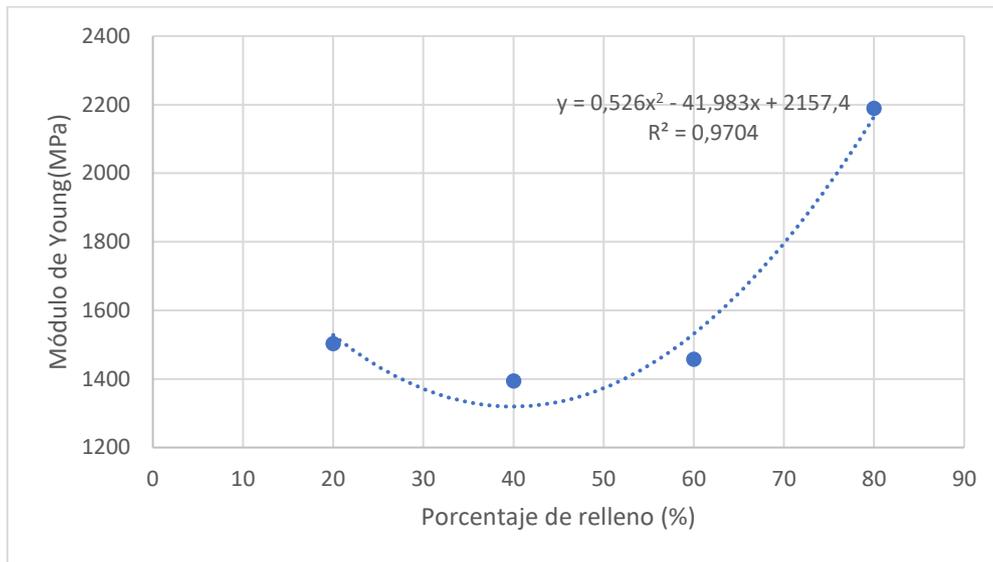
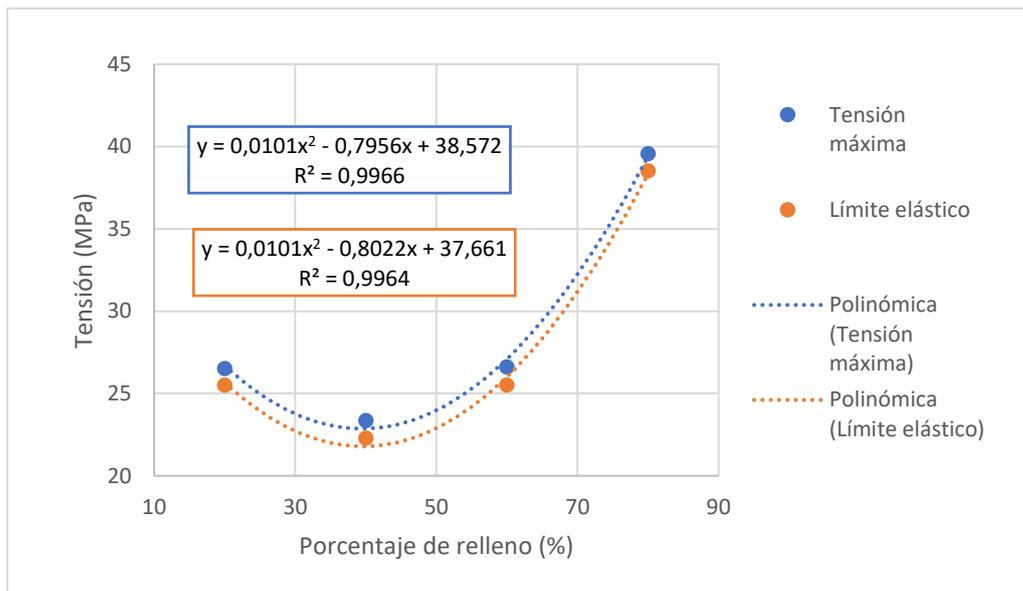


Figura 77. Tensión máxima/límite elástico-relleno para 68° de ángulo de tramado



Los resultados son acordes a lo esperado.

3.5.3 Ángulo de tramado de 90°

Los resultados obtenidos a lo largo del trabajo para el ángulo de tramado de 90°, teniendo en cuenta las 10 muestras en total, se muestran en la siguiente Tabla resumen.

Tabla 19. Repetición. Tabla resumen para 90 ° de ángulo de tramado

Porcentaje de relleno	Tensión máxima (MPa)	Tiempo (min y s)		Tiempo (min)	Masa por ensayo (g)	Coste por ensayo (€)
20	26,903	38	6,5	38,108	7,863	0,550
40	24,747	42	21,85	42,364	8,690	0,608
60	25,716	44	30,39	44,507	9,655	0,676
80	38,995	46	50,26	46,838	10,945	0,766

El tiempo ahora cuadra más. Las conclusiones son idénticas a las que hay para en el punto 3.4.5 salvo la del tiempo.

Figura 78. Tensión máxima-relleno para 90° de ángulo de tramado (repetición)

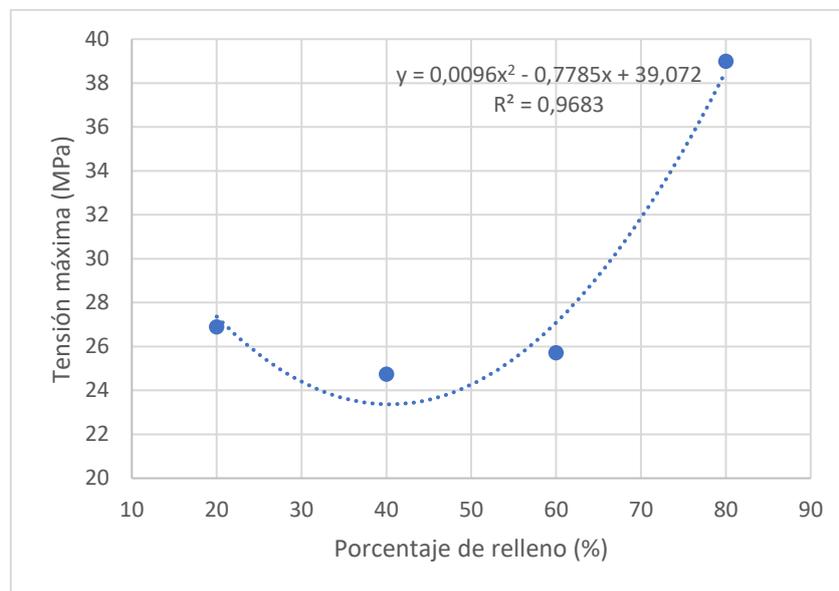


Figura 80. Tiempo-relleno para 90° de ángulo de tramado (repetición)

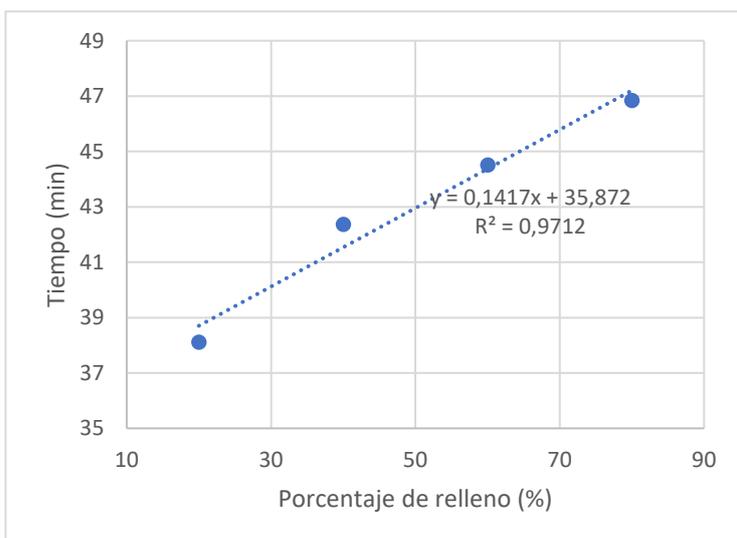


Figura 79. Masa-relleno para 90° de ángulo de tramado (repetición)

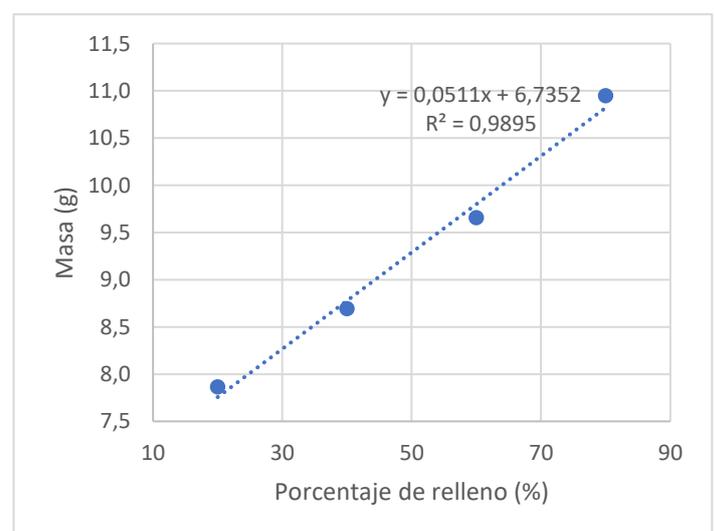


Figura 81. Coste-relleno para 90° de ángulo de tramado (repetición)

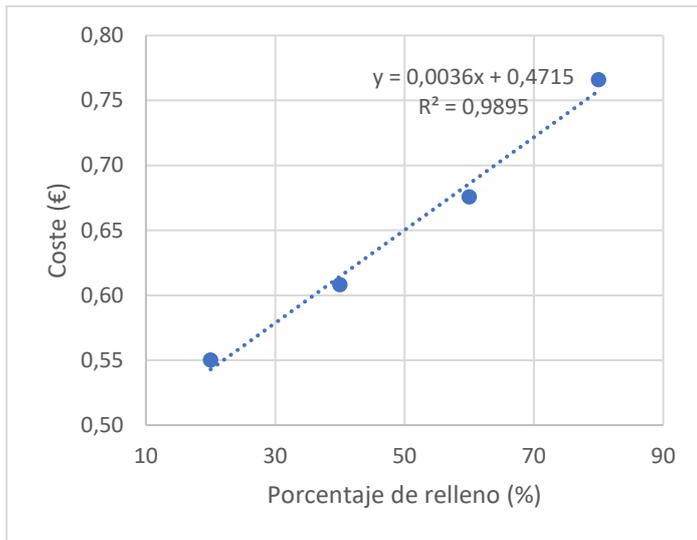
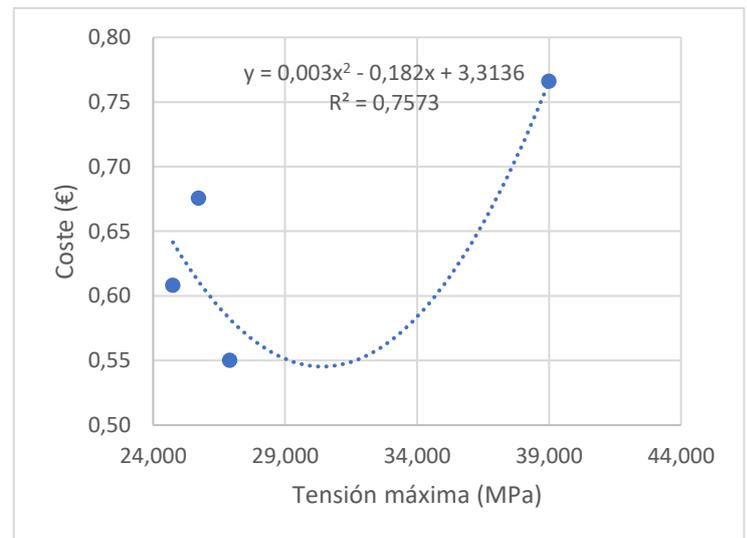


Figura 82. Coste-tensión máxima para 90° de ángulo de tramado (repetición)

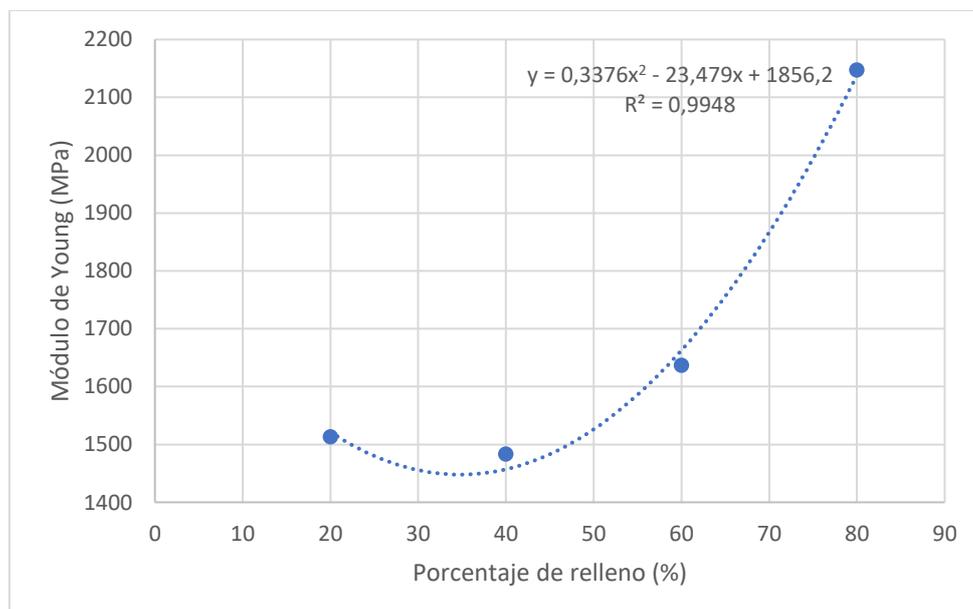


La Tabla con los resultados de módulo de Young, límite elástico es la siguiente:

Tabla 20. Módulo de Young y límite elástico para ángulo de tramado de 90 °

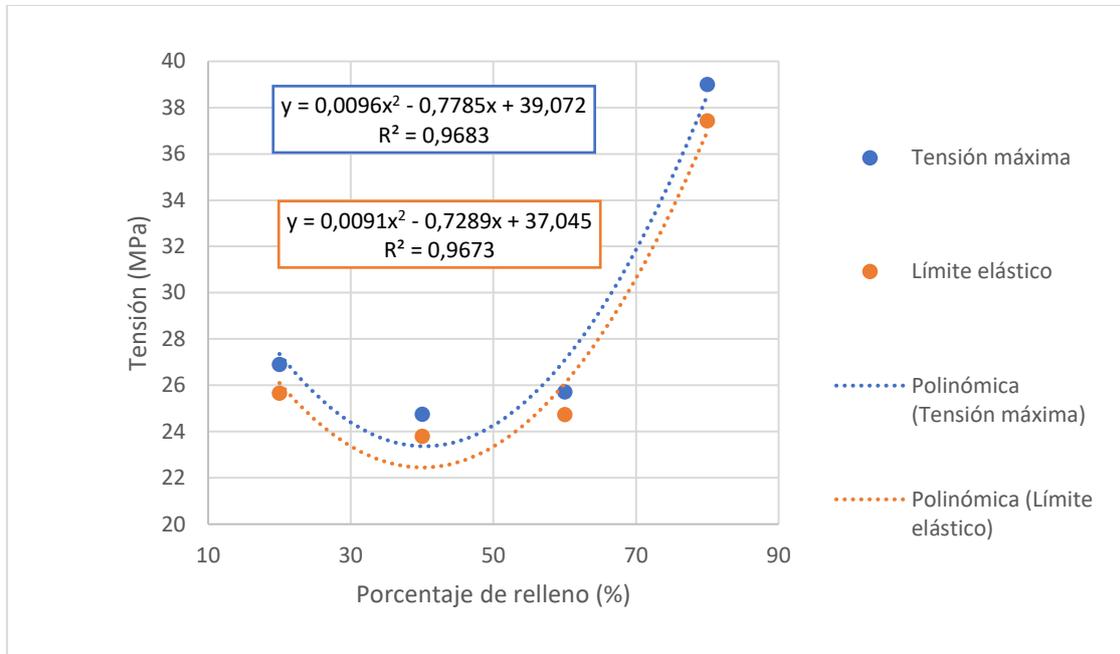
Porcentaje de relleno	Módulo de Young (MPa)	Límite elástico (N)	Límite elástico (MPa)
20	1513,017	384,897	25,660
40	1483,104	356,923	23,795
60	1636,777	370,989	24,733
80	2146,970	561,442	37,429

Figura 83. Módulo de Young-relleno para 90° de ángulo de tramado



A pesar de lo que cabría esperar, esta gráfica ha salido algo mejor que la de tensión máxima relleno si se toma como referencia el valor del R^2 .

Figura 84. Tensión máxima/límite elástico-relleno para 90° de ángulo de tramado



A pesar de lo anterior, esta gráfica sigue yendo acorde con lo esperado. El hecho de que la tendencia de los módulos elásticos se ajuste mejor, no influye de manera tan grande en el límite elástico.

3.6 Modelización del material

3.6.1 Representación de las propiedades mecánicas en superficies 3D

Para tener una mejor idea del comportamiento del material, se ha representado en un gráfico de superficie 3D la variación de los parámetros con respecto a las otras dos variables (porcentaje de relleno y ángulo de tramado). Estos gráficos se pueden observar en las siguientes Figuras. Los parámetros que cambian son: Tensión máxima, módulo de Young y límite elástico.

Figura 85. Gráfico de superficie 3D de tensión

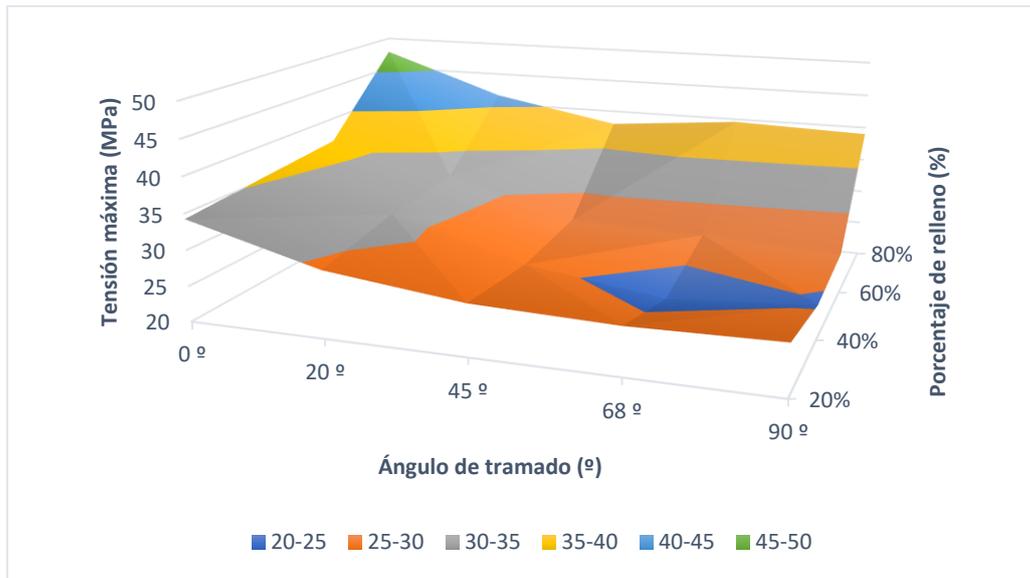


Figura 86. Gráfico de superficie 3D de módulo de Young

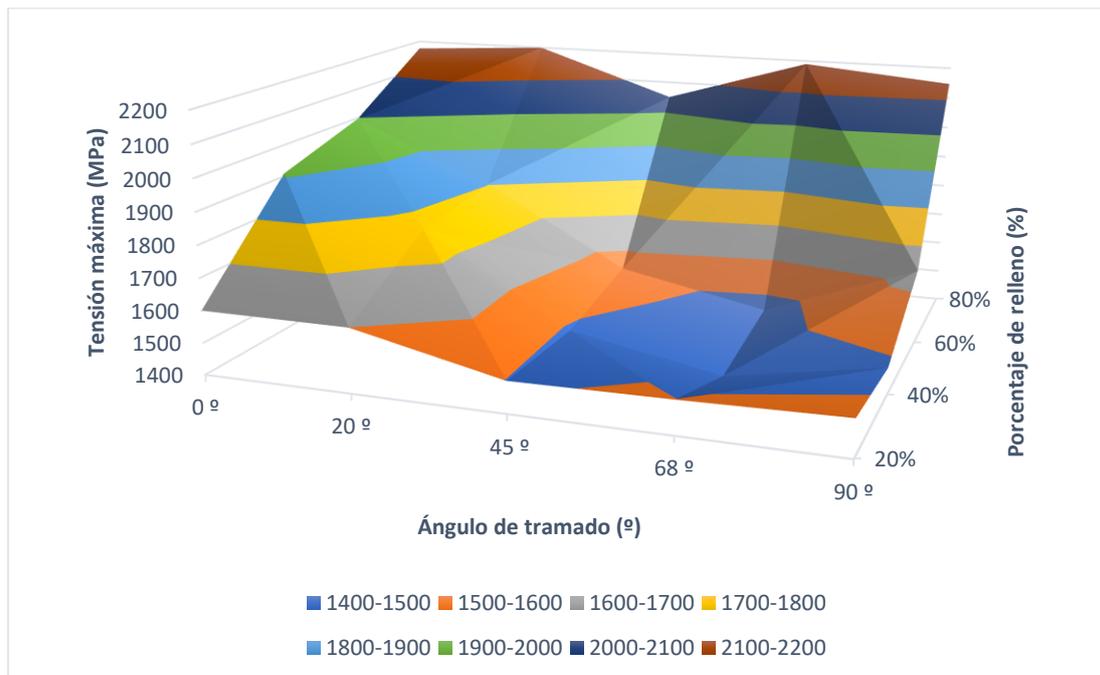
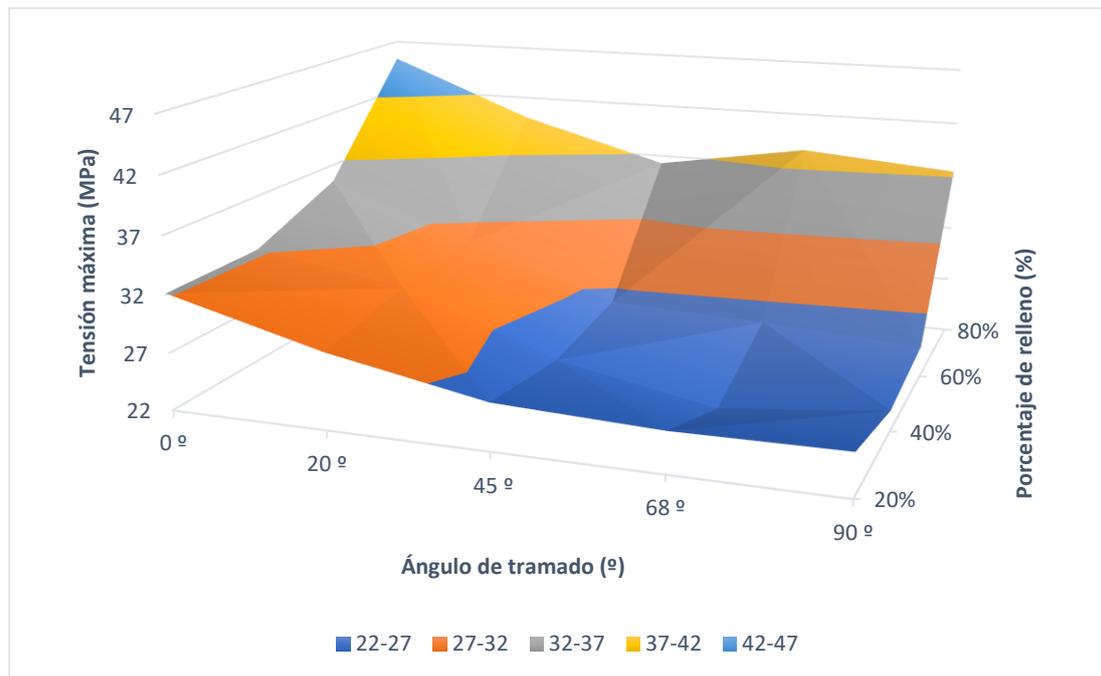


Figura 87. Gráfico de superficie 3D de límite elástico



Se aprecia en estas representaciones gráficas todo lo mencionado en el punto 3.6 respecto a cada una de estas variables.

3.6.2 Análisis de regresión de los parámetros

Para realizar una regresión lineal múltiple, para tener formulas análogas con los de (8), se deben cumplir una serie de requisitos (16). Destacan;

- Tener sentido numérico.
- No deberá de haber variables repetidas o redundantes
- Las variables introducidas en el modelo deberán de tener una cierta justificación teórica.
- La relación entre variables explicativas en el modelo y casos debe de ser como mínimo de 1 a 10. **En este caso, hay dos variables explicativas y 20 casos con todas las combinaciones posibles.**
- La relación de las variables explicativas con la variable dependiente debe de ser lineal, es decir, proporcional. **No se cumple esto en la serie de datos.**

Visto esto, se concluye que se necesita de una regresión no lineal. Para ello, se hizo uso de otra herramienta llamada XLSTAT que actúa como complemento de Excel.

NOTA: Para ver más detalles del programa ver el Anexo VI.

El programa da lo siguiente sobre la bondad del ajuste y las ecuaciones que definen la resistencia a tracción:

Figura 88. Bondad de la regresión no lineal en tensión máxima y ecuación

Estadísticos de bondad del ajuste:		
Observacion	20,000	
GL	15,000	
R ²	0,958	
SEC	35,924	
MEC	2,395	
RMSE	1,548	
Parámetros del modelo:		
Parámetro	Valor	Error estándar
pr1	43,903	2,026
pr2	-0,276	0,039
pr3	-0,564	0,088
pr4	0,002	0,000
pr5	0,008	0,001
Ecuación del modelo:		
Tensión (MPa) = 43,9027743926438-0,276249543299982*Ángulo (°)-0,564034816666668*Relleno (%) +1,94371473536275E-03*Ángulo (°)^2+7,55917916666667E-03*Relleno (%)^2		

El valor de R², se encuentra entre cero y uno. Cuanto más se acerque a uno mayor es el grado de asociación entre las variables. Y cuanto más se acerca a 0 la relación lineal es peor. (17) Se ve que el ajuste es bueno. Además de los coeficientes redondeados en la tabla de parámetros del modelo, en la última línea se muestra la ecuación completa. Se comparan los valores con los datos reales para ver que efectivamente se ajustan bien.

Figura 89. Error respecto a datos reales de la regresión

Ángulo (°)	Relleno (%)	Tensión (MPa)	Resultado ecuación (MPa)	Error (%)
0	20	34,240	35,646	4,106
0	40	35,360	33,436	5,441
0	60	36,427	37,274	2,325
0	80	47,722	47,159	1,181
20	20	29,298	30,898	5,464
20	40	31,483	28,689	8,877
20	60	32,280	32,526	0,763
20	80	41,427	42,411	2,377
45	20	27,102	27,151	0,178
45	40	26,078	24,941	4,360
45	60	27,165	28,779	5,942
45	80	37,920	38,664	1,961
68	20	26,526	25,849	2,555
68	40	23,360	23,639	1,194
68	60	26,618	27,476	3,226
68	80	39,573	37,362	5,590
90	20	26,903	26,527	1,394
90	40	24,747	24,318	1,733
90	60	25,716	28,155	9,487
90	80	38,995	38,040	2,448
			MEDIA	3,530

Las diferencias son mínimas, se da como bueno el ajuste. La ecuación (siendo el ángulo = α en grados y el relleno = β en porcentaje) para tensión máxima en MPa es:

$$\sigma_{\max} = 43,903 - 0,276 \alpha - 0,564 \beta + 1,944 \cdot 10^{-3} \alpha^2 + 7,559 \cdot 10^{-3} \beta^2$$

Para el módulo de Young se obtiene:

Estadísticos de bondad del ajuste:	
Observaciones	20,000
GL	15,000
R ²	0,874
SEC	194413,795
MEC	12960,920
RMSE	113,846

La ecuación (siendo el ángulo = α en grados y el relleno = β en porcentaje) para el módulo de Young (E) en MPa es:

$$E = 1963,816 - 9,052 \alpha - 15,317 \beta + 6,864 \cdot 10^{-2} \alpha^2 + 0,249 \beta^2$$

Para el límite elástico se obtiene:

Figura 90. Bondad del ajuste de la regresión no lineal para límite elástico

Estadísticos de bondad del ajuste:	
Observaciones	20,000
GL	15,000
R ²	0,962
SEC	29,569
MEC	1,971
RMSE	1,404

La ecuación (siendo el ángulo = α en grados y el relleno = β en porcentaje) para límite elástico (φ) en MPa es:

$$\varphi = 41,855 - 0,242 \alpha - 0,561 \beta + 1,671 \cdot 10^{-3} \alpha^2 + 7,483 \cdot 10^{-3} \beta^2$$

4. Discusión de resultados

4.1 Propiedades mecánicas

Se aprecia que las tendencias de masa, coste y tiempo son lineales con el porcentaje de relleno. Las gráficas de tiempo se han corregido con las repeticiones de los ensayos.

Las líneas de las gráficas de los siguientes subpuntos son las de regresión polinómicas de segundo grado para cada nube de puntos.

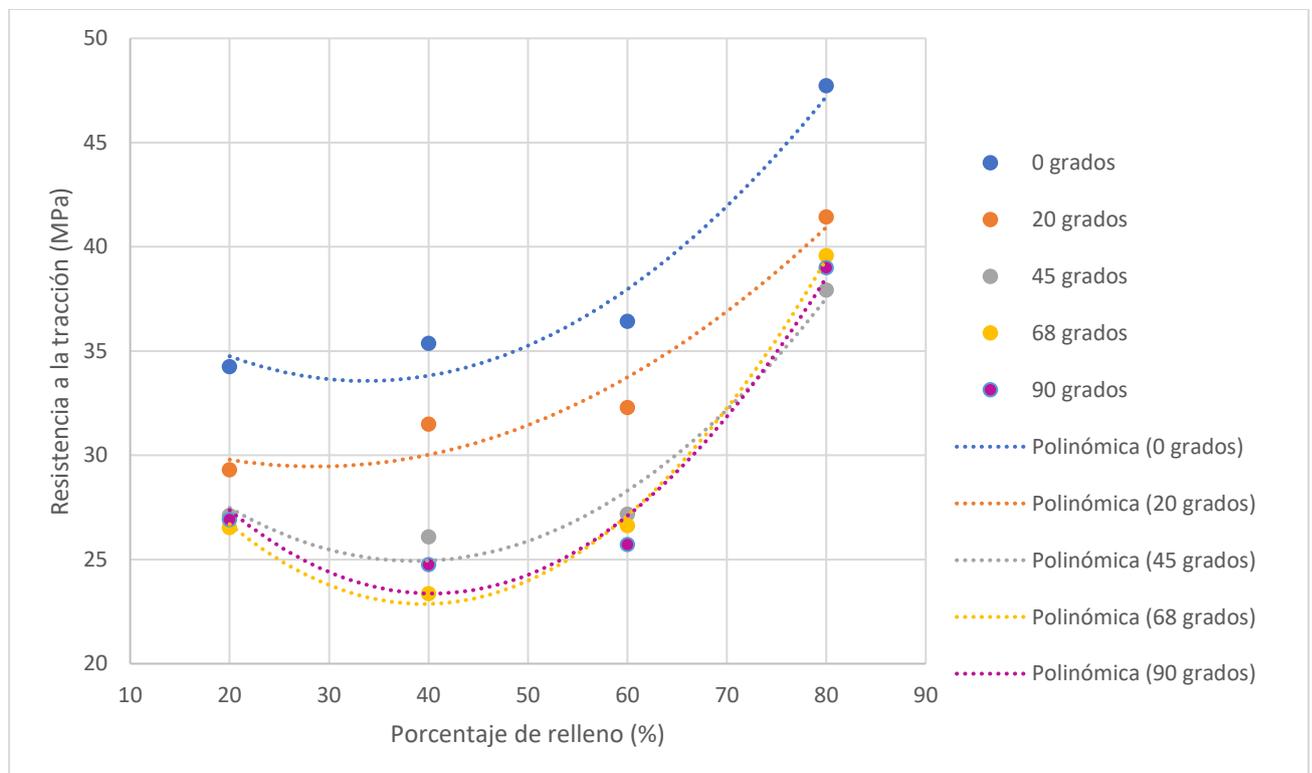
4.1.1 Resistencia a tracción

Comparando los datos de la tensión máxima se obtiene la Figura 92. Se observa una notable influencia del porcentaje de relleno, pero sólo es notable a partir de que el porcentaje de relleno sea superior al 50% aproximadamente. Antes de eso las gráficas son aproximadamente constantes. En cuanto al ángulo de tramado, se observa que tiene una influencia notable si es bajo. Cuanto menor sea, más alineadas están las fibras con la dirección de tracción. Sin embargo, al alcanzar 45 ° su influencia es mínima.

La dispersión de los datos es aparentemente mayor con respecto al ángulo de tramado para porcentajes de relleno intermedios, pero no tanto para los porcentajes de relleno cercanos a los extremos (20 y 80%).

En definitiva, no se aprecia una diferencia en la resistencia a la tracción del material para ángulo de tramado superior a 45 ° o porcentajes de relleno inferiores al 50%.

Figura 91. Comparación de gráficas de resistencia a la tracción



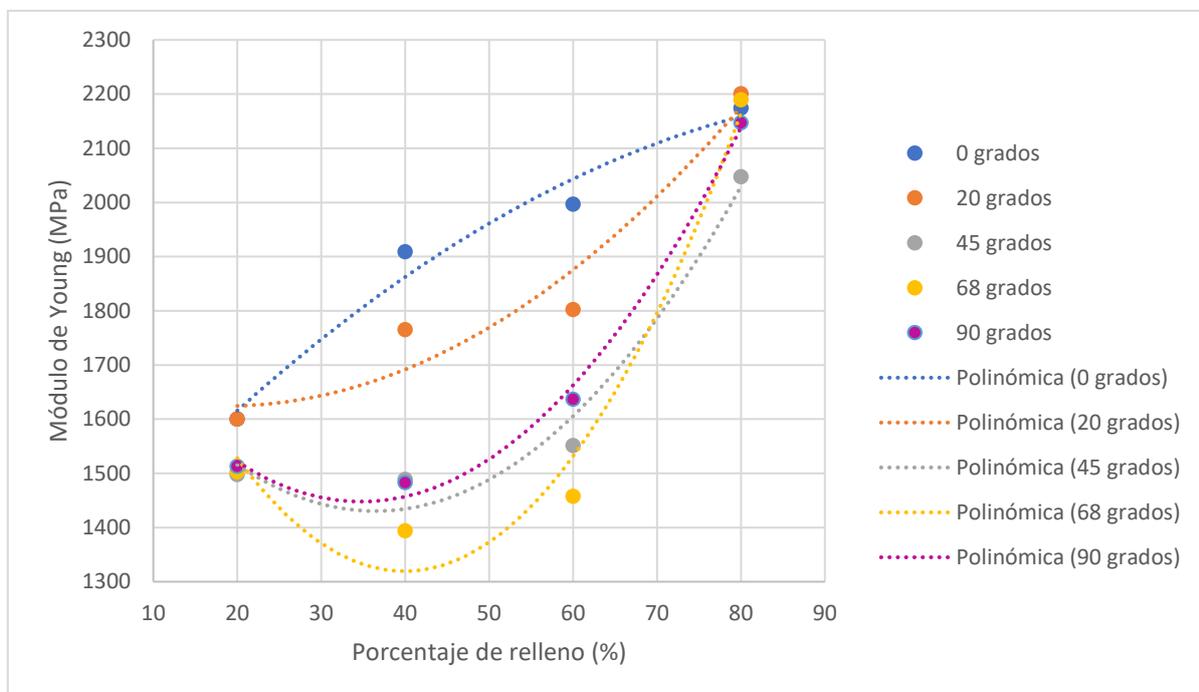
4.1.2 Módulo de Young

Comparando los resultados del módulo de Young se obtiene la Figura 93. Viendo el gráfico, se llega conclusiones análogas a las del punto 4.1.1.

La influencia del porcentaje de relleno sólo es notable a partir del 50% aproximadamente. El ángulo de tramado tiene una influencia mucho mayor para ángulos de tramados inferiores a 45° (0° y 20°). La dispersión de datos respecto al ángulo de tramado es mayor para porcentajes de relleno intermedios. Es menor para porcentajes de relleno cerca del extremo de estar vacía y completamente llena la probeta.

Se puede apreciar que para 0° la curva de regresión no sigue la forma esperada del todo. Un ligero cambio en un valor intermedio altera notablemente la forma de la curva.

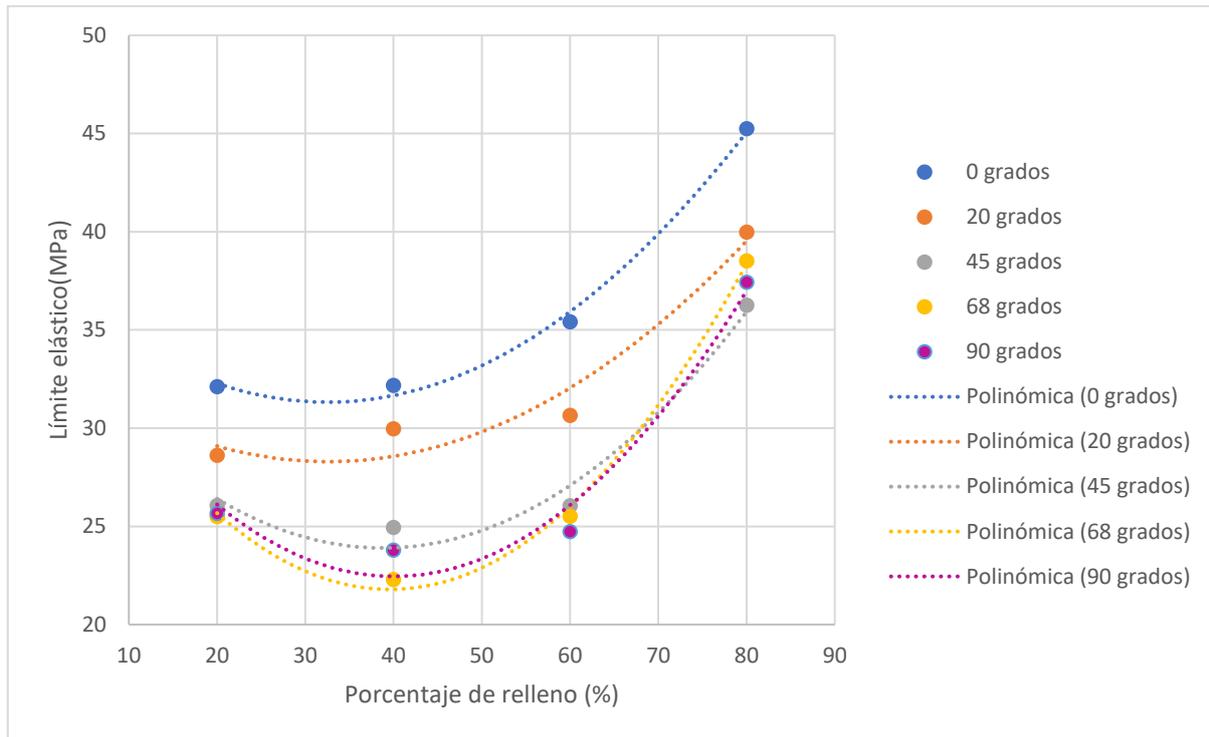
Figura 92. Comparación de gráficas de módulo de Young



4.1.3 Límite elástico

Como se ha podido ver, estos datos tienen curvas que son muy similares a las de tensión máxima de resistencia a tracción salvo que sus valores son sensiblemente menores. Por ello, las conclusiones son idénticas a las del punto 4.1.1.

Figura 93. Comparación de gráficas de límite elástico



4.2 Elongaciones máximas

Estos datos han sido proporcionados por el programa se les ha aplicado el criterio de *Chauvenet*. Al hacer esto ha quedado en:

- 0° → Se han desechado en la aplicación de *Chauvenet* para la elongación máxima las probetas 2 y 3 del 20% de relleno antes de comenzar por ser dúctil. El resto han caído en el rango.
- 20° → Ninguna rechazada.
- 45° → Se han eliminado inicialmente para el 20% de relleno las probetas 1, 3 y 5 de las primeras tandas por ser dúctiles, y la número 4 de la segunda tanda del 20% de relleno por lo mismo. Todas las probetas del 60% parecen tener un declive muy largo antes de romper. Pero no rompen dúctil tras esto, llegadas a un punto parten. Por ello, no se ha descartado ninguna de esta tanda inicialmente. Si es cierto que al aplicar *Chauvenet* ha hecho falta la segunda iteración, se ha salido del rango la probeta 1.
- 68° → Cabe mencionar que se ha descartado por el criterio de *Chauvenet* la probeta 5 del 40% por salirse del rango.
- 90° → De las medidas de 20% han tenido que eliminarse las probetas 1, 2, 3 y 5 de la segunda tanda. Al parecer ha habido un problema con esa tanda. Aunque los datos de tensión máxima no son tan dispersos como estos de la elongación. Ya que los de tensión cayeron todos en el rango de *Chauvenet*. Pero las probetas eliminadas tenían

elongaciones de valores entre 4 y 6 mm cuando la media de la elongación máxima es muy inferior como se ve en la Tabla.

Después de esto ha sido necesario restarle un valor que dependía del porcentaje de relleno y el ángulo de tramado. Y es que, tal como se ha indicado anteriormente, hay un deslizamiento inicial. Este es el mismo aproximadamente para todas las probetas de una misma tanda, pero puede variar de una a otra. Suele ser 0,5 o 0,7 mm aproximadamente. Al margen de esto, sin tener en cuenta las probetas que rompen dúctil, hay probetas que tienen un declive antes de la rotura total. Como prácticamente todas tienen una zona de estas características, no se puede decir a partir de qué punto es demasiado y habría que restarle algo. Por ello la dispersión de los datos es muy grande y es complicado llegar a ninguna conclusión de interés. La Tabla en mm se muestra a continuación:

Tabla 21. Datos de elongación máxima en mm

Elongación máxima (mm)						
Porcentaje de relleno	0 °	20 °	45 °	68 °	90 °	Media según relleno
20	2,303	1,623	1,642	1,839	1,76	1,833
40	2,170	1,684	1,345	1,670	1,658	1,705
60	1,712	1,806	1,916	1,686	1,472	1,718
80	2,052	1,784	1,842	1,526	1,542	1,749
Media según ángulo	2,059	1,724	1,686	1,680	1,608	1,752

Como se puede observar, no hay prácticamente tendencias claras, salvo que, si se saca la media para todos los porcentajes de relleno que hay, y los que se organizan por el ángulo de tramado, parece ser que cuanto mayor sea el ángulo, menor la elongación. A continuación, se puede ver la variación de la elongación máxima según el porcentaje de relleno para un ángulo fijo.

Figura 94. Elongación máxima según porcentaje de relleno para ángulo de tramado de 0°

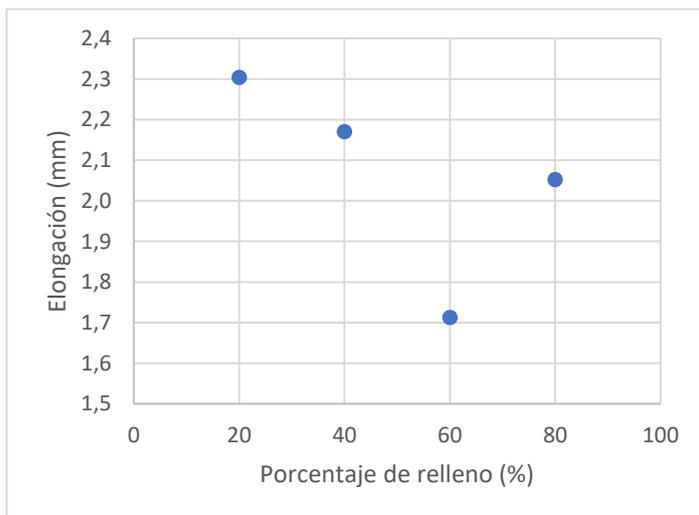


Figura 95. Elongación máxima según porcentaje de relleno para ángulo de tramado de 20°

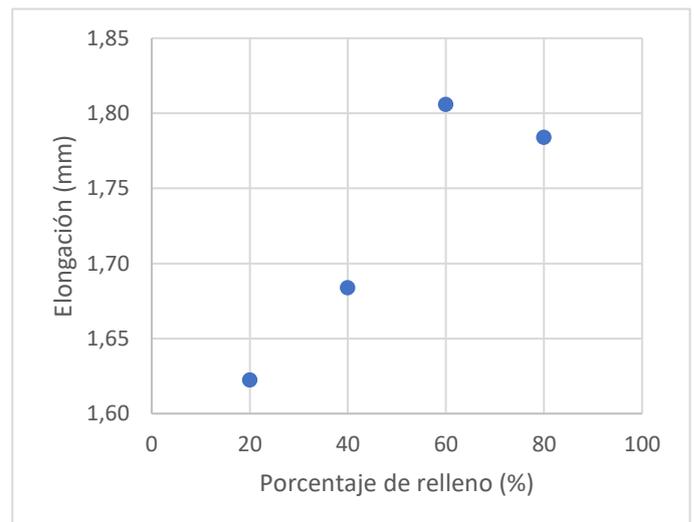


Figura 97. Elongación máxima según porcentaje de relleno para ángulo de tramado de 45°

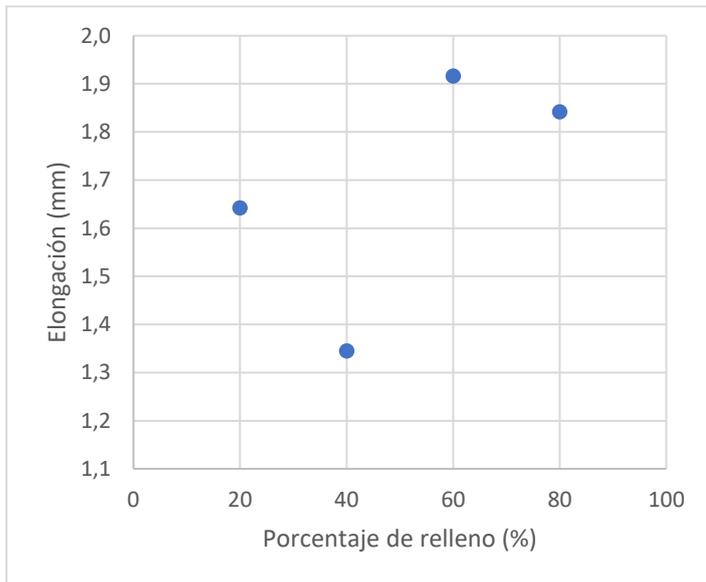


Figura 96. Elongación máxima según porcentaje de relleno para ángulo de tramado de 68°

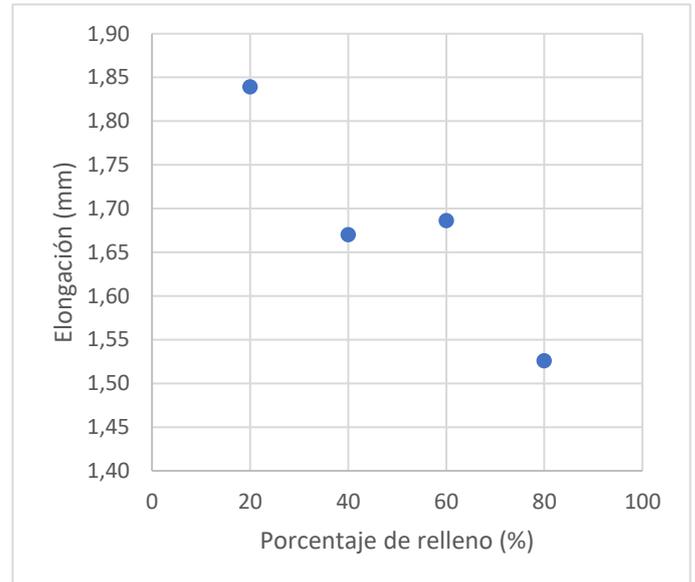


Figura 98 Elongación máxima según porcentaje de relleno para ángulo de tramado de 90°

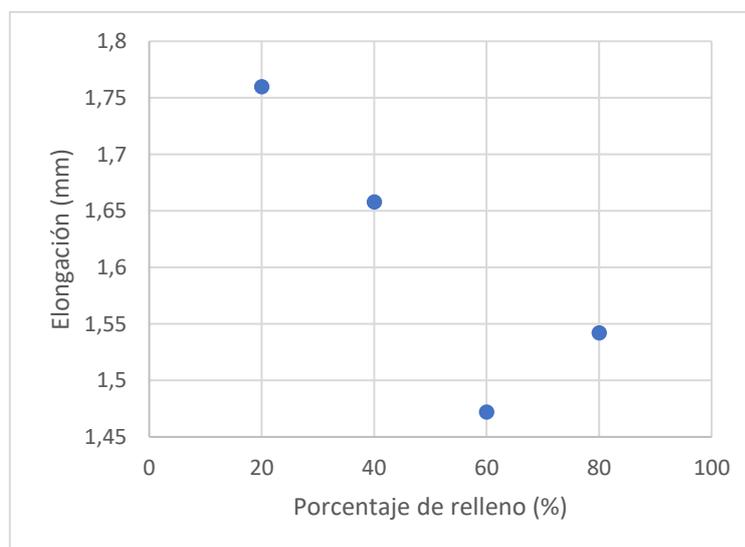
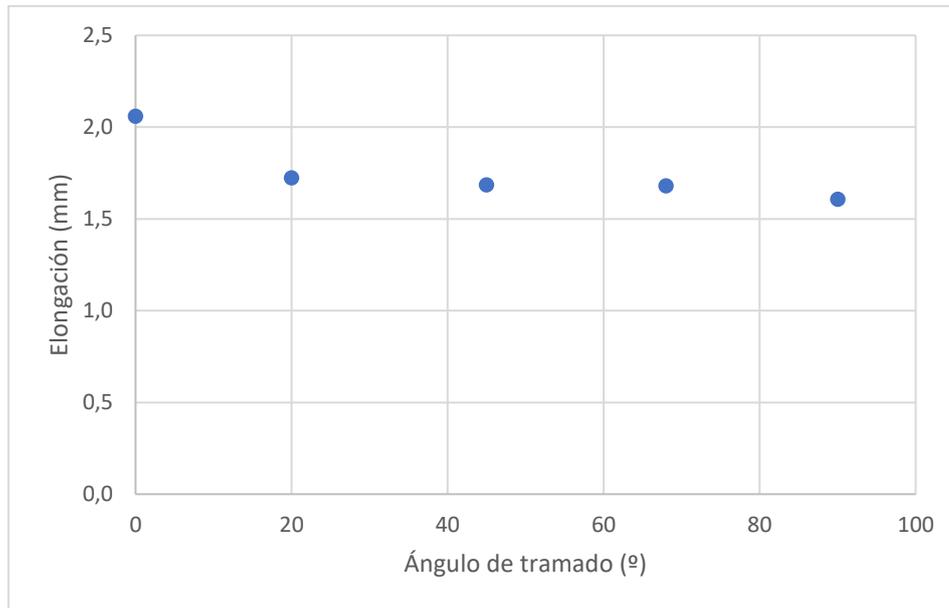


Figura 99 Elongación máxima según ángulo de tramado. Media de porcentaje de relleno



La tendencia podría decirse hasta cierto punto que es decrecer con el porcentaje de relleno por las Figuras 87, 89 y 91. En la mayoría está el dato atípico de del 60% de relleno. Las gráficas de 20° y 45° (Figuras 88 y 90) tienen muchos datos atípicos, parecen seguir la tendencia opuesta a los demás. Por ello, no se pueden sacar conclusiones válidas de estas gráficas.

Si se hiciera lo mismo para los ángulos se vería lo mismo. Que no hay tendencia clara. Sin embargo, la de media en cada ángulo de los porcentajes de relleno arroja información de interés. Esto es, que la elongación es menor conforme aumenta el ángulo de tramado. Se puede observar en la Figura 100. Disminuye además notablemente entre los 0 y los 20 ° y se queda en un valor estable.

Por otro lado, también decir que la celda amarilla de la Tabla 20 que la elongación media es de 1,752 (mm). Que corresponde con un 2,502% de deformación.

4.3 Comparativa de resultados

Viendo las características del material (6) (7) , se observa que en sus características se afirma que ofrece con respecto al PLA tradicional lo siguiente:

- Módulo elástico + 34%
- Resistencia a la tracción + 23%
- Capacidad de elongación + 28%

Comparando con el TFG de la referencia (8) se ve que en la Tabla 4.2 tiene las ecuaciones de las tensiones máximas con respecto al porcentaje de relleno. Son las ecuaciones de la regresión parabólica que se muestran en las gráficas tensión máxima-porcentaje de relleno en este caso. No se usan los valores de la regresión lineal múltiple porque, como se ha explicado en el punto 3.6.2, hacer una regresión lineal no es lo correcto en este caso. La tabla es para los ángulos de 22,5 y 67,5 ° en teoría, aunque como ya se ha mencionado esto no puede ser. Igualmente, por

ser estos valores de ángulos diferentes en la zona en la que los valores son casi constantes, se comparan los de 20° y 67,5° con las de 20° y 68° de este trabajo.

Para los valores de referencia de este trabajo, se han usado las fórmulas de regresión parabólica también. Ya que unos salen de las ecuaciones de regresión, es lógico que los otros también. Se obtiene lo siguiente:

Tabla 22. Incremento porcentual de la resistencia a tracción

% de relleno\Ángulo de tramado	0 °	20 °	45 °	68 °	90 °
20	39,114	50,143	52,757	52,622	53,112
40	18,393	41,601	41,974	39,890	39,979
60	7,514	28,127	27,873	27,305	26,528
80	7,365	14,540	17,985	22,531	20,956
				Media (%)	31,516

Se ve que las diferencias con el material de PLA se hacen mucho más notables en porcentajes de relleno altos. Pero mayormente, con ángulo de tramado mayores.

A parte de esto, se observa que la diferencia media es del 31,516% con respecto al PLA sin grafeno. Las características mecánicas han mejorado notablemente, de hecho, los valores obtenidos son superiores al 23% de la hoja del material. Son valores superiores a los esperados. La variación del ángulo de tramado con el porcentaje de relleno constante es menor que la que se obtiene aumentando el porcentaje de relleno para un ángulo de tramado constante.

Haciendo lo mismo con la Tabla 4.8 de (8) módulo de Young, se obtiene lo siguiente:

Tabla 23. Incremento porcentual del módulo de Young

% de relleno\Ángulo de tramado	0°	20°	45°	68 °	90°
20	35,608	42,835	50,635	51,283	54,717
40	16,325	33,645	39,842	37,161	48,328
60	5,392	21,278	22,077	20,023	33,411
80	-0,289	8,528	5,737	10,747	18,076
				Media (%)	27,768

Como era de esperar, la tendencia de los datos es similar a la obtenida en la Tabla 22.

Se observa que el incremento en este caso es del 27,768% frente al 34% de la hoja. Es algo menor que el de la hoja de datos del material. Sin embargo, es un valor bastante cercano al que se da en esta. En ambos TFG la forma de hallar el módulo elástico no es exacta. Y aun así el valor del incremento es similar al de la hoja de datos.

No hay datos respecto para comparar el límite elástico

Por último, se compara la elongación máxima del material. En este caso no se cuenta con ecuaciones que definan la variación de la elongación. Por tanto, no hay más remedio que basarse en la Tabla 4.7 de (8). En ella, se muestran las elongaciones medias para cada ángulo de tramado. Se han sacado haciendo la media de todos los porcentajes de relleno. Por un lado, se observa que efectivamente encaja la tendencia que se ha visto de los ángulos de tramado. Para

0 ° la elongación es mucho mayor, pero a partir de unos 20 ° se reduce mucho y se queda estabilizada. La comparación establece lo siguiente:

Datos de la Tabla 4.7 de la referencia (7)			Datos de la Tabla 20 de este TFG			Incremento (%)
Ángulo de tramado	Elongación Media (mm)	Elongación Media (%)	Ángulo de tramado	Elongación Media (mm)	Elongación Media (%)	
0	4,54	6,48	0	2,059	2,941	-120,495
22,5	3,07	4,39	22,5	1,724	2,463	-78,074
45	2,86	4,1	45	1,686	2,409	-69,632
67,5	2,79	3,98	67,5	1,680	2,400	-66,071
90	3,04	4,23	90	1,608	2,297	-89,055
					Media (%)	-84,666

Visto esto, se observa que el material es aparentemente más frágil con grafeno que sin él. No se pueden obtener conclusiones válidas de los datos de las elongaciones

5. Conclusiones

Se ha realizado un estudio teórico-práctico de la influencia de los principales parámetros de FDM en las propiedades mecánicas a tracción del material.

En el objetivo principal de este TFG, que se ha cumplido razonablemente bien, se usa como referencia el valor de R^2 de las ecuaciones de modelización del material. Se ha podido comprobar que las tendencias de las tensiones máximas y módulo de Young se corresponden con las obtenidas por el TFG del año anterior (8).

En aspectos como el del estudio de regresión se ha mejorado en la forma de hallarlo al hacerlo de forma no lineal con un software diferente. Las ecuaciones obtenidas son más precisas en relación con los datos de los que se partía según el R^2 .

De todo el estudio realizado se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- El estudio de costes directos e indirectos refleja que efectivamente los efectos indirectos de consumo eléctricos son despreciables. Sólo merecería la pena hacer un estudio previo más a fondo, en vez de fiarse de los datos proporcionados por *Simplify*, en caso de emplear materiales caros para un número de probetas mucho más elevado.
- Cuando se incrementa el porcentaje de relleno se incrementa la masa que es necesaria emplear y en consecuencia aumenta el tiempo de fabricación y los costes de forma lineal.
- En general, el incremento del porcentaje de relleno aumenta la resistencia a la tracción, el módulo elástico y el límite elástico. Esto se debe a que cuantos menos huecos haya dentro del material, mayor es la densidad del material y en consecuencia mayor es la resistencia a tracción, así como el módulo y límite elástico. Sin embargo, esta relación no es lineal siempre. Son aproximadamente lineales hasta el 50-60%, alcanzando un punto crítico a partir del cual un ligero aumento del porcentaje de relleno causa un gran aumento de estos parámetros.
- Por otro lado, para el ángulo de tramado la tendencia es que, para un ángulo de 45° o superior, los valores de resistencia a tracción módulo de Young y límite elástico son similares. Tener un ángulo de tramado menor aumenta los parámetros. Cuando las fibras están orientadas en la dirección de tracción la resistencia es mucho mayor que cuando forman un cierto ángulo. Sin embargo, esta tendencia es mucho más acusada pasando de 0° a 20° , que de 68° a 90° (18).
- La elongación máxima se ve, aparentemente, más afectada por el ángulo de tramado que por el porcentaje de relleno. La elongación es mucho mayor para 0° que, en el resto de los ángulos, en la que es aproximadamente constante. Del porcentaje de relleno no se observa nada, no hay resultados concluyentes en este aspecto debido a la amplia dispersión de los resultados. Habría que hacer un estudio específico para determinar de forma exacta el deslizamiento final y poder llegarán a conclusiones más precisas.

A continuación, se indican, a título orientativo, algunos estudios futuros que podrían realizarse para complementar los trabajos realizados.

- Se podría tomar este TFG como referencias de otro TFG para comparar las propiedades mecánicas. El límite elástico por ejemplo no ha sido comparado aún.
- Estudiar el comportamiento de otros materiales diferentes al PLA, como el ABS.

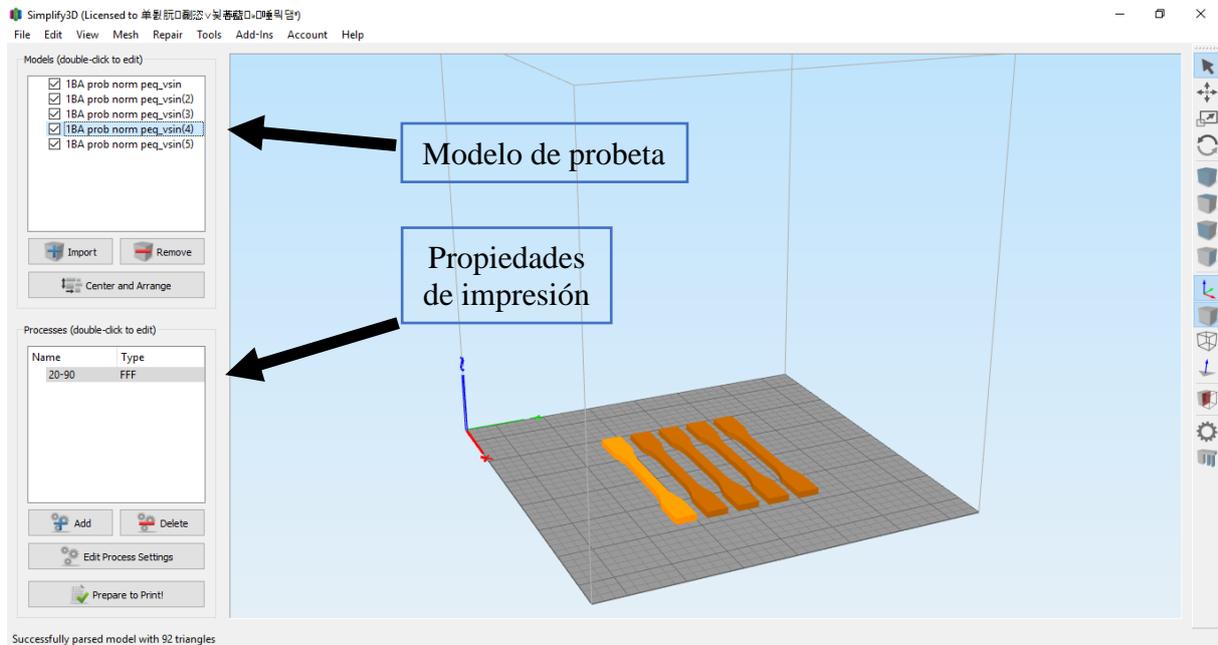
- Estudiar la influencia de los parámetros de impresión en otras propiedades del material como pueden ser las propiedades eléctricas.
- Estudiar la influencia de otras variables en la resistencia a tracción. Por ejemplo: el número de perímetros, combinación de ángulos de tramado, o patrón de relleno.
- Estudiar la influencia de los tratamientos químicos o térmicos post-impresión.
- Estudiar las propiedades mecánicas del material respecto a otro tipo de esfuerzos como torsión.

6. Anexos

Anexo I. Pruebas iniciales

Todas las probetas, antes de crear el archivo de impresión se han configurado en el software Simplify. La pantalla inicial del mismo se muestra en la siguiente Figura:

Figura 100. Pantalla inicial de Simplify



En la flecha que indica el modelo de la probeta es donde se añade el diseño de la probeta. Cuantos más diseños haya en esa ventana más probetas se imprimirán.

Antes de empezar a imprimir las series, se han impreso probetas una a una para comprobar que la configuración de partida era la adecuada.

- 1ª Prueba: No se ha impreso la esquina superior izquierda arriba ni las marcas de la mordaza, además la primera capa no estaba pegada del todo. Se modifica el "extrusion multiplier" de 0,92 a 1 para que rellene mejor entre líneas.

Figura 101. Prueba 1



- 2ª Prueba: Se arregla el problema de la primera capa, pero la esquina y las marcas de las mordazas de arriba sigue sin estar. Parece que corta antes de tiempo.

Figura 102. Prueba 2



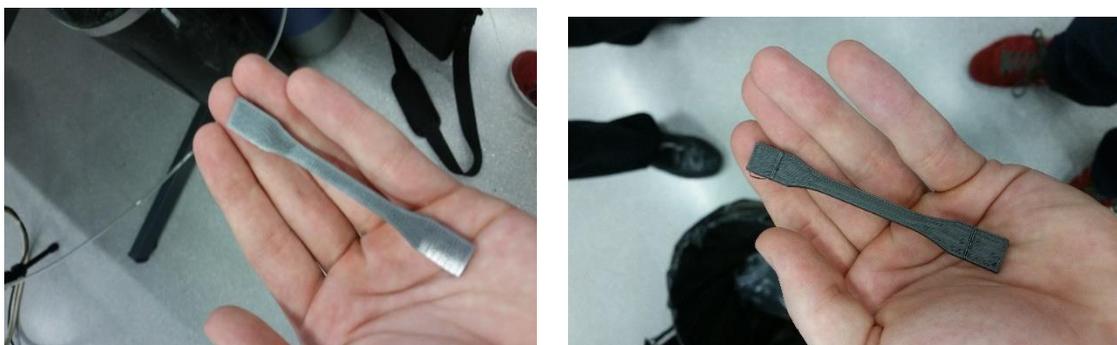
- 3ª Prueba: Mismo fallo, la esquina que ha dejado es la superior derecha. Pero la primera capa sólida esta vez ha tenido un acabado superficial bueno (la última capa es brillante como se ve en la Figura 104). Esto es debido a que se ha reajustado la cama.

Figura 103. Prueba 3



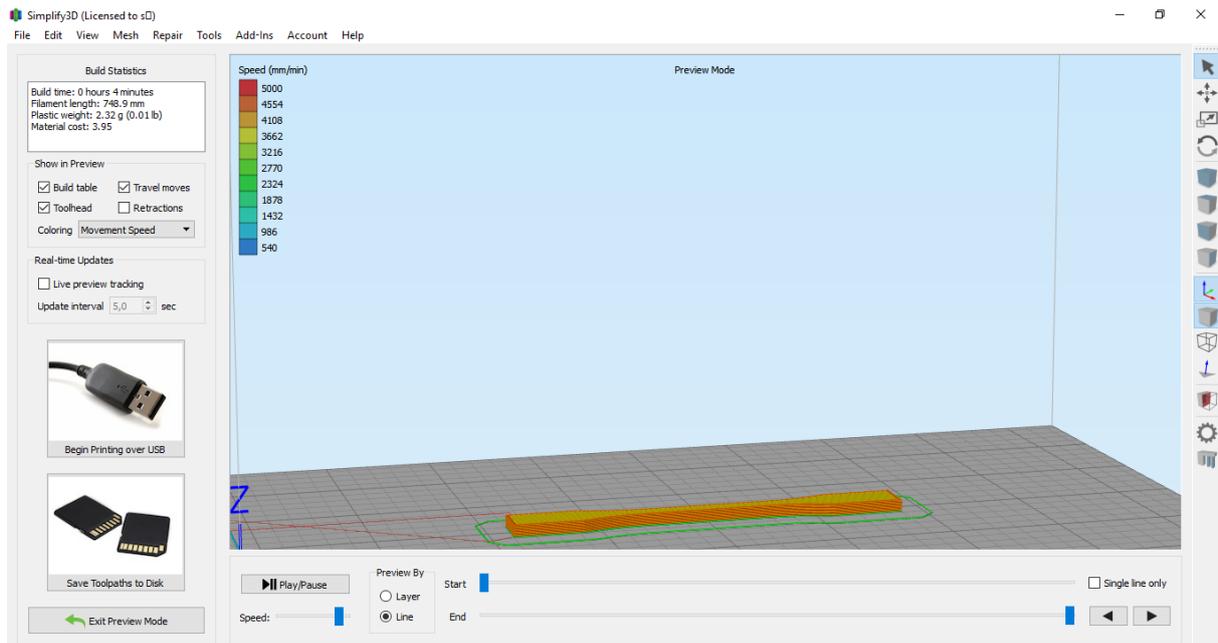
- 4ª Prueba: Se ha modificado el archivo STL de la probeta. Esta vez el programa si muestra las mordazas. Se ha impreso correctamente, el único fallo es la esquina superior derecha ligeramente levantada.

Figura 104. Prueba 4



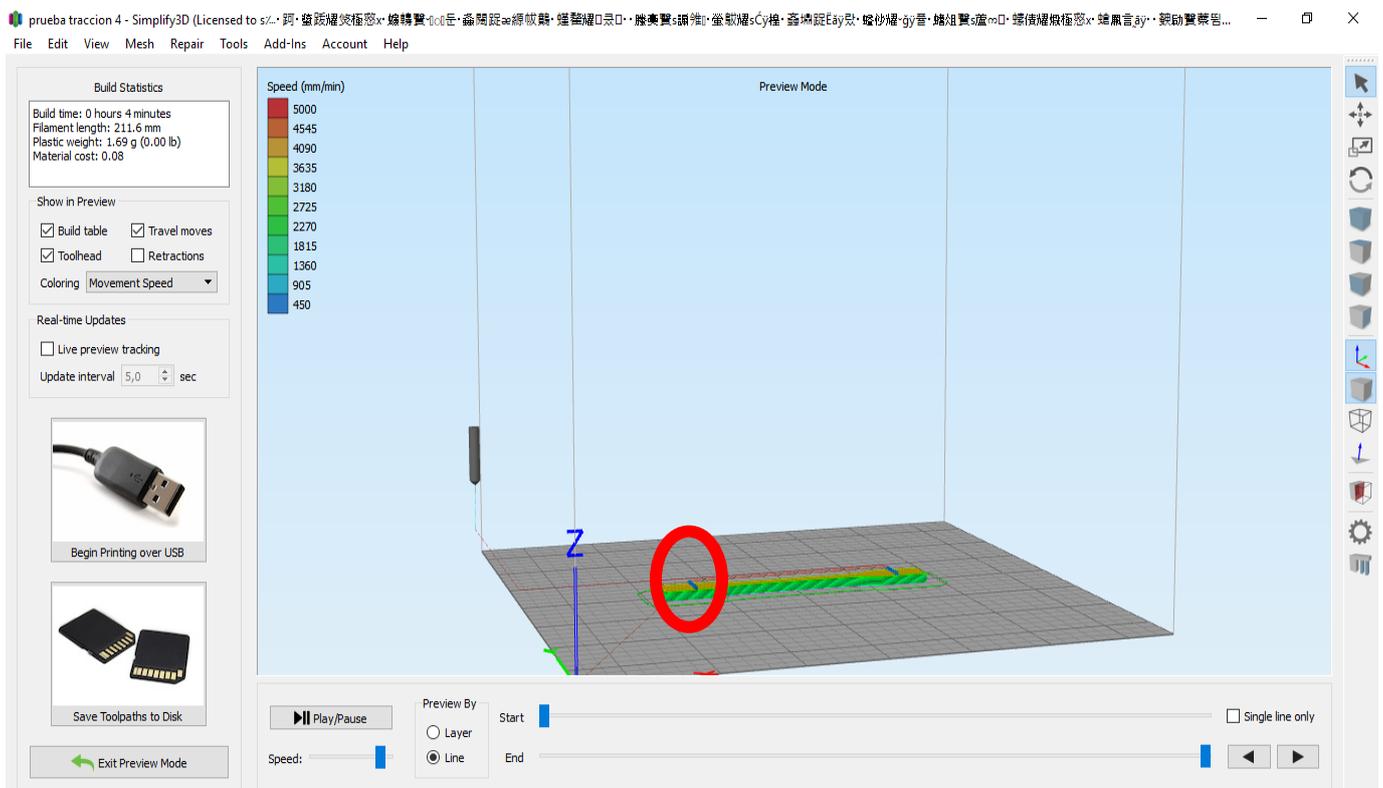
El archivo que muestra que antes no se veía la mordaza:

Figura 105. Vista previa en Simplify sin mordaza



El archivo modificado:

Figura 106. Vista previa en Simplify con mordaza



Anexo II. Primeras tandas y variación de variables

Los tiempos de impresión, y de calentamiento si procede, se medirán con la ayuda del cronómetro del móvil.

- La primera impresión sale, con el ángulo 0, las líneas del relleno torcidas. Se baja el "Extrusion multiplier" a 0,95 para comprobar si es ese el problema.

Figura 107. Primera impresión con 20% de relleno y ángulo de tramado de 0 °



- La segunda (20°) sale con el mismo problema, para la tercera se baja el parámetro a 0,9 pero no se baja más de ahí. Ver Figura 109.

Figura 108. Primera impresión con 20% de relleno y ángulo de tramado de 20 °



- La tercera (45°) no presenta un derrape inicial tan grande como la anterior, pero siguen siendo líneas de relleno onduladas igualmente. El acabado superficial por arriba parece haber empeorado ligeramente. Para el cuarto ensayo se prueba con el "extrusion multiplier" a 0,9, se pone el "outline overlap" a 25% para el acabado y se activa el "coasting distance" para tratar de reducir el derrape inicial.
- La cuarta (68°) ha dado problemas. Ha habido un atranque inicial, se ha parado y desatracado. Además, se ha cambiado la velocidad de 4800 a 2400 mm/min. Se desecha por la modificación de la velocidad a medias.

Se eliminan las marcas de las mordazas, a la hora de imprimir dejaba un hueco como se puede ver en la Figura 110. La serie sin mordaza (Figura 112) se puede observar que no deja un hueco la mordaza, porque ya no hay mordaza.

Figura 109. Hueco de probeta con mordaza en Simplify

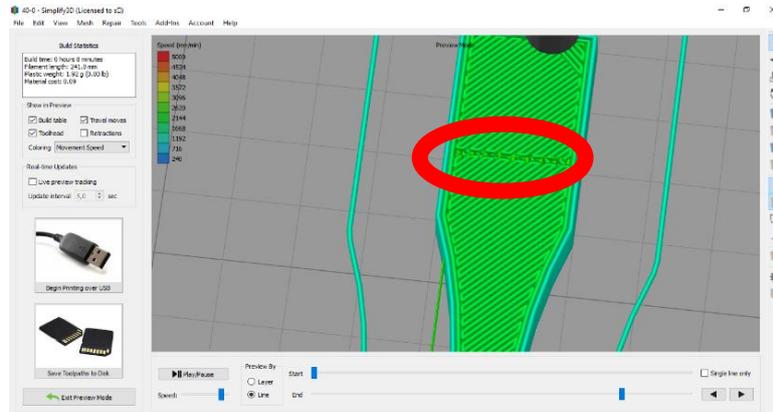
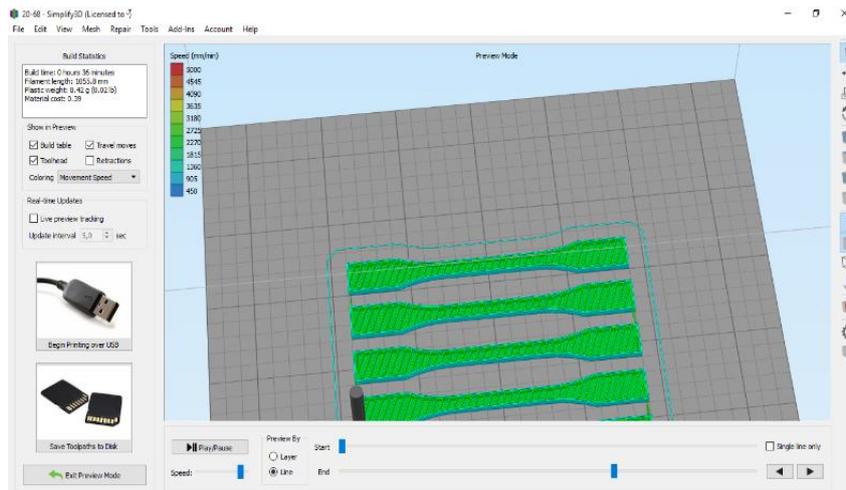


Figura 110. Serie en Simplify sin el hueco de la mordaza



- Se repite la serie de 68° de ángulo de tramado, esta vez a 2400 m/min desde el principio. Si siguiera habiendo problemas se imprimirá con el “extrusion multiplier” a 0,95.
- La primera capa de las líneas de relleno estas salen rectas, pero a lo largo de cada uno hay zonas donde suelta más que otras. Se reduce el “extrusion multiplier”. La primera capa sólida tenía zonas ligeramente despegadas. Se recalibra la impresora. Al hacer esto, se observa que no ha impreso una esquina, es posible que haya usado el archivo de modelo de la probeta equivocado. Además, se aprecia que las probetas impresas hasta ahora se han hecho con una altura de capa de 0,2, no de 0,3 como se hizo en los TFG anteriores. Será necesario repetir la impresión de estas probetas.
- Se usa el archivo modificado, sigue saliendo con la esquina sin rellenar. Usando el mismo archivo se imprimen las 4 probetas restantes, pero con el “Outline overlap” a 30%. El relleno tiene buen aspecto salvo la primera capa de todas, a la última capa le

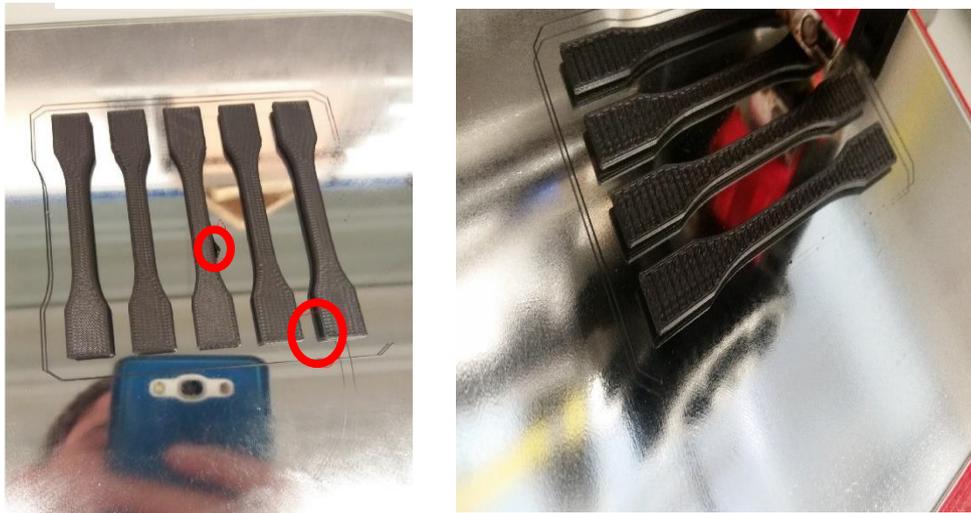
falta consistencia. Sigue faltando la esquina, pero en la última probeta de todas solamente.

- Se vuelve a usar el archivo inicial, todos dan fallos y no se encuentra el por qué. Dado que el fallo está en una zona que no dará problemas a la hora de ensayarla (está fuera de la zona que sufre la tracción) se ignora.
- **NOTA: Se ha impreso primero una, luego las otras 4. Además, sólo se encuentra en la última probeta de la serie a imprimir. Los parámetros que se estaban variando se quedan definitivamente en:**

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ○ “Extrusion multiplier” → 0,95 ○ “Outline overlap” → 30% |
|--|

- Al imprimir el de 90 ° ha ido todo bien, el único problema es una macro-gota de material que se puede ver en la Figura 112 y en la esquina que falta a todas las probetas.

Figura 111. Primera impresión con 20% de relleno y ángulo de tramado de 90 °

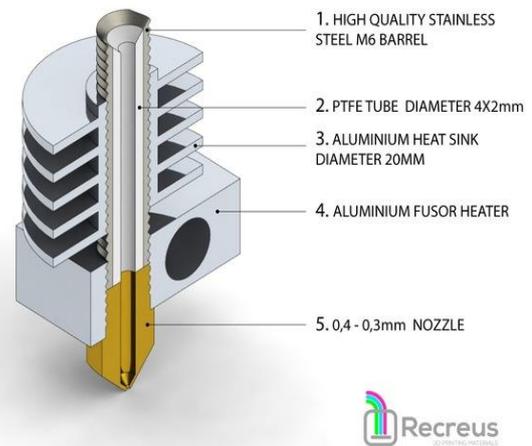


- Todas las de 40 % de relleno han salido sin más problemas, salvo algún exceso de material que suelta la impresora. La de 60% de relleno y cero grados ha ido bien, pero al imprimir a 20 ° se ha tenido que desmontar porque ha habido un atasco.
- El atasco se ha producido, probablemente, debido a la distancia entre el “nozzle” (boquilla) y el “barrel”. Estas dos piezas, que se pueden ver en las Figuras 113 y 114, no encajan en el fusor “heater” (fusor térmico) con distancia nula. Hay un pequeño hueco entre ambas en el que se va acumulando material solidificado que termina por taponar. El motivo de los “pegotes” que estaban saliendo probablemente era esto, ya que desbordaba algo de material del “hotend”, por el hueco entre el “heat sink” y el “fusor heater”, y caía.

Figura 113. Partes del Hotend de la impresora 3D. Vista 1



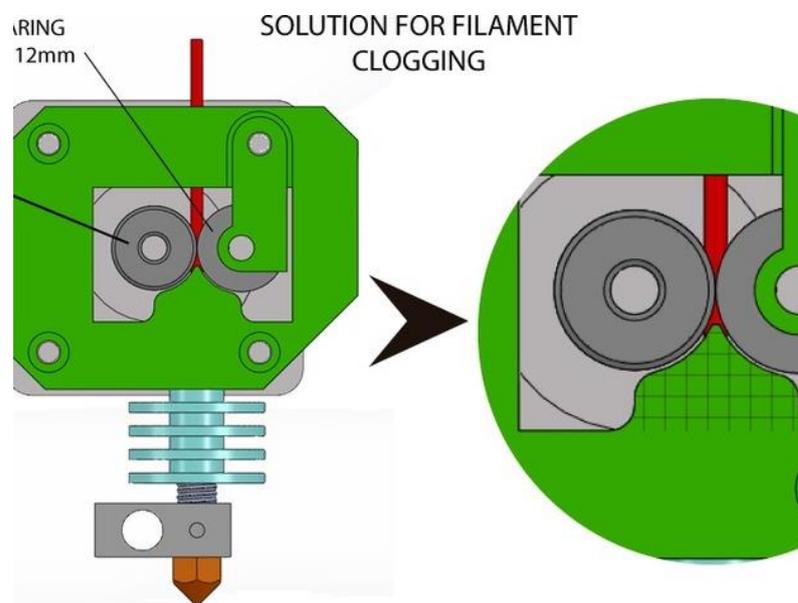
Figura 112. Partes del Hotend de la impresora 3D. Vista 2



<https://www.thingiverse.com/thing:263143>

En la siguiente imagen, la de la Figura 116, se ve claramente el hueco antes mencionado.

Figura 114. Partes del Hotend de la impresora 3D. Vista 3



<https://www.thingiverse.com/thing:263143>

Para limpiar el “nozzle” y el “barrel” se ha usado un soplete. Se ponen en una plancha metálica y se orienta la llama del soplete en la dirección del “barrel” y del “nozzle”. Cuando se hace eso, se aprecia que la capa que estaba solidificada por dentro sale líquida. Una vez hecho eso, y se han enfriado las partes, se limpia la carbonilla que ha quedado dentro de las partes con un cable pelado. Los filamentos de cobre rascan la carbonilla y la quitan.

- Una vez que arreglada los ensayos del 60% de relleno de 20° y 45° han salido bien. Al poner el de 68° se ha atascado 2 veces. Dado que la impresora 3D está limpia se ha optado por subir la temperatura de extrusión a 200°. Han salido bien las de 68° y 90°.
- Al poner las de 80% la impresora se ha atascado en varias ocasiones y la última de todas no se ha podido arreglar fácilmente, hay que desmontarla. Dado que el compañero Óscar Victorio Puche ya había terminado para entonces de imprimir sus probetas se continua en su impresora (LemonBot). Cambian el script inicial por el decalaje que tiene la impresora 3D y otros parámetros que se pueden observar a continuación. Dado que esta no da problemas de atascos se vuelve a imprimir a 190 (°C) para que cuadre con los demás ensayos.
- A partir de aquí, no se han medido los tiempos de calentamiento. El calentador empleado en esta impresora 3D, calienta más de la cuenta. Debido a ello, la impresora se pasa de la temperatura de consigna unos 10°. Por tanto, hay que cancelar la impresión una vez se estabilice la temperatura, y volver a darle a imprimir. Entonces el sistema empezará a imprimir.
- Las impresiones del 80% han salido bien todas. La esquina que hasta ahora no salía impresa, ahora se imprime bien en la impresora LemonBot.
- Dado que hay material suficiente, se ha impreso las probetas del 20% con el ángulo de inclinación a 0°, 20° y 45° de nuevo con la altura de capa bien. Estas serán las que se ensayen. Se observa que el tiempo de impresión ha sido menor en este caso, y que Simplify preveía menos tiempo también. Esto será debido seguramente a la distribución de las probetas en la cama. Dado que sólo se ha cambiado para la configuración ya dada de otro TFG los parámetros que interesaban. En la Figura 116 se muestra que se han impreso todas las esquinas en esta impresora No se espera que esto influya en los resultados.

Figura 115. Primera impresión con 20% de relleno y ángulo de tramado de 90 °



Por razones que se explican en el punto 3.5, se han vuelto a imprimir las probetas del 20% para 45°, 68° y 90°. Antes de esto la impresora PrusaLemon fue reparada. Se volvieron a fabricar en el taller las piezas del “nozzle” y el “barrel” por estar muy dañadas. Las impresiones han salido todas bien. Lo único destacable es que sigue faltando la esquina de la última probeta en estas series.

Anexo III. Consideraciones de la balanza

La balanza concretamente de la marca Sartorius, y su modelo es el “LA310S”. Se puede observar en las siguientes Figuras.

Figura 116. Pantalla de la balanza digital

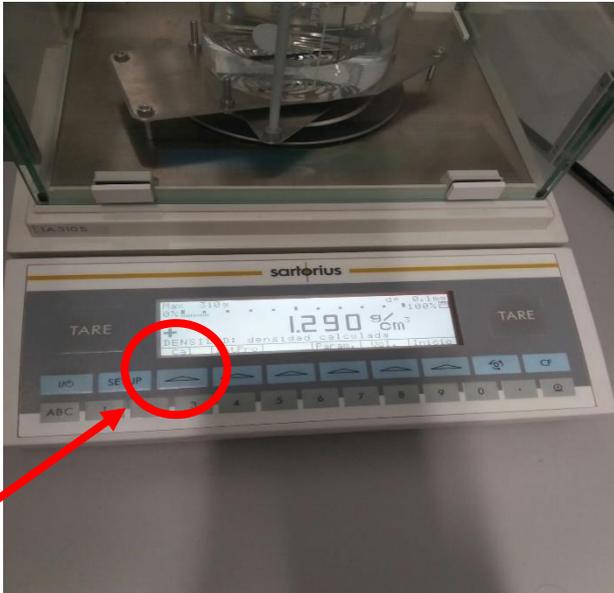
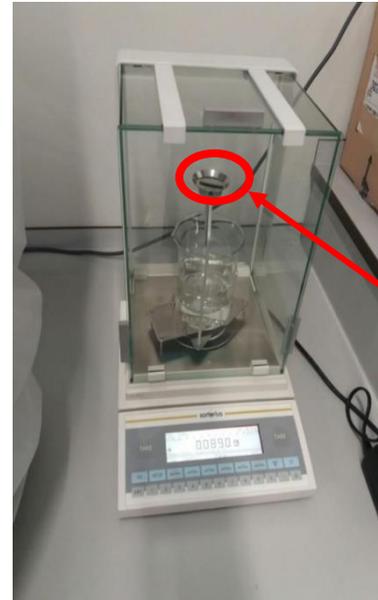


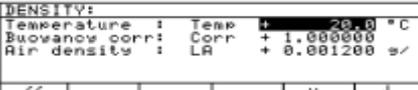
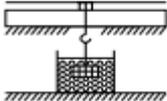
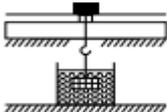
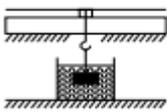
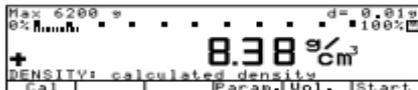
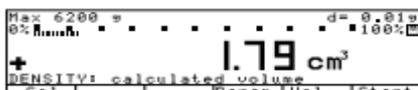
Figura 117. Balanza digital



Básicamente las probetas se ponen con cuidado, porque si no hay que recalibrar, en el platillo metálico “1” de la Figura 117. Como se puede apreciar en la pantalla anterior se muestra la masa con una precisión de hasta las decimas de miligramo.

La balanza también puede medir densidades. El método usado se describe en la siguiente Figura:

Figura 118. Medición de densidad en la balanza

Step	Key (or instruction)	Display/Output
1. Delete previously stored values if necessary	CF	
2. Change configurations, if necessary	Param. soft key	
3. Position the sample holder (immersed)		
4. Tare the balance	Tare	
5. Determine the weight of the sample in air: place sample on the weighing pan		
6. Store weight value	Wa soft key	
7. Determine the weight of the sample in liquid: place sample in the sample holder		
8. Store weight Density of sample is displayed	Wf1 soft key	
9. Display volume of sample	Vol. soft key	
10. Display weight	Weigh soft key	
11. Repeat procedure with next sample, if desired	Start soft key	

(19) Página 66

El fundamento del método es según la diferencia de pesos en las densidades del aire y del agua.

Si la balanza requiere de calibración, se mostrará por pantalla un mensaje intermitente que dice “IsoCAL” en el punto “2” de la Figura 118. Cuando sale ese mensaje simplemente hay quitar el soporte metálico, colocarlo dentro del vaso, y darle al botón que está justo debajo del mensaje.

Tomando como referencia su manual de instrucciones se observa que la precisión efectivamente es de 0,1 mg, y que el método de autocalibración antes mencionado (ISOcal) es dependiente del tiempo y la temperatura. (19)

Anexo IV. Consideraciones de los ensayos de tracción

Para romper las probetas se ha utilizado una máquina de ensayo universal para ensayos de tracción.

Esta máquina manda los datos al ordenador a través de un software denominado Metrotec. Lo primero que sale, es el menú. En este menú se selecciona ensayo manual. Dentro de la siguiente pantalla hay que seleccionar tracción.

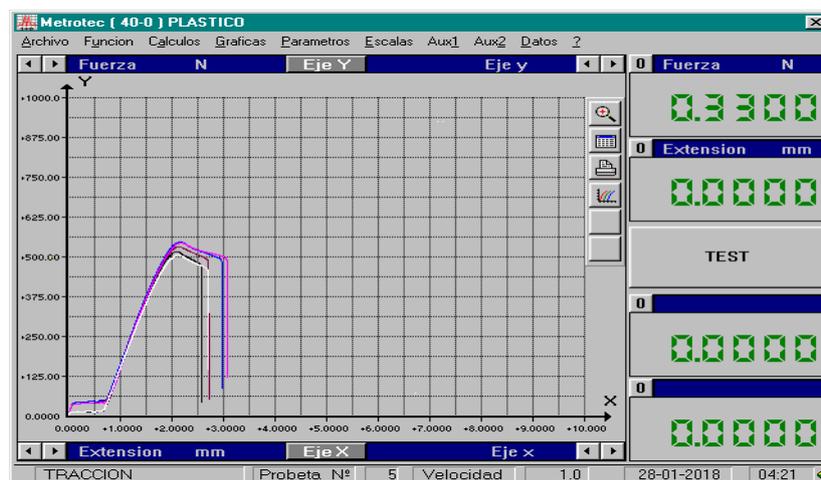
Saldrá una gráfica en blanco, en esta se irán mostrando las curvas de tracción de las probetas. Antes de eso, hay que cambiar las escalas y una serie de parámetros que vienen predeterminados. Los parámetros más destacables que se han utilizado son: Precarga = 0,1 N, Distancia de mordazas = 70 mm, ancho de la probeta = 3 mm, Grosor de la probeta = 5 mm, Sección = 15 mm², velocidad del ensayo 1 mm/min y velocidad de lecturas normal.

La precarga en principio se hace para evitar el deslizamiento inicial y que se ajusten las mordazas. La distancia de las mordazas ha de ser de 70 mm. Por este motivo las probetas que se tenían inicialmente llevaban estas mordazas. Simplemente se cambia eso por unas marcas con rotulador permanente que se han hecho en las probetas. La distancia se ha controlado con una regla. De esta forma se cumple el punto 6.3 de la Norma UNE-EN ISO 527-1. (9)

Además de esto, se puede ajustar las escalas de las gráficas en otra pestaña que se muestra en la Figura. Cabe mencionar que “Fuerza” es el eje Y, y que la extensión es el eje X en este submenú. La escala de la fuerza será 0-1000 N, la de extensión será 0-10 mm.

A continuación, tras realizar ensayos, el aspecto que tendrá la gráfica que se abre tras pulsar tracción debería de ser el que se muestra en la Figura siguiente:

Figura 119. Gráficas en Metrotec



Como se ve, se produce un pequeño deslizamiento al realizar los ensayos de tracción. Esto ocurre casi siempre al principio del ensayo, en principio no tendrá consecuencias negativas. Salvo un ligero cambio de procedimiento a la hora de hallar el módulo de Young que se explica en el punto 3.4.

A la hora de guardar los datos de las gráficas y los datos relevantes los da el programa en las pestañas “Gráficas” y “Función”. Se copiaron dichos datos a su hoja de Excel correspondiente.

Todos los ensayos se han realizado en una atmósfera normalizada. Esto es con temperatura de 23 ± 2 °C y con humedad relativa de $50 \pm 10\%$ como indica la norma (9). Esto ha sido posible porque la sala de impresión y de ensayos están aclimatadas adecuadamente.

Las incidencias en los ensayos de las probetas con 20% de relleno:

- En el ángulo de 0 ° parecen haberse ensayado correctamente 3/5 probetas. Salvo la segunda y la tercera el resto han tenido una rotura frágil. Las otras se han “deshilachado”, causando que la elongación sea mucho mayor y que por tanto esta medida haya que descartarla probablemente. Como se puede observar en la Figura siguiente, la rotura ha sido mucho menos uniforme en estas dos probetas:

Figura 120. Probetas rotas de 20% de relleno y ángulo de tramado de 0 °



- En el ángulo de 20 ° no ha habido mayores complicaciones, todas han tenido una rotura frágil.
- Las de 45 ° han presentado una vez más el problema del deshilachado, concretamente 3/5. Aunque en este caso no han sido tan marcado como en las anteriores. Como se puede observar en la imagen y en los datos, las probetas con este problema son la 1,3 y 5:

Figura 121. Probetas rotas de 20% de relleno y ángulo de tramado de 45 °



- Las de 68 ° han salido en general bien, una parece que ha roto frágil. Las de 90 ° tampoco han dado problemas.

Las incidencias en los ensayos de las probetas con 40% de relleno:

- Las de 0°, 20° y 45° han salido sin complicaciones.
- Las de 68° han roto todas bien, la 4 se ha astillado un poco como se puede observar en la Figura a continuación. A la derecha de esta se puede ver uno de los trozos en los que se ha astillado.

Figura 122. Probetas rotas de 40% de relleno y ángulo de tramado de 68 grados



- Las de 90° han salido bien, la tendencia que se observa es similar a las probetas del 20%. Cuanto más perpendicular es el ángulo respecto a la dirección de tracción, menos fuerza resiste el material aparentemente.

Las incidencias en los ensayos de las probetas con 60% de relleno:

Las de 60% de relleno han salido todas bien. En las de 0° uno de los datos parece más alejado de los demás de lo que debiera. No parece que sea necesario repetir ningún ensayo

Las incidencias en los ensayos de las probetas con 80% de relleno:

Todas las probetas con todos los ángulos han roto bien. Han dado las mayores fuerzas hasta ahora.

Dados los resultados contradictorios que se han obtenido al comparar los datos de 45°, 68° y 90°, se decidió repetir las probetas del 20% de estos ángulos porque parecen ser las que destacan de manera más notoria.

Las incidencias en los ensayos repetidos de las probetas con 20% de relleno:

- Las de 45° han salido bien, salvo la probeta número 4, esta ha roto de una forma extraña, aunque dentro de los límites de tiempo establecidos en la norma.

Figura 123. Probetas rotas de 20% de relleno y ángulo de tramado de 45 °



- Las de 68 ° han roto todas bien. Las de 90 ° han roto dúctil las dos primeras, pero dentro del tiempo límite. La 4 bien, y la 5 dúctil.

Figura 124. Probetas rotas de 20% de relleno y ángulo de tramado de 90 °



NOTA: Cuando se describe que ha habido una rotura dúctil o que se ha deshilachado, ocurre una rotura como la de la Figura 126 que se muestra a continuación.

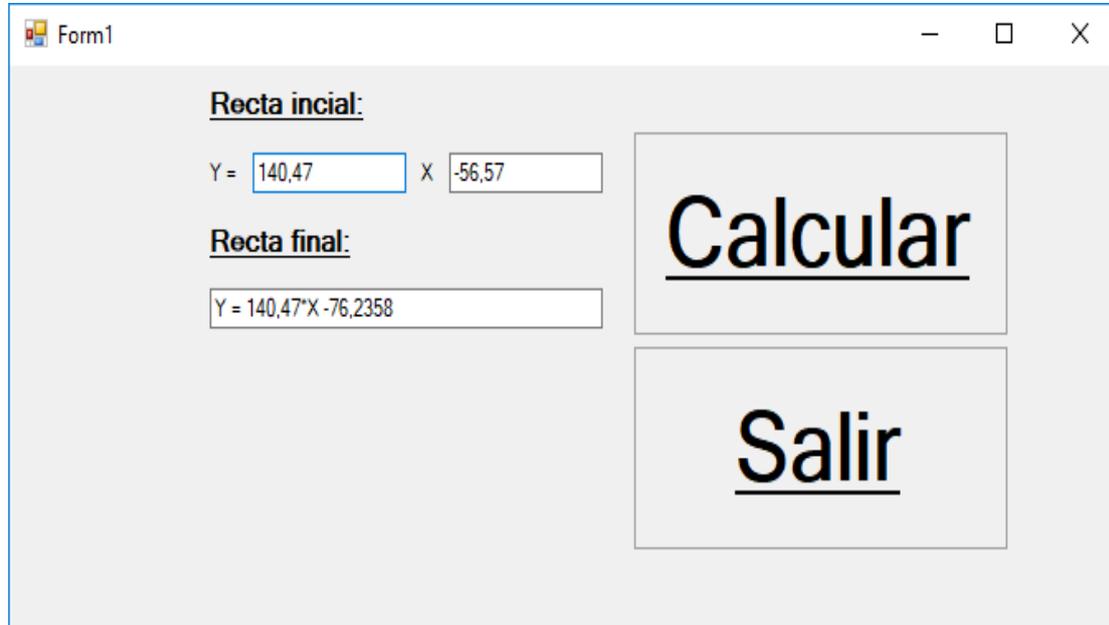
Figura 125. Rotura dúctil de una probeta



Anexo V. Programa de recta del límite elástico

El aspecto del programa que despeja la ecuación de la recta paralela es el siguiente:

Figura 126. Interfaz del programa de rectas paralelas



Form1

Recta inicial:

Y = X

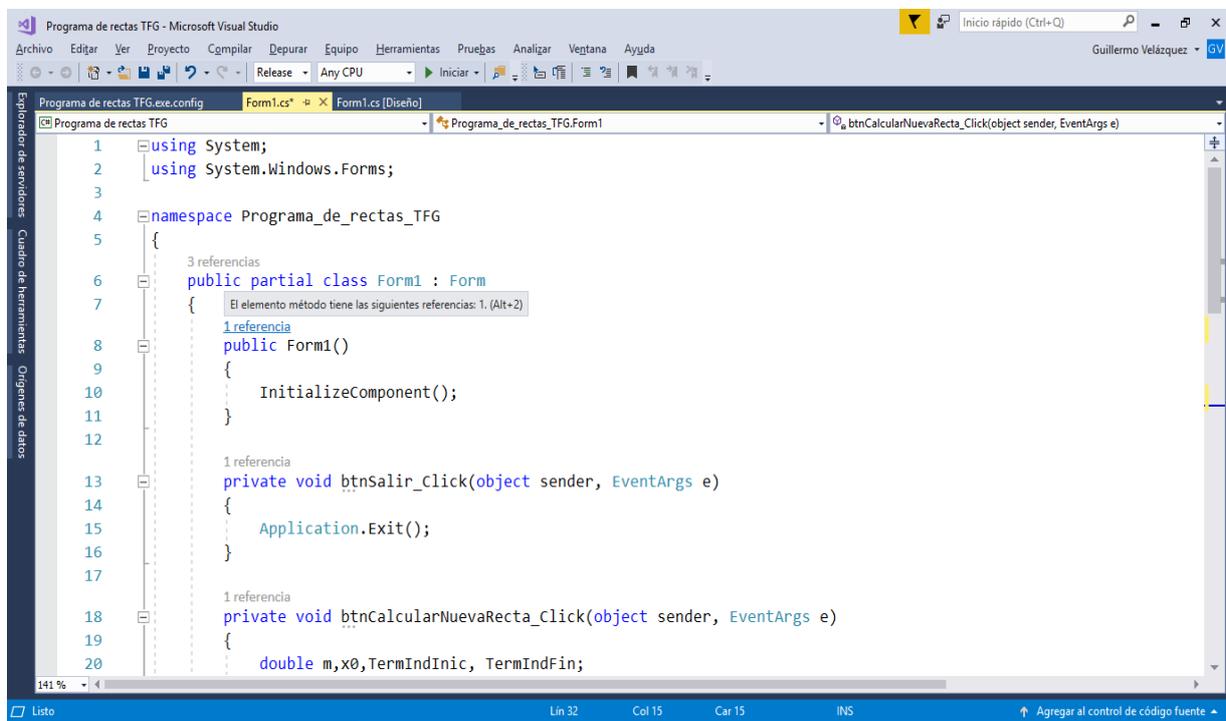
Recta final:

Calcular

Salir

El código que hace funcionar al programa se muestra en las dos siguientes Figuras:

Figura 127. Código en C#. Parte 1

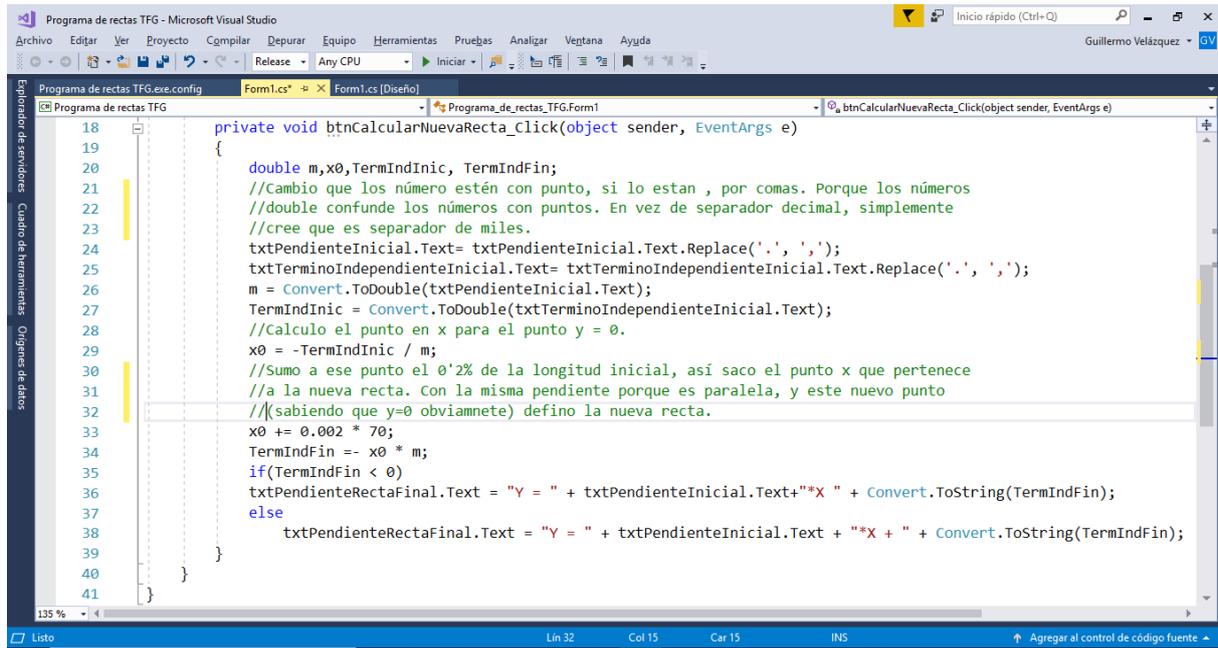


```

1 using System;
2 using System.Windows.Forms;
3
4 namespace Programa_de_rectas_TFG
5 {
6     3 referencias
7     public partial class Form1 : Form
8     {
9         El elemento método tiene las siguientes referencias: 1. (Alt+2)
10        1 referencia
11        public Form1()
12        {
13            InitializeComponent();
14        }
15
16        1 referencia
17        private void btnSalir_Click(object sender, EventArgs e)
18        {
19            Application.Exit();
20        }
21
22        1 referencia
23        private void btnCalcularNuevaRecta_Click(object sender, EventArgs e)
24        {
25            double m,x0,TermIndInic, TermIndFin;
26        }
27    }
28 }

```

Figura 128. Código en C#. Parte 2



```

18 private void btnCalcularNuevaRecta_Click(object sender, EventArgs e)
19 {
20     double m,x0,TermIndInic, TermIndFin;
21     //Cambio que los número estén con punto, si lo estan , por comas. Porque los números
22     //double confunde los números con puntos. En vez de separador decimal, simplemente
23     //cree que es separador de miles.
24     txtPendienteInicial.Text= txtPendienteInicial.Text.Replace('.', ',');
25     txtTerminoIndependienteInicial.Text= txtTerminoIndependienteInicial.Text.Replace('.', ',');
26     m = Convert.ToDouble(txtPendienteInicial.Text);
27     TermIndInic = Convert.ToDouble(txtTerminoIndependienteInicial.Text);
28     //Calculo el punto en x para el punto y = 0.
29     x0 = -TermIndInic / m;
30     //Sumo a ese punto el 0'2% de la longitud inicial, así saco el punto x que pertenece
31     //a la nueva recta. Con la misma pendiente porque es paralela, y este nuevo punto
32     //(sabiendo que y=0 obviammete) defino la nueva recta.
33     x0 += 0.002 * 70;
34     TermIndFin = - x0 * m;
35     if(TermIndFin < 0)
36     txtPendienteRectaFinal.Text = "Y = " + txtPendienteInicial.Text+"*X " + Convert.ToString(TermIndFin);
37     else
38     txtPendienteRectaFinal.Text = "Y = " + txtPendienteInicial.Text + "*X + " + Convert.ToString(TermIndFin);
39 }
40 }
41 }

```

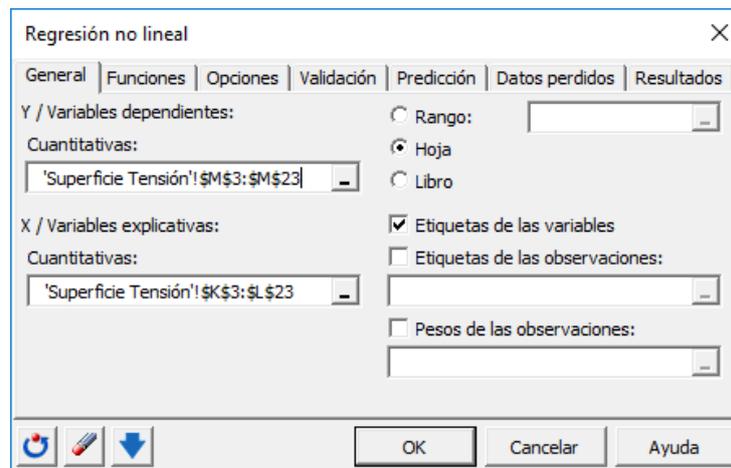
Básicamente, se mete la ecuación de la recta que se tiene, y el programa hace el despeje directamente mostrando la ecuación que interesa para el límite elástico.

Anexo VI. Regresión no lineal

El programa XLSTAT tiene una versión de prueba de 30 días, que se puede descargar en el siguiente enlace: <https://www.xlstat.com/es/descargar>

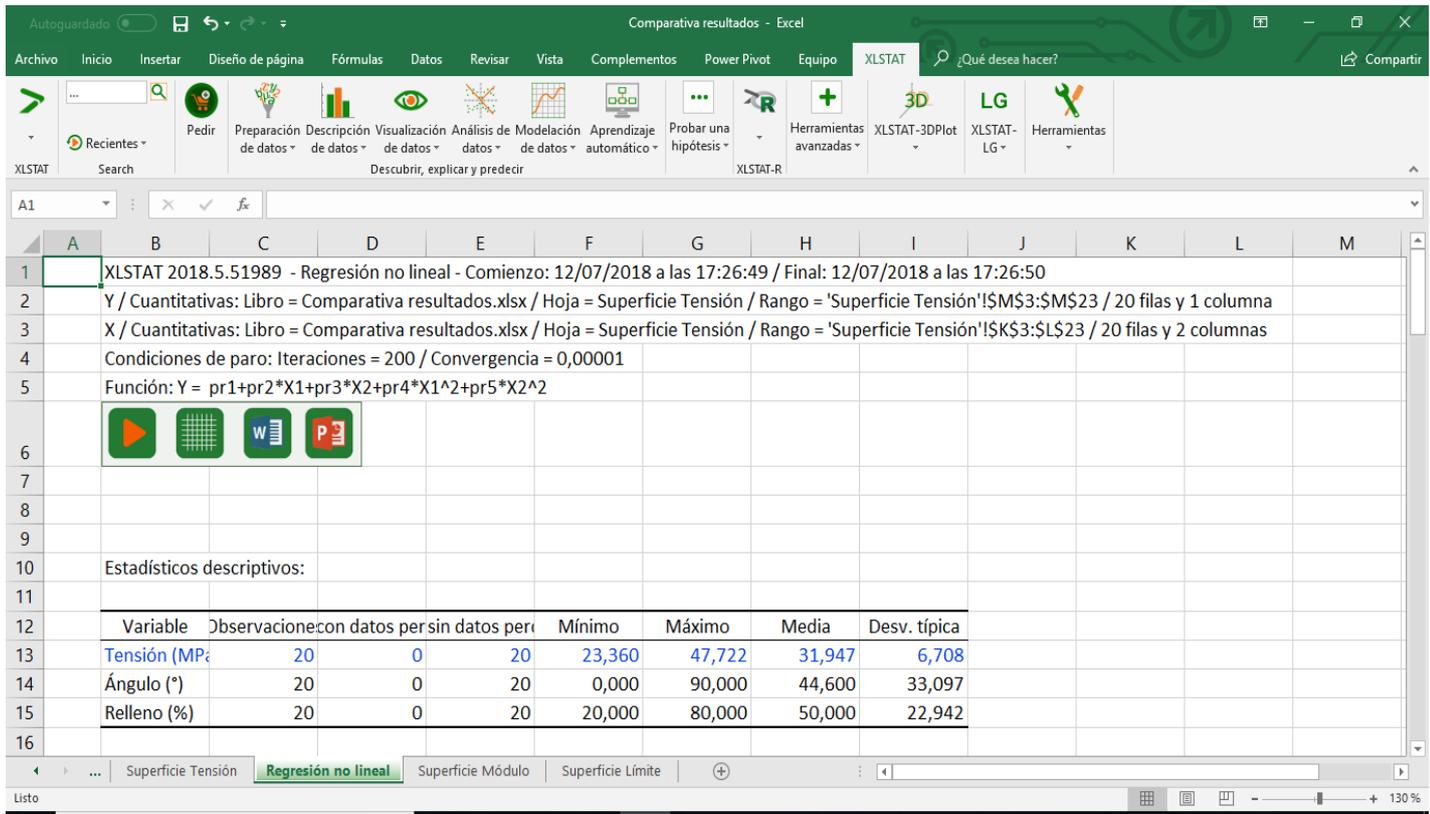
Para hacer una regresión no lineal el programa emplea un método iterativo. Se pedirá que se especifique un número de iteraciones y un punto de convergencia. Si no se dice nada tomará 200 iteraciones y 0'00001 de punto de convergencia. Inicialmente en Excel se selecciona la pestaña de XLSTAT, dentro de ahí se pincha en modelización de datos. La interfaz del programa tiene el siguiente aspecto.

Figura 129. Interfaz de regresión no lineal en XLSTAT



Las variables dependientes (de respuesta) son las de los datos de la tensión máxima, módulo de Young y límite elástico según el caso. En este caso es la tensión máxima. Las explicativas son siempre el ángulo de tramado y porcentaje de relleno. Hecho esto, lo siguiente es ir a la pestaña de funciones. Hay que escoger la primera de la lista de programadas. Son las polinómicas. Se da a elegir el grado del polinomio. Aunque se ha podido comprobar que el de grado 3 da mejores resultados, es más conveniente usar el de grado 2. A fin de cuentas, las relaciones de las curvas han sido polinomios de grado 2 también. En opciones se puede fijar el punto de inicial de los parámetros a estimar entre otras cosas. Además, es posible poner el número de iteraciones y el punto de convergencia. El resto de pestaña no influyen para lo que es el objetivo hacer, salvo la de resultados. En esta última, hay que cerciorarse de que esté marcado por lo menos la casilla de bondad del ajuste y de ecuación del modelo para que el programa lo calcule. Hecho todo esto (ya que está marcado en la casilla “General” la opción de hoja) se crea en una nueva hoja los resultados. Destacan los siguientes:

Figura 130. Hoja con regresión no lineal en Excel. Fecha e iteraciones



Como se puede ver han sido 200 iteraciones y el punto de convergencia mencionado. Además, da otra serie de parámetros que no son relevantes para este estudio.

7. Bibliografía

1. **Thomas, Douglas S. and Gilbert, Stanley W.** *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing. A Literature Review and Discussion.* U.S Department of Commerce, Applied Economics Office Engineering Laboratory. s.l. : NIST Special Publication 1176, 2014. pp. 1-47. [En línea] [Citado el: 4 Julio 2018] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1176>.
2. **Sánchez, Susana.** 3DNatives.com. [Online] Noviembre 9, 2017. [Cited: Julio 2018, 8.] Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografía-les-explicamos-todo/>.
3. **Stratasys.** Tecnología FDM. Imprima en 3D piezas duraderas con termoplástico real. *Stratasys.* [Online] [Cited: Julio 4, 2018.] Disponible en: <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/technologies/fdm-technology>.
4. **RepRap.** reprap.org. [Online] [Cited: Julio 22, 2018.] <https://reprap.org/wiki/RepRap>.
5. **MKS TECHNOLOGIES PVT, Ltd.** Fused Filament Fabrication (FFF). <http://www.mkstechgroup.com>. [Online] Marzo 2017, 23. [Cited: Julio 4, 2018.] Disponible en: <http://www.mkstechgroup.com/fused-filament-fabrication-fff/>.
6. **FILOALFA.** www.filoalfa3d.com. [Online] [Cited: Julio 2018, 5.] Disponible en: <https://www.filoalfa3d.com/en/specials-bundles/221-pla-grafilon-175-mm-700-g-8050327032712.html>.
7. —. www.filoalfa3d.com. [Online] [Cited: Julio 2018, 5.] Disponible en: <https://www.filoalfa3d.com/en/specialties-oversize/244-pla-grafylon-285-mm-700-g-8050327032699.html>.
8. **Esteban, Ezequiel Fernández.** *MODELIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS PIEZAS OBTENIDAS EN PROCESOS DE FABRICACIÓN ADITIVADA POR EXTRUSIÓN.* Cartagena : s.n., 2017. Trabajo de fin de Grado.
9. **Comité técnico AEN/CTN 53 Plásticos y caucho.** *Norma UNE-EN ISO 527-1.* Madrid : AENOR, 2012. Norma. Este documento forma parte de la biblioteca de la UPCT.
10. —. *Norma UNE-EN ISO 527-2.* Madrid : AENOR, 2012. Norma. Este documento forma parte de la biblioteca de la UPCT.
11. **Rodríguez, Joaquín López.** *Fundamentos de Conformación por Deformación Plástica.* [ed.] Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena : s.n., 20 de Octubre 2013. pp. 49-51.
12. **Universidad Politécnica de Cartagena.** *Ciencia e Ingeniería de Materiales. Bloque II. Transformaciones y tratamientos.* [ed.] Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena : s.n. p. 12.
13. **Finch, Jesús Grande.** Estudio energético en el Campus de la Muralla del Mar: Diseño de soluciones energéticas para lograr unos edificios de consumo casi nulo. [Online] Septiembre 2013. [Cited: Julio 19, 2018.] Pp. 64-65, 72. Disponible en: <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/3545/pfc5572.pdf?sequence=1>.
14. **MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO.** *Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado.* [Online] Diciembre 26, 2014. [Cited: Julio 19, 2018.] Página 13. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2014-13475>. - ISSN: 0212-033X.
15. **Rodríguez, Joaquín López.** *Fundamentos de Metrología, Tolerancias y Ajustes en Fabricación Mecánica.* [ed.] Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena : s.n., 11 de Febrero 2016. pp. 14-16.
16. **Abuín, J. M. Rojo.** Regresión lineal múltiple. [Online] 2007. [Cited: Julio 2018, 12.] Disponible en: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/36787341/REGRESION_LINEAL_MULTIPLE_3.PDF?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1531392798&Signature=XAYsc48uTHg%2F0g%2Bm0yjHc6DRWig%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DRegresion_line.
17. **Universidad de Córdoba.** www.uco.es. [Online] [Cited: Julio 12, 2018.] Disponible en: http://www.uco.es/zootecniaygestion/img/pictorex/06_19_26_8_correlacion_multiple.pdf.

18. *Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing.* **Miguel Fernández-Vicente, Wilson Calle, Santiago Ferrandiz y Andrés Conejero.** 3, Valencia : Mary Ann Liebert Inc, 2016, Vol. 3.
19. **Sartorius AG.** *Operating Instructions. Sartorius Masterpro Series. LA Models. Electronic Analytical and Precision Balances.* Sartorius AG. Goettingen, Germany : Sartorius AG, 2005. Manual. WLA6004-e05121.