



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial

Estudio y calculo por modelos informáticos y ensayos de las diferencias mecánicas entre piezas de poliamidas reforzadas con fibra de vidrio mecanizadas a partir de barras o placas y su equivalente en inyección. Aplicación a una pieza mecanizada y su posible optimización por los resultados del estudio para su posterior inyección.

Trabajo Fin de Grado

AUTOR/A: Poveda Cisneros, Alejandro

Tutor/a: Busquets Mataix, David Jerónimo

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Poveda Cisneros, Alejandro

Tutor/a: Busquets Mataix, David Jerónimo

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

INGENIERÍA AEROESPACIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio y calculo por modelos informáticos y ensayos de las diferencias mecánicas entre piezas de poliamidas reforzadas con fibra de vidrio mecanizadas a partir de barras o placas y su equivalente en inyección. Aplicación a una pieza mecanizada y su posible optimización por los resultados del estudio para su posterior inyección.

Autor

POVEDA CISNEROS, Alejandro

Tutor

BUSQUETS MATAIX, David Jerónimo

24-07-2024

Resumen

Los nuevos plásticos pueden sustituir las piezas metálicas por piezas inyectadas como el Nylon con refuerzo de fibra de vidrio (30 %, 40 %). Las piezas se fabrican mediante moldeo por inyección, pero los moldes necesarios son muy caros debido a su construcción de acero y a sus complejos sistemas de refrigeración. Además, los cambios de forma son costosos si se producen errores de diseño.

El diseño de moldes es fundamental y está respaldado por programas de elementos finitos para calcular el comportamiento de las piezas, los límites de tensión y fractura, aunque no tienen en cuenta la orientación de las fibras.

Estos materiales están disponibles también en forma de productos semiacabados (barras, placas, tubos) que pueden mecanizarse para formar piezas, pero sus propiedades mecánicas difieren de las del moldeo por inyección. Este trabajo de fin de grado busca analizar la relación o factor de corrección entre piezas mecanizadas e inyectadas, proporcionando información adicional al análisis por elementos finitos. Se analizarán probetas de materiales inyectados y mecanizados y se aplicarán a una pieza real mecanizada.

Abstract

New plastics can replace metal parts with injection-molded parts, such as nylon reinforced with fiberglass (30 %, 40 %). These parts are manufactured using injection molding, but the necessary molds are very expensive due to their steel construction and complex cooling systems. Additionally, shape modifications are costly if design errors occur.

Mold design is crucial and is supported by finite element programs to calculate the behavior of the parts, stress limits, and fracture points, although these programs do not consider fiber orientation.

These materials are also available in semi-finished products (bars, plates, tubes) that can be machined into parts, but their mechanical properties differ from those of injection molding. This final degree project aims to analyze the relationship or correction factor between machined and injection-molded parts, providing additional information to the finite element analysis. Test specimens of injected and machined materials will be analyzed and applied to a real machined part.

Palabras clave (Keywords): Composites (Composites), mecanizado (machining), inyectado (injected), simulación numérica (numerical simulation)

Índice

1. Introducción	10
2. Poliamida reforzada con fibra de vidrio	11
3. Ensayos mecánicos de probetas extraídas de placas obtenidas por extrusión.	12
3.1. Ensayo de Tracción	14
3.2. Ensayo de Flexión	24
3.3. Ensayo de impacto	31
4. Ensayos mecánicos de probetas extraídas de piezas inyectadas.	35
4.1. Ensayo de Tracción	38
4.2. Ensayo de Flexión	41
4.3. Ensayo de impacto Charpy	45
5. Análisis mediante método de elementos finitos del comportamiento de la pieza destinada al sistema hidráulico o de transporte de combustible de un aeropuerto.	48
6. Prueba de presión experimental.	52
7. Presupuesto del proyecto	55
8. Conclusiones	57
A. Apéndice A: Gráficas y cálculos de ensayos de tracción	60
A.1. Probetas de la placa extruida	60
A.2. Probetas de la pieza inyectada	64
B. Imágenes de la superficie de rotura de las probetas de la placa ensayadas a tracción	67
C. Gráficas y cálculos de ensayos de tracción	69
C.1. Probetas de la placa extruida	69
C.2. Probetas de la pieza inyectada	75
D. Imágenes de la superficie de rotura de las probetas de la placa ensayadas a impacto	81
E. Imágenes de la superficie de rotura de las probetas de la pieza inyectada ensayadas a tracción	83

F. Imágenes de la superficie de rotura de las probetas de la pieza inyectada ensayadas a impacto	84
G. Resultados de ANSYS	86

Índice de figuras

1.	Placa de poliamida reforzada con fibra de vidrio extruida	12
2.	Definiciones Norma ISO 527-2	14
3.	Maquina de corte, sierra de cinta	15
4.	Tronzadora	15
5.	Maquina de pulir	16
6.	Probetas de ensayo de tracción de la placa extruida	16
7.	Máquina universal de ensayos	17
8.	Curva tensión-deformación en tracción	18
9.	Microscopio	22
10.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TLT3	23
11.	Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción TLT3	23
12.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TST1	23
13.	Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción TST1	24
14.	Maquina de ensayo de flexión	25
15.	Probetas para ensayos de flexión y/o impacto dirección transversal	26
16.	Probetas para ensayos de flexión y/o impacto dirección longitudinal	26
17.	Curva carga-deformación de flexión de la probeta en dirección longitudinal LT1	29
18.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de flexión ST3	30
19.	Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de flexión ST3	31
20.	Máquina de ensayos Charpy	31
21.	Imagen microscopio de probeta de dirección longitudinal de impacto	34
22.	Imagen microscopio de probeta de dirección transversal de impacto	35
23.	Pieza inyectada	37
24.	Guía de corte de la pieza inyectada	37
25.	Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción TB2	40
26.	Imagen microscopio x3 de la probeta de ensayo de tracción TB2	40
27.	Probetas de ensayos de flexión o impacto 1-5	41
28.	Probetas de ensayos de flexión o impacto 6-11	41
29.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de Flexión P3	44
30.	Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de Flexión P3	45
31.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de Impacto P8	46
32.	Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de Impacto P8	47
33.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de Impacto P10	47
34.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de Impacto P10	47

35.	Pieza de conexión para fabricar con poliamida con fibra de vidrio	48
36.	Pieza de conexión con brida de acero	49
37.	Malla de la pieza de conexión con brida de acero	49
38.	Resultados ANSYS. Tensión bajo una presión interna de 16 bares, propiedades de la pieza inyectada	50
39.	Resultados ANSYS. Tensión bajo una presión interna de 25 bares, propiedades de la pieza inyectada	50
40.	Resultados ANSYS. Tensión bajo una presión interna de 25 bares, con propiedades de pieza inyectada	51
41.	Resultados ANSYS. Tensión bajo una presión interna de 25 bares. con propiedades de pieza inyectada	51
42.	Imagen pieza completa para ensayo.	52
43.	Imagen pieza completa para ensayo.	52
44.	Montaje completo pieza para ensayo vista 1.	53
45.	Montaje completo pieza para ensayo vista 2.	53
46.	Banco de pruebas de presión	54
47.	Barómetro.	54
48.	Curva tensión-deformación probeta de tracción en dirección longitudinal 1	60
49.	Cálculos probeta de tracción en dirección longitudinal 1	60
50.	Curva tensión-deformación probeta de tracción en dirección longitudinal 2	61
51.	Cálculos probeta de tracción en dirección longitudinal 2	61
52.	Curva tensión-deformación probeta de tracción en dirección longitudinal 3	62
53.	Cálculos probeta de tracción en dirección longitudinal 3	62
54.	Curva tensión-deformación probeta de tracción en dirección transversal 2	63
55.	Cálculos probeta de tracción en dirección transversal 2	63
56.	Curva tensión-deformación probeta de tracción de la pieza inyectada 1	64
57.	Cálculos probeta de tracción de la pieza inyectada 1	64
58.	Curva tensión-deformación probeta de tracción de la pieza inyectada 2	65
59.	Cálculos probeta de tracción de la pieza inyectada 2	65
60.	Curva tensión-deformación probeta de tracción de la pieza inyectada 3	66
61.	Cálculos probeta de tracción de la pieza inyectada 3	66
62.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TLT1	67
63.	Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción TLT1	67
64.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TLT2	67
65.	Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción TLT2	68
66.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TST2	68

67.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TST2	68
68.	Curva carga-deformación probeta de flexión en dirección longitudinal LT1	69
69.	Cálculos probeta de flexión en dirección longitudinal LT1	69
70.	Curva carga-deformación probeta de flexión en dirección longitudinal LT2	70
71.	Cálculos probeta de flexión en dirección longitudinal LT2	70
72.	Curva carga-deformación probeta de flexión en dirección longitudinal LT3	71
73.	Cálculos probeta de flexión en dirección longitudinal LT3	71
74.	Curva carga-deformación probeta de flexión en dirección transversal ST1	72
75.	Cálculos probeta de flexión en dirección longitudinal ST1	72
76.	Curva carga-deformación probeta de flexión en dirección transversal ST3	73
77.	Cálculos probeta de flexión en dirección longitudinal ST3	73
78.	Curva carga-deformación probeta de flexión en dirección transversal ST4	74
79.	Cálculos probeta de flexión en dirección longitudinal ST4	74
80.	Curva carga-deformación probeta de flexión de la pieza inyectada 1	75
81.	Cálculos probeta de flexión de la pieza inyectada 1	75
82.	Curva carga-deformación probeta de flexión de la pieza inyectada 3	76
83.	Cálculos probeta de flexión de la pieza inyectada 3	76
84.	Curva carga-deformación probeta de flexión de la pieza inyectada 5	77
85.	Cálculos probeta de flexión de la pieza inyectada 5	77
86.	Curva carga-deformación probeta de flexión de la pieza inyectada 7	78
87.	Cálculos probeta de flexión de la pieza inyectada 7	78
88.	Curva carga-deformación probeta de flexión de la pieza inyectada 9	79
89.	Cálculos probeta de flexión de la pieza inyectada 9	79
90.	Curva carga-deformación probeta de flexión de la pieza inyectada 11	80
91.	Cálculos probeta de flexión de la pieza inyectada 11	80
92.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de impacto ILT1	81
93.	Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de impacto ILT1	81
94.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de impacto ILT2	81
95.	Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de impacto ILT2	82
96.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de impacto ILT3	82
97.	Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de impacto ILT3	82
98.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TB1	83
99.	Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción TB1	83
100.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TB3	83
101.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TB3	84
102.	Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción P2	84

103. Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción P2	84
104. Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción P4	85
105. Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción P4	85
106. Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción P6	85
107. Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción P6	86
108. Deformación bajo una presión interna de 16 bares para el material extruido	86
109. Deformación bajo una presión interna de 16 bares para el material inyectado	87
110. Resultados ANSYS. Tensión bajo una presión interna de 25 bares, propiedades de la pieza extruida	87

Índice de tablas

1.	Propiedades de la poliamida reforzada con un 30 % fibra de vidrio, extruida	14
2.	Datos de la Norma ISO 527-2	14
3.	Resultados de los ensayos de tracción de probetas en dirección longitudinal	19
4.	Resultados de los ensayos de tracción de probetas en dirección transversal	19
5.	Resultados de los cálculos de tracción de probetas en dirección longitudinal	19
6.	Resultados de la deformación en las probetas de dirección longitudinal	20
7.	Resultados de los cálculos de tracción de probetas en dirección transversal	20
8.	Resultados de la deformación en las probetas de dirección transversal	20
9.	Media y desviación típica de los resultados en las probetas de dirección longitudinal	21
10.	Media y desviación típica de los resultados en las probetas de dirección transversal .	21
11.	Alargamiento de las probetas de tracción	24
12.	Dato ISO 179-1	25
13.	Datos de las probetas de flexión de dirección longitudinal	27
14.	Datos de las probetas de flexión de dirección transversal	27
15.	Resultados del ensayo de flexión de probetas de dirección longitudinal.	27
16.	Resultados de los cálculos de flexión de probetas de dirección longitudinal.	28
17.	Resultados del ensayo de flexión de probetas de dirección transversal.	28
18.	Resultados de los cálculos de flexión de probetas de dirección transversal.	28
19.	Rigidez a flexión de probetas cortadas en dirección longitudinal	29
20.	Rigidez a flexión de probetas cortadas en dirección transversal	29
21.	Media y desviación típica de resultados en las probetas de dirección longitudinal . .	30
22.	Media y desviación típica de resultados en las probetas de dirección transversal . . .	30
23.	Datos UNE-EN ISO 179-2:2021	32
24.	Resultados de la prueba de impacto de las probetas de dirección longitudinal	32
25.	Resultados de la prueba de impacto de las probetas de dirección transversal	32
26.	Cálculos de la prueba de impacto de las probetas de dirección longitudinal	33
27.	Cálculos de la prueba de impacto de las probetas de dirección transversal	33
28.	Media y desviación típica, de las pruebas de impacto de las probetas de dirección longitudinal	33
29.	Media y desviación típica, de las pruebas de impacto de las probetas de dirección transversal	34
30.	Propiedades del material inyectado (Nylon 6 33 % de fibra de vidrio)	36
31.	Resultados de las probetas de tracción de la pieza inyectada	38
32.	Cálculos de las probetas de tracción de la pieza inyectada	38

33.	Resultados de la deformación en las probetas de la pieza inyectada	39
34.	Media y desviación típica de los ensayos de tracción realizados sobre la pieza inyectada	39
35.	Resultados del alargamiento en las probetas de la pieza inyectada	41
36.	Medidas de las probetas de flexión de la pieza inyectada	42
37.	Resultados del ensayo de flexión de la pieza inyectada	42
38.	Resultados de ensayos de flexión de la pieza inyectada.	43
39.	Rigidez a flexión de las probetas de la pieza inyectada	43
40.	Media y desviación típica de resultados de flexión de la pieza inyectada	44
41.	Resultados de la prueba de impacto de las probetas inyectadas	45
42.	Resultados de la prueba de impacto de las probetas de inyección	46
43.	Cálculos de la prueba de impacto de las probetas inyectadas	46
44.	Presupuesto de los ensayos realizados en el laboratorio.	55
45.	Presupuesto de la simulación mediante ANSYS.	56
46.	Presupuesto del ensayo de presión.	56
47.	Presupuesto de la redacción del informe.	57
48.	Resumen de los resultados de las propiedades de la placa extruida.	57
49.	Resumen de los resultados de las propiedades de la pieza inyectada.	58

1. Introducción

El principal objetivo de este estudio es investigar y analizar las posibles diferencias mecánicas entre piezas fabricadas en poliamida reforzada con fibra de vidrio, mecanizadas a partir de varillas o láminas, frente a piezas fabricadas mediante procesos de inyección. El análisis se lleva a cabo en el contexto de la fabricación de piezas específicas, como válvulas de agua y componentes del sistema de combustible, utilizando materiales alternativos al acero para reducir su peso total.

Se eligió como material de estudio la poliamida reforzada con fibra de vidrio debido a sus propiedades mecánicas, como resistencia y durabilidad, que la hacen adecuada para aplicaciones industriales exigentes. Sin embargo, el procesamiento de este material puede afectar significativamente a sus propiedades finales, especialmente en términos de resistencia estructural y comportamiento bajo carga.

Comparando piezas mecanizadas con aquellas producidas por moldeo por inyección, la intención es identificar posibles diferencias en aspectos clave como la resistencia a la tracción, la rigidez y la resistencia al impacto. Estos resultados son fundamentales para comprender cómo varía el rendimiento de las piezas fabricadas con diferentes métodos y cómo estas diferencias afectan su idoneidad para aplicaciones específicas en válvulas de agua y transporte de combustible.

El principal objetivo de esta investigación es contribuir al desarrollo de soluciones más eficientes y ligeras en la industria, optimizando los materiales y procesos de fabricación utilizados en la producción de componentes críticos de diversos sistemas. La reducción de peso en estas aplicaciones puede tener un impacto significativo en la eficiencia energética y el rendimiento general de los sistemas, lo que resulta en beneficios económicos y ambientales.

2. Poliamida reforzada con fibra de vidrio

La poliamida es un polímero cuya estructura molecular contiene enlaces amida ($-CONH-$). Estos enlaces representan la unión entre un grupo amino ($-NH_2$) y un grupo carboxilo ($-COOH$). Este tipo de polímero tiene propiedades importantes que lo hacen útil en una amplia gama de aplicaciones.

- **Resistencia mecánica:** La poliamida destaca por su resistencia mecánica, lo que la hace ideal para aplicaciones que requieren resistencia y durabilidad. Esta resistencia se debe a la rigidez y resistencia de los enlaces amida en su estructura. Además, la homogeneidad de la estructura asegura una distribución uniforme de las fuerzas, aumentando así su resistencia a las deformaciones y fracturas.
- **Resistencia a la fatiga:** Son resistentes al desgaste, lo que los hace aptos para su uso en textiles técnicos, cuerdas y otros elementos sujetos a fricción constante. La flexibilidad de las cadenas de polímero contribuye a una distribución uniforme de la fuerza aplicada, mejorando así la resistencia al desgaste.
- **Resistencia a la flexión:** Las poliamidas se pueden formar con diversos grados de flexibilidad, desde rígidas hasta flexibles, lo que amplía enormemente su gama de aplicaciones. La longitud de la cadena polimérica y la presencia de grupos amida afectan la flexibilidad del material. La estructura molecular flexible permite la deformación sin romperse.
- **Resistencia química:** Es un buen material en ambientes corrosivos. Esta resistencia a la corrosión se explica por la estabilidad del enlace amida.
- **Propiedades térmicas:** Las poliamidas tienen buenas propiedades térmicas y algunas variedades pueden soportar altas temperaturas sin deformaciones significativas. La presencia de enlaces amida asegura la estabilidad térmica del material.

Además de las características propias de la poliamida, también hay que tener en cuenta que el material a procesar está reforzado con fibras de vidrio.

Los refuerzos de fibra de vidrio en poliamidas se producen agregando uniformemente fibras de vidrio a la matriz polimérica en un proceso de mezcla o fundición. Esto asegura una distribución uniforme de las fibras por todo el material, maximizando su efecto de refuerzo.

El objetivo de la adición de fibra de vidrio es mejorar las propiedades mecánicas y térmicas de la poliamida. La fibra de vidrio aporta mayor estabilidad al material, aumentando su resistencia a tracción, flexión e impactos. Además, la fibra de vidrio es un buen aislante térmico y ayuda

a reducir la conductividad térmica del material compuesto, haciéndolo más resistente a las altas temperaturas.

3. Ensayos mecánicos de probetas extraídas de placas obtenidas por extrusión.

Esta y la siguiente sección detallarán las propiedades de la poliamida reforzada con fibra de vidrio extruida y del mismo material que se ha inyectado (que contiene 30% y 33% de fibra de vidrio, respectivamente). Se describirá el procedimiento seguido para cada prueba, así como los resultados obtenidos y su interpretación.

En el primer caso, el material es una poliamida con fibras de vidrio obtenidas en el proceso de extrusión. Este proceso produce una placa como se muestra en la Figura 1. Las propiedades del material se obtuvieron de las fichas técnicas proporcionadas por el fabricante, que recogían datos sobre su resistencia, rigidez, tenacidad y otras propiedades relevantes.



Figura 1: Placa de poliamida reforzada con fibra de vidrio extruida

Es interesante también explicar en qué consiste el proceso de extrusión para el caso de la poliamida reforzada con fibra de vidrio. En primer lugar, la extrusión es un método de fabricación utilizado para producir productos continuos con una forma específica, como láminas, tubos, perfiles y películas. Consiste en extruir el material a través de una salida con la forma deseada, dando como resultado un producto final de sección transversal continua y uniforme. En el caso del proceso de extrusión, se siguen los siguientes pasos:

1. **Preparación del material:** Las materias primas se seleccionan y preparan de manera adecuada para su introducción en la extrusora. Este material puede ser plástico, metal o cerámica. En este caso, se prepara una mezcla de poliamida y fibra de vidrio.
2. **Alimentación y fusión:** Cuando el material está listo, se introduce en el tanque de la extrusora. Dentro de la máquina, el material se introduce gradualmente a la zona de fusión y queda expuesto a altas temperaturas y presiones. El calor y la fricción creados por el tornillo o el pistón derriten el material y lo convierten en una sustancia viscosa o líquida.
3. **Extrusión:** La masa fundida se fuerza a pasar a través de una abertura en la placa llamada boquilla o matriz. Esta abertura tiene la forma deseada como producto final. A medida que el material emerge a través del orificio, se solidifica rápidamente después de enfriarse, tomando la forma de la boquilla y proporcionando una sección transversal continua y uniforme del producto.
4. **Enfriamiento y solidificación:** A medida que el material sale de la boquilla, se enfría rápidamente mediante un sistema de enfriamiento como aire o agua fría. Este proceso de enfriamiento endurece el material hasta su forma final y preserva su estructura.
5. **Corte y acabado:** Finalmente, se utiliza un mecanismo de corte para cortar el producto extruido a la longitud deseada. Dependiendo del uso final, el producto puede requerir procesos de acabado adicionales.

Las propiedades especificadas por el fabricante se registran y organizan en la Tabla 1 para facilitar la comparación con los resultados de las pruebas realizadas. Esta información puede utilizarse no sólo como referencia inicial, sino también como punto de partida básico para un análisis detallado. Comparando los datos del fabricante con los resultados experimentales, se pueden sacar conclusiones razonables y precisas sobre la idoneidad y el rendimiento de los materiales de prueba. Además, esta comparación nos permite identificar diferencias potenciales y comprender mejor cómo se comporta el material en diferentes condiciones, proporcionando así una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

Propiedad del material	Valor	Unidad
Resistencia a la tracción	98	MPa
Modulo de elasticidad (Tracción)	5700	MPa
Tensión de límite elástico	98	MPa
Elongación a rotura	5	%
Resistencia a flexión	140	MPa
Módulo de elasticidad (Flexión)	5200	MPa
Resistencia a impacto	60	kJ/m^2

Tabla 1: Propiedades de la poliamida reforzada con un 30% fibra de vidrio, extruida

3.1. Ensayo de Tracción

Para los ensayos de tracción se siguió la norma ISO 527-2. Esta norma establece una serie de medidas para las probetas y define los criterios para determinar las propiedades mecánicas de materiales plásticos y compuestos mediante pruebas de tracción uniaxiales.

Todos los parámetros precisos de medición y producción especificados en la norma **ISO 527-2** para la preparación de muestras se describen en la Figura 2 y la Tabla 2. La Figura 2 proporciona una representación visual de las dimensiones críticas de la muestra, mientras que la Tabla 2 proporciona una descripción detallada de medidas específicas como largo, ancho y espesor, y otros parámetros relevantes.

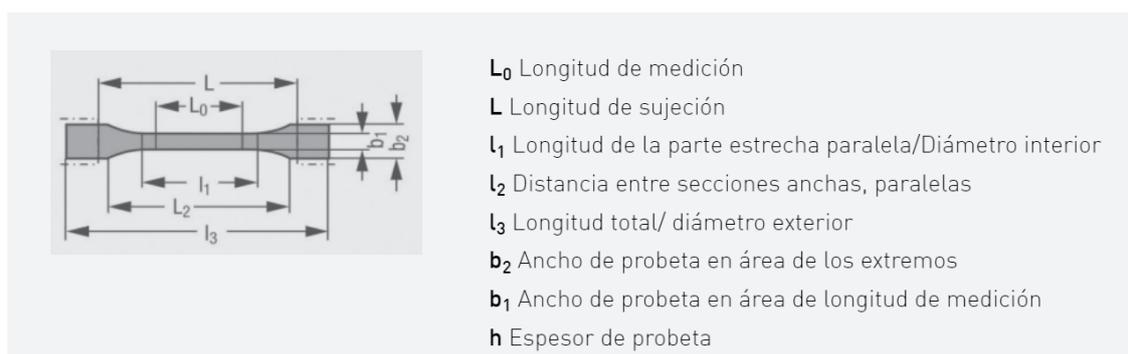


Figura 2: Definiciones Norma ISO 527-2

Norma	Probeta	l_3 [mm]	l_1 [mm]	b_2 [mm]	b_1 [mm]	h [mm]	L_0 [mm]	L [mm]
ISO 527-2	1B	≥ 150	60 ± 0.5	20 ± 0.2	10 ± 0.2	4 ± 0.2	50 ± 0.5	115 ± 1

Tabla 2: Datos de la Norma ISO 527-2

Se utilizan diversas máquinas de corte y acabado para obtener las muestras necesarias para los ensayos de tracción. Primero, una sierra de cinta como la que se muestra en Figura 3 se utiliza para hacer cortes grandes que no requieren demasiada precisión, solo para separar en partes la placa de la Figura 1.



Figura 3: Máquina de corte, sierra de cinta

Una vez realizados los cortes sin precisión, se llevaron a cabo cortes de mayor precisión que permitieron obtener probetas con las medidas cercanas a las buscadas. Se utiliza una máquina de corte (Tronzadora) como la mostrada en la Figura 4 para realizar estos cortes.



Figura 4: Tronzadora

Una vez completado el corte, se eliminó toda la irregularidad superficial de la muestra mediante un proceso de limado y acabado utilizando una máquina pulidora como la que se muestra en la Figura 5.



Figura 5: Máquina de pulir

Finalmente, tras realizar tanto el cortado como el pulido de las probetas extraídas de la placa presente en la Figura 1, se obtienen las muestras mostradas en la Figura 6. Estas serán empleadas en la prueba de tracción.



Figura 6: Probetas de ensayo de tracción de la placa extruida

Una vez obtenida la muestra para el ensayo de tracción se procede a realizar la prueba de tracción. Esta es una evaluación mecánica que determina diversas propiedades del material, como la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad, el límite elástico y el alargamiento en el punto de rotura. Se han cortado probetas en la dirección longitudinal y transversal de la placa, para ver las diferencias que puedan presentar.

Las pruebas se realizaron utilizando un banco de pruebas similar al que se muestra en la Figura 7. El objetivo es deformar la muestra, aplicar más fuerza o carga a la máquina aumentará el alargamiento de la pieza.

El procedimiento utilizado para ello consiste en fijar los extremos de la muestra sobre un cabezal móvil y un cabezal fijo como se muestra en la Figura 7. Es importante evitar que las mordazas se deslicen y asegurarse de que no provoquen la rotura de las abrazaderas, si se produce una rotura debe ser en la parte calibrada de la muestra.



Figura 7: Máquina universal de ensayos

A partir de la longitud inicial de la muestra, se puede determinar un parámetro llamado deformación (Ecuación 1). Por otro lado, el valor de la sección inicial de la muestra permite determinar la tensión que soporta la muestra en cada momento (Ecuación 2). Ambos parámetros permiten la construcción de curvas tensión-deformación como se muestra en la Figura 8.

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

En esta curva se pueden distinguir dos regiones: la región elástica y la región plástica. La zona elástica es el lugar donde la deformación es pequeña y el material es capaz de volver a sus dimensiones originales. En esta sección, la curva sigue una ley lineal llamada ley de Hooke (Ecuación 3), donde E es la elasticidad o módulo de Young. Por otro lado, como se muestra en la Figura 8, la deformación en la zona plástica ya no es reversible y las leyes lineales ya no se cumplen.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3)$$

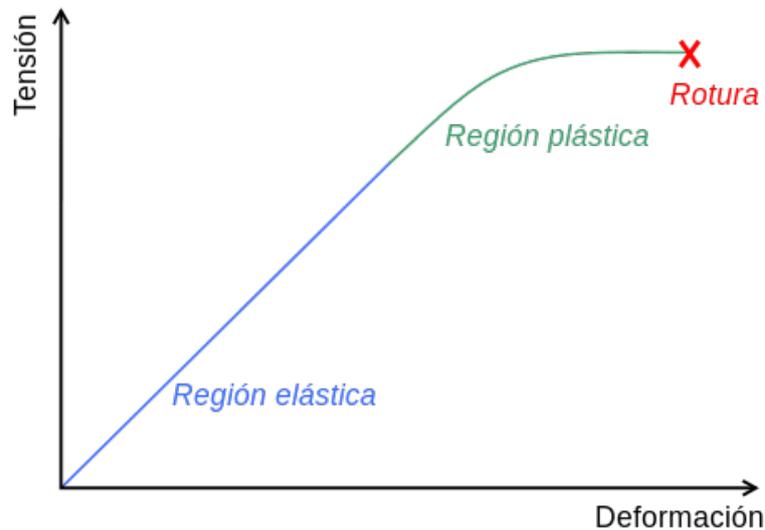


Figura 8: Curva tensión-deformación en tracción

A partir de la gráfica, es posible determinar los valores de las propiedades mencionadas anteriormente. Por un lado, podemos obtener información sobre la resistencia a la tracción, que es la carga máxima que puede soportar un material antes de romperse. Por otro lado, podemos calcular el límite elástico, que indica el punto en el que el material sale de la región elástica y entra en la región plástica.

Según los datos de la Tabla 1 no se ha observado deformación en la región plástica, ya que los parámetros antes mencionados muestran un valor de 98MPa . Dependiendo de los resultados de la prueba, la información puede confirmarse o negarse.

Además de esta figura y estos resultados, el valor del módulo de elasticidad también se puede obtener a partir de la ecuación 4 y la curva tensión-deformación de la zona elástica. También es posible determinar el valor de alargamiento en la rotura, que es la cantidad de alargamiento a la que se ha sometido la muestra tras romperse.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (4)$$

Durante las pruebas se obtuvo una curva tensión-deformación y varios datos importantes. Toda esta información, así como los datos relacionados con el tamaño de la muestra, se resumen en las tablas 3 y 4. Es importante destacar que durante las pruebas la distancia entre las mordazas fue de 80 mm .

Todos los cálculos realizados en *Excel* y las correspondientes curvas tensión-deformación para varias muestras de ensayo de tracción se muestran en el Apéndice A.

Muestra	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Carga máxima (kN)	Carga elástica (kN)
TLT1	10,66	4,85	3,076	1,435
TLT2	10,73	4,15	2,643	1,247
TLT3	10,74	4,13	2,709	1,327

Tabla 3: Resultados de los ensayos de tracción de probetas en dirección longitudinal

Muestra	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Carga máxima (kN)	Carga elástica (kN)
TST1	10,73	4,2	2,173	1,094
TST2	10,7	4,1	2,043	1,050

Tabla 4: Resultados de los ensayos de tracción de probetas en dirección transversal

Las Tablas 3 y 4 muestran los resultados obtenidos en el equipo de prueba utilizado en estos experimentos (Figura 7). Con estos resultados, se pueden determinar las propiedades que se desean verificar mediante los ensayos. Por lo tanto, los valores de tensión de rotura y límite elástico se pueden determinar utilizando la Ecuación 2. Considerando que la sección transversal de las muestras es rectangular, estos resultados se presentan en la Tabla 5.

Muestra	Sección (mm^2)	Tensión de rotura (MPa)	Límite elástico (MPa)
TLT1	51,701	59,492	27,763
TLT2	44,529	59,352	28,010
TLT3	44,356	61,067	29,922

Tabla 5: Resultados de los cálculos de tracción de probetas en dirección longitudinal

A su vez, también es posible determinar el valor de la deformación unitaria en los ensayos realizados, lo cual nos permite además verificar la propiedad de elongación a rotura de la Tabla 1. Para realizar este cálculo, es necesario emplear la Ecuación 1. Es importante tener en cuenta que la distancia entre las mordazas es de 80 mm.

Por otro lado, resulta interesante calcular el valor del módulo de elasticidad. El diagrama tensión-deformación resultante y las ecuaciones 1, 2 y 4 se utilizan para realizar este cálculo. En el apéndice A se incluyen gráficos y cálculos en Excel para varios ejemplos. Todos estos resultados se muestran en la Tabla 6.

Muestra	Long. Inicial (<i>mm</i>)	Long. Final (mm)	Def. unitaria	Módulo elástico (MPa)
TLT1	80	85,8	0,0725	2500
TLT2	80	86,2	0,0775	2564,102
TLT3	80	83,6	0,045	2575,758

Tabla 6: Resultados de la deformación en las probetas de dirección longitudinal

Los resultados de las probetas longitudinales se muestran en la tabla anterior. Las siguientes Tablas 7 y 8 muestran los resultados de las muestras de corte transversal.

Muestra	Sección (mm^2)	Tensión de rotura (MPa)	Tensión de límite elástico (MPa)
TST1	45,066	48,216	24,270
TST2	43,870	46,575	23,936

Tabla 7: Resultados de los cálculos de tracción de probetas en dirección transversal

Muestra	Long. Inicial (<i>mm</i>)	Long. Final (mm)	Def. unitaria	Módulo elástico (MPa)
TST1	80	83,04	0,038	2000
TST2	80	83,41	0,042625	2250

Tabla 8: Resultados de la deformación en las probetas de dirección transversal

Una vez identificados los diferentes resultados de las pruebas, es interesante realizar un análisis comparativo con los valores declarados por el fabricante. Para ello se utilizan dos parámetros estadísticos: valor medio y desviación estándar.

Por un lado, la media es una medida de tendencia central y representa el valor promedio del conjunto de datos. Se calcula sumando todos los valores del conjunto y dividiendo por el número total de valores.

Por otro lado, la desviación estándar mide la dispersión de un conjunto de datos en relación con su media. Indica cuánto difiere un valor individual de la media. Una desviación estándar alta indica que los datos están ampliamente dispersos, mientras que una desviación estándar baja indica que los datos están más concentrados alrededor de la media.

De esta forma, estos resultados se dividen en 2 tablas. La Tabla 9 muestran los 2 parámetros para las muestras cortadas longitudinalmente, mientras que en la Tabla 10 estos resultados se observan para las muestras en dirección transversal.

Muestra	Tensión de rotura (MPa)	Tensión elástica (MPa)	Módulo elástico (MPa)
TLT1	59,491	27,763	2500
TLT2	59,352	28,010	2564,103
TLT3	61,067	29,922	2575,758
Media	59,970	28,565	2546,620
Desv. típica	0,952	1,182	40,793

Tabla 9: Media y desviación típica de los resultados en las probetas de dirección longitudinal

Muestra	Tensión de rotura (MPa)	Tensión elástica (MPa)	Módulo elástico (MPa)
TST1	48,216	24,270	2250
TST2	46,575	23,936	2000
Media	47,395	24,103	2125
Desv. típica	1,160	0,236	176,777

Tabla 10: Media y desviación típica de los resultados en las probetas de dirección transversal

Considerando los resultados resumidos en las tablas anteriores, es importante resaltar que los valores obtenidos de las muestras de placa son inferiores a los valores indicados por el fabricante. Esto se debe a que las pruebas del fabricante se realizan en condiciones ideales, mientras que nuestras pruebas no se realizan en condiciones óptimas, lo que puede afectar seriamente los resultados.

Además, durante los ensayos se observó cierta deformación plástica, lo que indicó que el límite elástico y la carga máxima no son iguales, a diferencia de los datos indicados por el fabricante. Esta deformación plástica se puede determinar observando el aumento en la longitud final de la muestra con respecto a la distancia inicial entre las mordazas.

Como se trata de una prueba destructiva, la muestra se rompe. Es interesante observar qué tipo de fractura se produce en la pieza, si es dúctil o frágil. En este caso, se presupone una fractura frágil según la información de la Tabla 1.

Una rotura frágil se caracteriza por una fractura que ocurre sin una deformación plástica significativa antes de la falla. Entre algunas de sus principales características se pueden observar superficies de fractura planas y lisas, en ocasiones con patrón granular. Además, se caracteriza por la baja energía absorbida antes de la fractura. Este tipo de fractura es común en materiales que han estado expuestos a bajas temperaturas o materiales que presentan imperfecciones o defectos internos.

La rotura dúctil, por otro lado, generalmente implica una deformación plástica significativa antes de que falle el material. Estos materiales tienden a estirarse antes de romperse. Se caracterizan por tener una superficie rugosa e irregular, normalmente en forma de fibras. Además, absorben una gran cantidad de energía antes de romperse y se rompen lentamente, lo que permite predecir el fallo observando su deformación previa. Este tipo de fractura es común en materiales que operan a altas temperaturas.

Por ser poliamida reforzada con fibra de vidrio, existe otro tipo de fractura llamada desprendimiento de fibras. Este fenómeno se caracteriza por la separación de las fibras de vidrio de la matriz de poliamida. Como resultado, la superficie de la fibra queda expuesta mientras que la matriz que rodea la fibra permanece relativamente intacta.

Para poder verificarlo se han utilizado los microscopios que de los que se disponía en el laboratorio, siendo estos los presentes en la Figura 9.



Figura 9: Microscopio

De esta manera, a partir de las fotos presentes en las Figuras 10 y 11, es posible afirmar que debido a la superficie rugosa y desigual que presentan, parece que la rotura producida es dúctil. El resto de imágenes de las probetas extraídas de la placa ensayadas a tracción se recogen en el Apéndice A.



Figura 10: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TLT3

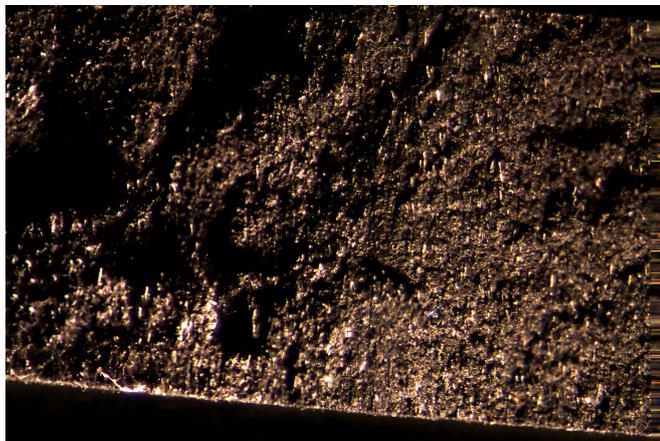


Figura 11: Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción TLT3

Ya que la probeta representada en las Figuras 10 y 11 corresponden a una probeta cortada en dirección longitudinal. Resulta interesante también analizar la superficie de rotura de una de las probetas cortadas en dirección transversal, para así, compararlas y analizar las posibles diferencias entre ambas, de esta manera en las Figuras 12 y 13 se ven las imágenes de la probeta transversal.

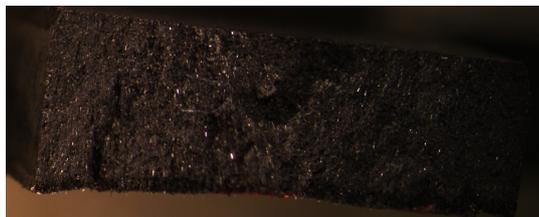


Figura 12: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TST1

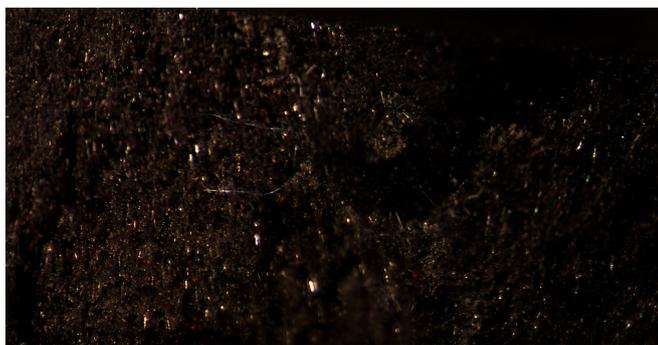


Figura 13: Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción TST1

A la vista de las Figuras 12 y 13, al igual que para las probetas de dirección transversal, la rotura que se aprecia es dúctil, a causa de la irregularidad y rugosidad de la superficie.

Todas las imágenes anteriores indican que el tipo de rotura que presentan las muestras a tracción es dúctil. Para corroborar esto, es interesante valorar el porcentaje de alargamiento de las probetas. Con la información de la Tabla 11, es posible ver que el porcentaje de alargamiento es pequeño, por lo que se puede decir que presentan rotura dúctil, aunque se trata de una ductilidad de bajo grado.

Muestra	Long. Inicial (mm)	Long. Final (mm)	% de alargamiento
TLT1	80	85,8	7,25
TLT2	80	86,2	7,75
TLT3	80	83,6	4,5
TST1	80	83,04	3,8
TST2	80	83,41	4,26

Tabla 11: Alargamiento de las probetas de tracción

3.2. Ensayo de Flexión

La prueba de flexión es un método ampliamente utilizado para evaluar la respuesta de los materiales a cargas de flexión. Este proceso proporciona información valiosa sobre la resistencia a la flexión y el módulo de flexión del material, que son aspectos importantes en muchas aplicaciones industriales. Para realizar esta prueba, se utiliza una máquina de prueba especialmente diseñada para aplicar una carga controlada a la probeta como se muestra en la Figura 14. Estas máquinas, a menudo denominadas máquinas de ensayo universales, pueden someter muestras a diversas condiciones de carga y registrar con precisión la respuesta mecánica del material.

Como se muestra en la Figura 14, el ensayo consiste en aplicar una fuerza vertical a una probeta ubicada en 2 puntos separados por una cierta distancia. Una vez realizado el ensayo, ha sido necesario utilizar una serie de fórmulas.



Figura 14: Maquina de ensayo de flexión

La Ecuación 5 se utiliza para obtener valores de tensión de flexión. En esta ecuación, el momento flector máximo (M) viene dado por la Ecuación 6, donde F representa la fuerza que actúa sobre el centro de la muestra y L es la distancia entre los puntos de apoyo. Además, c en la Ecuación 5 representa la distancia a la línea neutra más externa donde se aplica el esfuerzo de flexión, e I representa el momento de inercia de la sección transversal de la muestra.

$$\sigma_M = \frac{M * c}{I} \quad (5)$$

$$M = \frac{F * L}{4} \quad (6)$$

Para estos ensayos se utilizan muestras que cumplen con las dimensiones dadas en la Tabla 12 según la norma **UNE-EN ISO 179-2:2021**. Durante la realización de estos ensayos se intentó no alejarse mucho de las medidas establecidas en dicha tabla.

Norma	L1 [mm]	b1 [mm]	h [mm]	h1 [mm]	r [mm]	L [mm]
ISO 179-2	80	10	4	1	1	40

Tabla 12: Dato ISO 179-1

Para la obtención de estas probetas para el ensayo de flexión, es necesario nuevamente el uso de herramientas de corte. Para ello, se emplea nuevamente la sierra de cinta (Figura 3) y la tronzadora (Figura 4).

Una vez cortada la muestra, se pule para eliminar defectos en los bordes. Dicho proceso de acabado de las probetas se llevó a cabo con la máquina mostrada en la Figura 5. Este proceso dio como resultado los ejemplos que se muestran en las Figuras 15 y 16. Cabe mencionar que la muestra de la Figura 15 fue cortada en la dirección transversal de la placa, mientras que la muestra de la Figura 16 fue cortada en la dirección longitudinal de la placa. Esto permitirá realizar pruebas con diferentes orientaciones de fibras para ver si este es un factor importante en este caso.



Figura 15: Probetas para ensayos de flexión y/o impacto dirección transversal



Figura 16: Probetas para ensayos de flexión y/o impacto dirección longitudinal

Una vez se tienen las probetas y empleando la máquina de ensayos anteriormente mencionada (Figura 14) se puede proceder a realizar los ensayos. En el caso de la flexión, se han ensayado 3 probetas de dirección transversal y 3 probetas de dirección longitudinal cuyas medidas más importantes quedan recogidas en las Tablas 13 y 14. Los parámetros recogidos en estas tablas serán muy útiles para el cálculo de la sección y del momento de inercia de la misma, necesario para realizar los cálculos de la Ecuación 5.

Por otro lado, resulta importante mencionar 2 factores clave en el ensayo como son la distancia entre apoyos que en este caso fue de 46 *mm* y la velocidad del ensayo ha sido de 0,1 *mm/s*.

Muestra	Ancho	Espesor
LT1	10.65	4.47
LT2	10.61	4.27
LT3	10.66	3.96

Tabla 13: Datos de las probetas de flexión de dirección longitudinal

Muestra	Ancho	Espesor
ST1	10.65	4.19
ST2	10.7	4.1
ST3	10.71	4.09

Tabla 14: Datos de las probetas de flexión de dirección transversal

A partir de la prueba, se puede determinar la fuerza que actúa sobre la muestra en cada momento del ensayo. En este trabajo nos centramos en comprobar el valor máximo de tensión que puede soportar el material, lo que permite comprobar la información de la Tabla 1. La información que aporta el ensayo para las probetas cortadas en dirección longitudinal es la que se ve en la Tabla 15.

Muestra	c (mm)	Dist. entre apoyos (mm)	F de rotura (kN)	F lím. elástico (kN)
LT1	2,235	46	$3,924 * 10^{-1}$	$1,652 * 10^{-1}$
LT2	2,135	46	$3,428 * 10^{-1}$	$1,533 * 10^{-1}$
LT3	1,98	46	$2,835 * 10^{-1}$	$1,287 * 10^{-1}$

Tabla 15: Resultados del ensayo de flexión de probetas de dirección longitudinal.

Para el cálculo del momento de inercia, sabiendo que se trata de una sección rectangular, se debe emplear la Ecuación 7. Una vez calculado el valor de dicho momento de inercia, es posible calcular a partir de las Ecuaciones 5 y 6, el valor de la tensión de rotura y de límite elástico a flexión. Estos resultados se presentan en la Tabla 16.

$$I = \frac{1}{12} * b1 * h^3 \quad (7)$$

Muestra	Momento de Inercia	Tensión de rotura (MPa)	Tensión de lím. elástico (MPa)
LT1	$7,927 * 10^{-11}$	127,245	53,552
LT2	$6,883 * 10^{-11}$	122,274	54,706
LT3	$5,516 * 10^{-11}$	117,022	53,106

Tabla 16: Resultados de los cálculos de flexión de probetas de dirección longitudinal.

Al igual que en las probetas de dirección longitudinal, los mismos datos y cálculos se realizan para las probetas en dirección transversal que se pueden ver en las Tablas 17 y 18.

Muestra	c (mm)	Dist. entre apoyos (mm)	F de rotura (kN)	F lím. elástico (kN)
ST1	2,095	46	$2,850 * 10^{-1}$	$1,170 * 10^{-1}$
ST2	2,05	46	$3,092 * 10^{-1}$	$1,417 * 10^{-1}$
ST3	2,045	46	$2,941 * 10^{-1}$	$1,337 * 10^{-1}$

Tabla 17: Resultados del ensayo de flexión de probetas de dirección transversal.

Muestra	Momento de Inercia	Tensión de rotura (MPa)	Tensión de lím. elástico (MPa)
ST1	$6,528 * 10^{-11}$	105,174	43,187
ST2	$6,145 * 10^{-11}$	118,620	54,367
ST3	$6,106 * 10^{-11}$	113,269	51,506

Tabla 18: Resultados de los cálculos de flexión de probetas de dirección transversal.

También es interesante analizar y comparar el módulo elástico a flexión de láminas extruidas y piezas inyectadas. Para ello, a partir de la información sobre el desarrollo de carga y deformación durante el ensayo, se obtiene una curva carga-deformación y se puede determinar la pendiente de la parte lineal de dicha curva.

Un ejemplo de esta curva es la que se puede ver en la Figura 17. De esta se puede obtener con la ayuda de la Ecuación 8, correspondiente a la flecha máxima de una viga biapoyada, es posible despejar y obtener el módulo elástico. Los diferentes valores de módulo elástico se han plasmado en las Tablas 19 y 20.

$$\delta = \frac{F * L^3}{48 * E * I} \quad (8)$$



Figura 17: Curva carga-deformación de flexión de la probeta en dirección longitudinal LT1

Muestra	Pendiente (N/m)	Módulo elástico (MPa)
LT1	120000	3069,888
LT2	100000	2945,876
LT3	83333,333	3063,300

Tabla 19: Rigidez a flexión de probetas cortadas en dirección longitudinal

Muestra	Pendiente (N/m)	Módulo elástico (MPa)
ST1	85714,286	2662,411
ST2	93333,333	3079,746
ST3	78947,368	2621,753

Tabla 20: Rigidez a flexión de probetas cortadas en dirección transversal

Al igual que para el ensayo de tracción, a partir de los resultados obtenidos se establece un valor medio y una desviación típica para los diferentes parámetros para las probetas de dirección longitudinal y transversal (Tablas 21 y 22). En el caso de la tensión de rotura y el límite elástico, se podrán comparar con los datos del fabricante. Mientras tanto, el módulo elástico, al no emplear un extensómetro de precisión, se usará para compararla con los resultados obtenidos en la pieza inyectada.

A la vista de los resultados, presentes en las Tablas 21 y 22, es posible ver como el valor de la tensión a rotura es algo inferior a la aportada por el fabricante (Tabla 1). Esto puede deberse al igual que se ha comentado para tracción a que las condiciones de ensayo no son ideales como si pudieron ser para el fabricante. Además de esto el valor del módulo elástico a flexión también difiere, lo cual puede atribuirse a la ausencia de un extensómetro de precisión en nuestros ensayos.

Muestra	Tensión de rotura (MPa)	Tensión elástica (MPa)	Módulo elástico (MPa)
LT1	127,245	53,552	3069,888
LT2	122,274	54,706	2945,876
LT3	117,022	53,106	3063,300
Media	122,181	53,788	3026,354
Desv. típica	5,112	0,826	69,774

Tabla 21: Media y desviación típica de resultados en las probetas de dirección longitudinal

Muestra	Tensión de rotura (MPa)	Tensión elástica (MPa)	Módulo elástico (MPa)
ST1	105,174	43,187	2662,411
ST2	118,621	54,367	3079,746
ST3	113,269	51,506	2621,753
Media	112,354	49,686	2787,970
Desv. típica	6,770	5,808	253,502

Tabla 22: Media y desviación típica de resultados en las probetas de dirección transversal

Una vez realizados los ensayos, algunas probetas llegaron a romper. En estos casos, al igual que con las probetas de tracción, se ha analizado la superficie de rotura de las muestras. En las Figuras 18 y 19 se pueden observar la superficie de la probeta ST3. De nuevo a la vista de estas figuras, es posible afirmar que el tipo de rotura corresponde a una rotura dúctil.

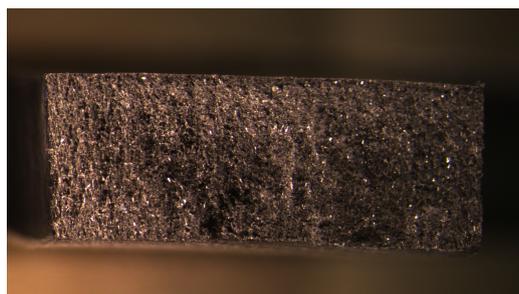


Figura 18: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de flexión ST3

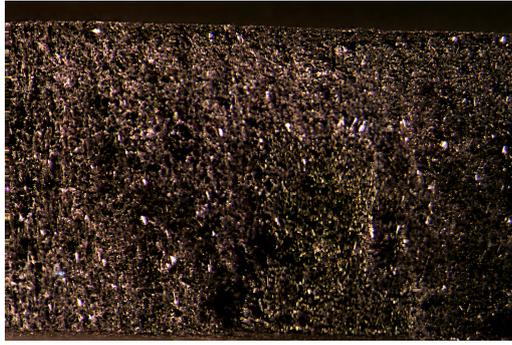


Figura 19: Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de flexión ST3

3.3. Ensayo de impacto

La prueba Charpy es una de las pruebas de impacto más comunes utilizadas para evaluar la tenacidad de los materiales. Se utiliza para determinar la capacidad de un material para resistir la fractura bajo una carga de impacto repentino. Esta prueba requiere una máquina de prueba llamada máquina Charpy similar a la que se muestra en la Figura 20.

Los ensayos de impacto se realizarán según lo definido en **UNE-EN ISO 179-2:2021**, por lo que las probetas serán similares a los ensayos de flexión. Esta norma describe cómo se aplica el método Charpy a los materiales plásticos, incluidos los materiales plásticos a los que se puede aplicar el método. Los métodos se pueden definir en función de la información proporcionada en la norma.



Figura 20: Máquina de ensayos Charpy

La muestra en forma de barra, cuyas medidas se detallan en la Tabla 23, se apoya en sus extremos como una barra transversal horizontal, se golpea verticalmente en el punto medio entre los soportes y se dobla a una velocidad alta y constante. Durante el impacto, la fuerza del mismo se registra en función del tiempo y de la desviación. A partir de los ensayos, es posible obtener el valor de energía absorbida durante el impacto.

Norma	L1 [mm]	b1 [mm]	h [mm]	h1 [mm]	r [mm]	L [mm]
ISO 179-2	80	10	4	1	1	40

Tabla 23: Datos **UNE-EN ISO 179-2:2021**

En la Tabla 23, L1 es la longitud de la probeta, b1 es el ancho, h es el espesor, h1 es la profundidad del entalle, r es el radio del entalle y L es la distancia entre los soportes. A la hora de realizar los ensayos se ha procurado cumplir en la medida de lo posible con las medidas de la Tabla 23. Una vez realizados los ensayos, los resultados se han recogido en las Tablas 24 y 25, correspondientes a las probetas cortadas en dirección longitudinal y transversal respectivamente.

Muestra	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Energía [$Nm = J$]
ILTP1	10,69	3,99	2,15
ILTP2	10,75	4,14	2,55
ILTP3	10,68	4,21	2,25
ILTP4	10,67	4,22	2,35

Tabla 24: Resultados de la prueba de impacto de las probetas de dirección longitudinal

Muestra	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Energía [$Nm = J$]
ILSP1	10,71	4,18	5,35
ILSP2	10,72	4,08	5,1
ILSP3	10,7	4,09	4,9

Tabla 25: Resultados de la prueba de impacto de las probetas de dirección transversal

Con base en estos resultados y conociendo las dimensiones de la muestra, es posible correlacionar las unidades de resistencia al impacto (kJ/m^2) en la Tabla 1. Para ello se realizaron cálculos utilizando la herramienta *Excel*, lo que permitió una transformación precisa y una mejor interpretación de los datos obtenidos. Estos cálculos arrojan los resultados descritos en las Tablas 26 y 27. Este método proporciona resultados claros y consistentes que facilitan el análisis y la comprensión de la resistencia al impacto de la muestra.

Muestra	Energía [kJ]	Sección [m ²]	Energía/Superficie [kJ/m ²]
ILTP1	$2,15 * 10^{-3}$	$4,265 * 10^{-5}$	50,407
ILTP2	$2,55 * 10^{-3}$	$4,451 * 10^{-5}$	57,297
ILTP3	$2,25 * 10^{-3}$	$4,496 * 10^{-5}$	50,041
ILTP4	$2,35 * 10^{-3}$	$4,503 * 10^{-5}$	52,190

Tabla 26: Cálculos de la prueba de impacto de las probetas de dirección longitudinal

Muestra	Energía [kJ]	Sección [m ²]	Energía/Superficie [kJ/m ²]
ILSP1	$5,35 * 10^{-3}$	$4,477 * 10^{-5}$	119,505
ILSP2	$5,1 * 10^{-3}$	$4,374 * 10^{-5}$	116,604
ILSP3	$4,9 * 10^{-3}$	$4,376 * 10^{-5}$	111,967

Tabla 27: Cálculos de la prueba de impacto de las probetas de dirección transversal

Al igual que en los casos anteriores se ha realizado la media y la desviación típica de los resultados obtenidos para así poder compararlos con la información de la Tabla 1. Así, estos resultados están presentes en las Tablas 28 y 29.

Muestra	Energía/Superficie [kJ/m ²]
ILTP1	50,407
ILTP2	57,297
ILTP3	50,041
ILTP4	52,190
Media	52,484
Desv. típica	3,343

Tabla 28: Media y desviación típica, de las pruebas de impacto de las probetas de dirección longitudinal

Muestra	Energía/Superficie [kJ/m^2]
ISTP1	119,505
ISTP2	116,604
ISTP3	111,967
Media	116,026
Desv. típica	3,803

Tabla 29: Media y desviación típica, de las pruebas de impacto de las probetas de dirección transversal

Viendo los resultados, es posible ver como las probetas que se cortaron en la dirección longitudinal de la placa tienen un valor de energía absorbida similar a la información del fabricante (Tabla 1), mientras que las cortadas en dirección transversal presenta un valor cercano al doble de la energía que el fabricante dice que es capaz de absorber. Para poder justificar esto, es interesante observar las Figuras 21 y 22, en estas se aprecia como la probeta de dirección longitudinal (21) no hay acumulación de fibras perpendiculares a a dirección del impacto, mientras que, en la probeta de dirección transversal (22), se aprecia presencia de fibras en dirección perpendicular a la del impacto. El hecho de que el impacto encuentre fibras en dirección perpendicular al mismo hace que la energía absorbida sea significativamente superior.

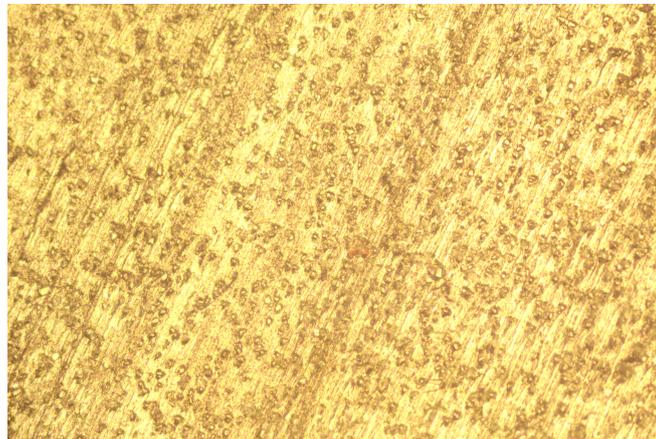


Figura 21: Imagen microscopio de probeta de dirección longitudinal de impacto

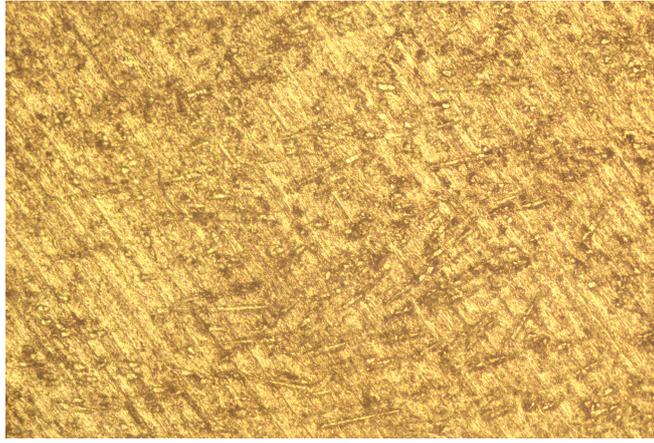


Figura 22: Imagen microscopio de probeta de dirección transversal de impacto

4. Ensayos mecánicos de probetas extraídas de piezas inyectadas.

Además de las pruebas sobre materiales obtenidos de la placa extruida, también se han realizado pruebas detalladas de poliamida reforzada con fibra de vidrio en probetas extraídas de piezas obtenidas mediante inyección en moldes. Esta medida se tomó para proporcionar una comparación de los dos materiales para determinar si las propiedades del material inyectado eran superiores a las del material extruido en términos de calidad y rendimiento. Este proceso de evaluación nos permitirá determinar posteriormente una comparativa exacta entre la muestra elaborada a partir del material extruido y el material de inyección, sentando así las bases para el diseño y fabricación de los moldes de producción por inyección, pudiendo realizar estudios previos de piezas mecanizadas.

El objetivo principal de estas pruebas es garantizar que el material inyectado tenga mejores propiedades que el material extruido. Al identificar las diferencias y ventajas de estos materiales de moldeo por inyección sobre el extruido, puede garantizar una transición eficiente y efectiva a la producción en masa mediante el proceso de moldeo por inyección.

Como en el caso anterior, el fabricante proporciona diferentes propiedades del material, las cuales se detallan en la Tabla 30. En primer lugar, resulta importante explicar en que consiste el proceso de inyección de poliamidas en un molde. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. **Preparación de material:** Se suministra una mezcla en forma de gránulos de poliamida, conocida también como nylon, y un cierto porcentaje de fibra de vidrio.
2. **Alimentación del material:** Estos gránulos de poliamida, son introducidos en una tolva que está conectada a la máquina de inyección.

3. **Fusión y transporte de material:** El material se transporta por un husillo situado en el interior de un cilindro a alta temperatura. Con el giro del husillo, los gránulos de material se van fundiendo.
4. **Inyección en el molde:** Con el material fundido, mediante el uso del husillo se empuja el material, este material se introduce en un molde de acero con la forma deseada.
5. **Enfriamiento y solidificación:** Una vez introducido el material, se deja enfriar en el molde, a través de unos canales de enfriamiento que contiene el propio molde.
6. **Apertura del molde y extracción de la pieza:** Mediante un sistema de pasadores en el molde, se extrae la pieza, y en caso de ser necesario, se lleva a cabo un proceso de acabado.
7. **Acabado y ensamble:** En caso de ser necesario, las piezas pueden requerir procesos adicionales como desbarbado, mecanizado o ensamblaje.

Propiedad del material	Valor	Unidad
Resistencia a la tracción	170	MPa
Módulo de elasticidad (Tracción)	10000	MPa
Elongación a rotura	2	%
Resistencia a flexión	200	MPa
Módulo de elasticidad (Flexión)	5000	MPa

Tabla 30: Propiedades del material inyectado (Nylon 6 33% de fibra de vidrio)

Los procedimientos seguidos para corroborar las propiedades de la Tabla 30, son los mismos que en la Sección 3. Se llevan a cabo ensayos de tracción, flexión e impacto Charpy. La combinación de estos ensayos permite proporcionar información de las propiedades mecánicas del material.

En este caso, la pieza de partida, es una pieza inyectada de poliamida (Nylon 6) con un 33% de fibra de vidrio. La pieza es la presente en la Figura 23. De esta pieza se han extraído probetas de diferentes dimensiones que permiten realizar los ensayos anteriormente mencionados.



Figura 23: Pieza inyectada

Para poder extraer las probetas, en primer lugar se cortó el círculo inferior y se seccionó para dejarlo más o menos como un cuadrado. A partir de este, se cortaron diferentes probetas en diversas direcciones, para así obtener probetas con distintas orientaciones de fibra (Figura 24).

A diferencia de la pieza extruida, en la que las fibras estaban todas orientadas preferentemente en una dirección, en el caso de la pieza inyectada, la fibra está orientada en varias direcciones. Es por esto que resulta interesante cortar probetas en diferentes direcciones. Esto, como se podrá observar, puede conllevar a una disparidad de resultados entre una probeta y otra en los ensayos, ya que la orientación de la fibra será diferente en cada una. Para la obtención de las probetas se han utilizado las maquinas de corte, de sierra, tronzadora y máquina de pulido. (Figuras 3, 4 y 5).

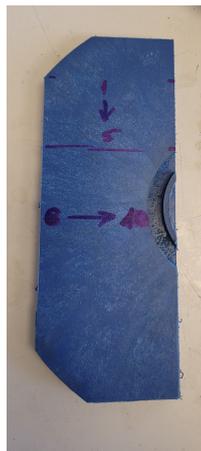


Figura 24: Guía de corte de la pieza inyectada

4.1. Ensayo de Tracción

Para el ensayo de tracción, al igual que en la sección anterior, se ha seguido la **Norma ISO 527-2**, cumpliendo por tanto con las dimensiones correspondientes a la Figura 2 y la Tabla 2.

Se ha empleado la misma máquina de ensayos que para las probetas de la Sección 3. Máquina similar a la Figura 7. También se han obtenido las curvas tensión deformación, estas y los cálculos realizados en *Excel* se encuentran en el Apéndice A. De estos ensayos se han obtenido los valores de la carga máxima aplicada antes de la rotura, así como la de límite elástico recogidas en la Tabla 31. Nuevamente se debe tener en cuenta que la separación entre las mordazas durante los ensayos ha sido de 80 mm

Muestra	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Carga máxima (kN)	Carga elástica (kN)
TB1	11,11	3,96	2,540	1,286
TB2	11,09	4,25	2,752	1,307
TB3	10,74	3,41	1,641	0,791

Tabla 31: Resultados de las probetas de tracción de la pieza inyectada

A partir de estos datos, y de la Ecuación 2 es posible obtener el valor de la tensión, tanto de rotura como de límite elástico, como se puede ver en la Tabla 32

Muestra	Sección (mm^2)	Tensión de rotura (MPa)	Tensión de límite elástico (MPa)
TB1	43,996	57,737	29,228
TB2	47,133	58,393	27,722
TB3	36,623	44,812	21,598

Tabla 32: Cálculos de las probetas de tracción de la pieza inyectada

Además del ensayo también ha sido posible extraer la curva tensión deformación y de la misma obtener un valor para el módulo elástico. Con esto y mediante el uso de la Ecuación 1, que permite obtener la deformación unitaria y el % de elongación a rotura se ha podido conformar la Tabla 34. En este caso, las gráficas correspondientes a las curvas tensión-deformación se han recopilado en el Apéndice A.

Muestra	Long. Inicial (<i>mm</i>)	Long. Final (<i>mm</i>)	Def. unitaria	Módulo elástico (MPa)
TB1	80	84,2	0,052	2236,842
TB2	80	85,2	0,065	2857,143
TB3	80	86,1	0,076	2307,692

Tabla 33: Resultados de la deformación en las probetas de la pieza inyectada

Tal como se hizo en la Sección 3 resulta importante realizar la media y la desviación típica de los parámetros obtenidos como resultado de los ensayos de tracción. De esta manera será posible comparar los resultados con los datos del fabricante así como con los resultados de las pruebas de la placa extruida.

Muestra	Tensión de rotura (MPa)	Tensión elástica (MPa)	Módulo elástico (MPa)
TB1	57,737	29,228	2236,842
TB2	58,393	27,722	2857,143
TB3	44,812	21,598	2307,692
Media	53,647	26,183	2467,226
Desv. típica	7,658	4,041	339,531

Tabla 34: Media y desviación típica de los ensayos de tracción realizados sobre la pieza inyectada

A partir de los resultados de las probetas de la pieza inyectada es posible afirmar que, los valores de resistencia obtenidos son considerablemente menores en comparación con los proporcionados por el fabricante. Esto puede ser debido a varios factores. Por un lado, se observan defectos en las muestras producidas durante el proceso de inyección del material, que pueden debilitar su resistencia estructural.

Además, las características especificadas por el fabricante se refieren a la orientación ideal de las fibras, lo cual es difícil de conseguir en la práctica, ya que la distribución de las fibras en la pieza inyectada no es conocida ni uniforme. Esta variación en la orientación de las fibras también contribuye a la mayor variación observada entre las muestras analizadas, ya que las propiedades mecánicas pueden variar mucho dependiendo de cómo estén orientadas las fibras en cada muestra.

Por otro lado, a nivel comparativo con las muestras de la placa extruida se observa que, en relación con el módulo de elasticidad, un mayor refuerzo en el material inyectado incrementa ligeramente dicho módulo, basandonos en el valor más elevado y no en la media, debido a esa diferencia debida a la orientación de las fibras. Por otro lado, los defectos de fabricación tienen un impacto

significativo tanto en la resistencia, como en el módulo, como se refleja en los resultados. Estos defectos actúan como concentradores de tensiones, debilitando la estructura y reduciendo la resistencia del material. Es por esto por lo que la resistencia no presenta un incremento respecto a la de la placa extruida.

Al igual que en la sección anterior, resulta interesante observar la superficie de rotura de la probeta para poder determinar si se trata de una rotura dúctil o frágil. De esta forma, a partir de las imágenes recogidas en las Figuras 25 y 26 es posible determinar que las probetas de la pieza inyectada en los ensayos de tracción presentan una superficie de rotura correspondiente a una rotura dúctil debido a la rugosidad de esta. Además es fácil apreciar imperfecciones en la inyección que han contribuido a la diferencia entre los datos del fabricante y los resultados obtenidos. Para corroborar la rotura dúctil, resulta interesante analizar el % de alargamiento, para ello se observan los datos recopilados en la Tabla 35. A partir de estos datos, al igual que en la Sección 3 se puede afirmar que es una rotura dúctil pero de ductilidad reducida.

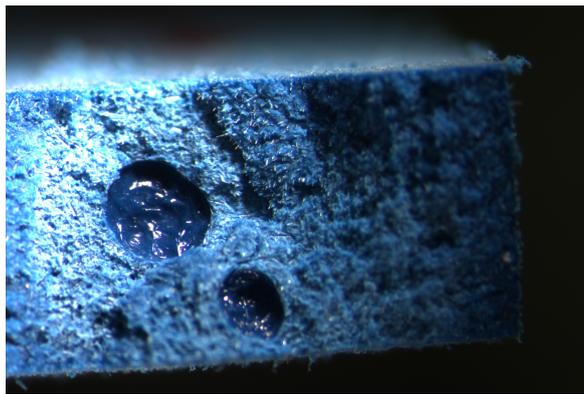


Figura 25: Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción TB2

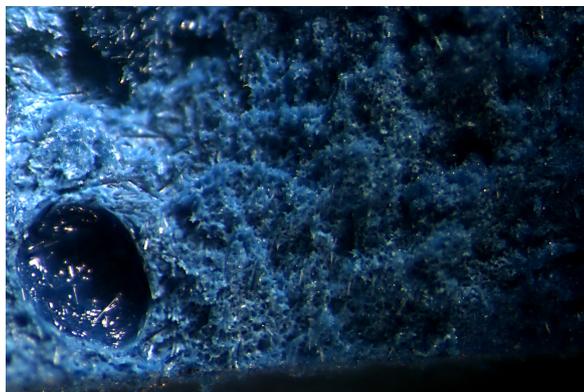


Figura 26: Imagen microscopio x3 de la probeta de ensayo de tracción TB2

Muestra	Long. Inicial (mm)	Long. Final (mm)	% de alargamiento
TB1	80	84,2	5,2
TB2	80	85,2	6,5
TB3	80	86,1	7,6

Tabla 35: Resultados del alargamiento en las probetas de la pieza inyectada

4.2. Ensayo de Flexión

Para el ensayo de flexión, al igual que en la Sección 3 se ha seguido la Norma **UNE-EN ISO 179-2:2021**, respetando por tanto las medidas de la Tabla 12. Así como, el uso de las Ecuaciones 5 y 6 para obtener las propiedades buscadas en el ensayo.

Tras el empleo de las máquinas mencionadas anteriormente (Figuras 3, 4 y 5), se han obtenido probetas cortadas en diferentes direcciones siguiendo el esquema de la Figura 24. Las probetas obtenidas son las que se pueden observar en las Figuras 27 y 28.

Para la realización de los ensayos se ha empleado la misma máquina utilizada en la Sección 3, es decir, la máquina universal de ensayos similar a la de la Figura 14.

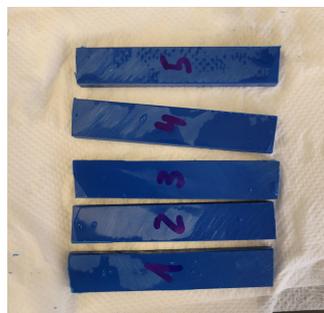


Figura 27: Probetas de ensayos de flexión o impacto 1-5

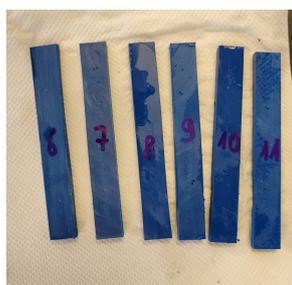


Figura 28: Probetas de ensayos de flexión o impacto 6-11

De esta forma, en la Tabla 36 se hace una recopilación de las medidas de las probetas empleadas para realizar los ensayos de flexión

Muestra	Ancho	Espesor
1	10.99	4.68
3	11.13	4,76
5	11.15	4.28
7	11.04	4.06
9	11.09	3,98
11	10.93	4.14

Tabla 36: Medidas de las probetas de flexión de la pieza inyectada

A partir de los ensayos realizados, es posible obtener los valores de carga máxima de rotura y de carga elástica de flexión. Estos datos han sido recopilados en la Tabla 37. Nuevamente, al igual que en la Sección 3, mediante el uso de las Ecuaciones 5, 6 y 7, es posible establecer la tensión tanto de rotura como de límite elástico a flexión, en este caso del material inyectado. Estos resultados, están recopilados en la Tabla 38.

Muestra	c (mm)	Dist. entre apoyos (mm)	F de rotura (kN)	F lím. elástico (kN)
1	2,34	46	$4,742 * 10^{-1}$	$2,406 * 10^{-1}$
3	2,38	46	$5,062 * 10^{-1}$	$2,788 * 10^{-1}$
5	2,14	46	$3,528 * 10^{-1}$	$1,591 * 10^{-1}$
7	2,03	46	$3,645 * 10^{-1}$	$1,611 * 10^{-1}$
9	1,99	46	$3,270 * 10^{-1}$	$1,462 * 10^{-1}$
11	2,07	46	$2,708 * 10^{-1}$	$1,225 * 10^{-1}$

Tabla 37: Resultados del ensayo de flexión de la pieza inyectada

Además de los resultados numéricos, la curva *Carga vs Deformacion* también puede determinar un valor específico del módulo elástico de flexión. El módulo elástico de flexión se puede comparar con el de la lámina extruida, lo que proporciona un rendimiento relativo entre diferentes materiales y métodos de fabricación. Los módulos elásticos de flexión de diferentes muestras se dan en la Tabla 39 para facilitar su comparación.

Muestra	Momento de Inercia	Tensión de rotura (MPa)	Tensión de lím. elástico (MPa)
1	$9,388 * 10^{-11}$	135,923	68,967
3	$1,00031 * 10^{-10}$	138,518	76,274
5	$7,285 * 10^{-11}$	119,183	53,756
7	$6,157 * 10^{-11}$	138,196	61,073
9	$5,826 * 10^{-11}$	128,472	57,419
11	$6,463 * 10^{-11}$	99,752	45,133

Tabla 38: Resultados de ensayos de flexión de la pieza inyectada.

Muestra	Pendiente (N/m)	Rigidez a flexión (MPa)
1	138613,861	2994,228
3	152380,952	3089,073
5	91111,111	2536,172
7	100000	3293,566
9	80000	2784,343
11	69444,444	2178,863

Tabla 39: Rigidez a flexión de las probetas de la pieza inyectada

Al igual que en los casos anteriores, para realizar una comparativa efectiva entre los valores obtenidos en los ensayos y los valores proporcionados por el fabricante, así como para comparar los diferentes materiales entre sí, se presentan en la Tabla 40 los valores medios y las desviaciones típicas de las propiedades extraídas de estas pruebas. Esta tabla permite una evaluación exhaustiva y precisa. La inclusión de estos valores estadísticos facilita el análisis de la consistencia y la variabilidad de los materiales probados.

Muestra	Tensión de Rotura (MPa)	Tensión elástica (MPa)	Rigidez a Flexión (MPa)
1	135,923	68,967	2994, 228
3	138,518	76,274	3089, 073
5	119,183	53,756	2536, 172
7	138,196	61,073	3293, 566
9	128,472	57,419	2784, 343
11	99,752	45,133	2178, 863
Media	126,674	60,437	2812, 707
Desv. típica	15,118	11,063	404, 867

Tabla 40: Media y desviación típica de resultados de flexión de la pieza inyectada

De la misma manera que en los ensayos de tracción se aprecia diferencia respecto a la información del fabricante. La justificación a esto es la misma que para la tracción, la información del fabricante se obtiene de la orientación ideal de la fibra, que en el caso de las probetas ensayadas no ha sido posible determinar.

Una vez realizados los ensayos, una de las probetas alcanzó la rotura, al igual que se ha hecho anteriormente para los demás ensayos, se ha analizado la superficie de rotura de dicha probeta. A partir de las Figuras 29 y 30, es posible, apreciar un defecto, al igual que ya se habían detectado en las probetas ensayadas a tracción. Estas imperfecciones en la inyección pueden afectar a las propiedades del material, sería por tanto una razón por la que el resultado de tensión de flexión es significativamente inferior a la aportada por el fabricante.

Por otro lado, de la superficie vista en las Figuras 29 y 30, es posible ver que la orientación de las fibras de la muestra 3 inyectada justo tiene la disposición idónea para soportar las mayores tensiones, como se observa en la parte central y superior izquierda, las fibras están orientadas preferentemente en dirección perpendicular a la fractura. Esto hace que se alcancen los mejores valores de resistencia a flexión en esta probeta.



Figura 29: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de Flexión P3

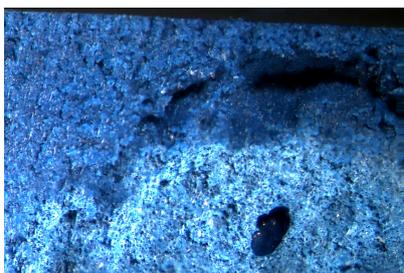


Figura 30: Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de Flexión P3

4.3. Ensayo de impacto Charpy

De manera similar a lo indicado en la sección anterior, los ensayos de impacto para la pieza inyectada se realizarán de acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 179-2:2021**. Esto implica que se cumplirán las dimensiones y características de las probetas descritas en la Tabla 23, asegurando así la consistencia y precisión en los resultados obtenidos durante las pruebas de impacto. Dichas probetas se aprecian en las Figuras 27 y 28.

De los ensayos se puede extraer el valor de la energía absorbida por el material durante la prueba. Esta información, queda recogida en la Tabla 41

Muestra	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Energía [$Nm = J$]
2	11,15	4,19	3,75
4	11,21	4,14	3,4
6	11,02	3,7	3,4
8	10,87	4,18	4,3
10	10,88	4,03	5,35

Tabla 41: Resultados de la prueba de impacto de las probetas inyectadas

Con estos resultados, conociendo las dimensiones de la probeta es posible establecer una correlación con las unidades de energía absorbida presentes en la Tabla 1 para así conseguir una comparación válida entre ambos materiales. De esta manera, a partir de la sección de la ‘probeta se podrá obtener las unidades (kJ/m^2), estos resultados quedan recopilados en la Tabla 42

Muestra	Energía [kJ]	Sección [m ²]	Energía/Superficie [kJ/m ²]
2	$3,75 * 10^{-3}$	$4,672 * 10^{-5}$	80,268
4	$3,4 * 10^{-3}$	$4,641 * 10^{-5}$	73,261
6	$3,4 * 10^{-3}$	$3,692 * 10^{-5}$	92,098
8	$4,3 * 10^{-3}$	$4,543 * 10^{-5}$	94,637
10	$5,35 * 10^{-3}$	$4,385 * 10^{-5}$	122,017

Tabla 42: Resultados de la prueba de impacto de las probetas de inyección

Como se ha hecho anteriormente, de los resultados de las pruebas se va a extraer la media y la desviación típica, facilitando así la comparación con los valores obtenidos de las pruebas de la placa extruida. Estos valores se pueden ver en la Tabla 43. Como se aprecia existe variabilidad por la orientación de las fibras. Además, es posible ver como el valor más alto (122,016 kJ/m²) es ligeramente superior a los obtenidos en la Sección 3.

Muestra	Energía/Superficie [kJ/m ²]
2	80,268
4	73,261
6	92,098
8	94,637
10	122,016
Media	92,456
Desv. típica	18,680

Tabla 43: Cálculos de la prueba de impacto de las probetas inyectadas

Al igual que en las pruebas anteriores, también es importante analizar la superficie de rotura de las probetas tras las pruebas realizadas para poder ver el tipo de rotura presentado y poder extraer conclusiones de estos.

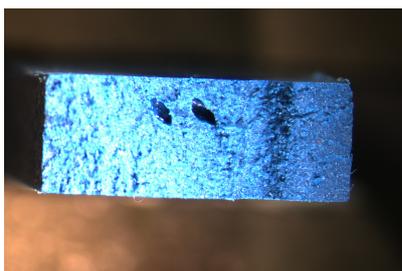


Figura 31: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de Impacto P8

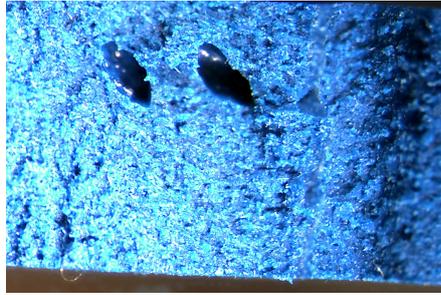


Figura 32: Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de Impacto P8

En las Figuras 31 y 32, se observa claramente la presencia de imperfecciones (poros) generadas durante la inyección. Estas imperfecciones pueden hacer que las propiedades obtenidas al estudiar este material sean inferiores a las que se tendrían en ausencia de estos fallos en la inyección.

Para corroborar la presencia de estos poros, se analiza la superficie de otra de las probetas ensayadas, en este caso, en las Figuras 33 y 34 se puede ver como en la probeta número 10 también se aprecia la presencia de poros que reflejan fallos en la inyección de la pieza. El resto de imágenes de las probetas ensayadas se recopilan en el Apéndice F.



Figura 33: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de Impacto P10



Figura 34: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de Impacto P10

5. Análisis mediante método de elementos finitos del comportamiento de la pieza destinada al sistema hidráulico o de transporte de combustible de un aeropuerto.

Para la realización de este estudio, se va a emplear el programa informático *ANSYS Mechanical*. Esta herramienta será de gran utilidad para realizar un estudio detallado del desempeño de la pieza destinada al sistema hidráulico del aeropuerto o a la distribución de combustible en el mismo. Se podrá observar cómo la pieza reacciona ante diversas situaciones y desafíos que pueda enfrentar en su funcionamiento cotidiano.

Antes de comenzar a hablar del estudio en sí, es interesante explicar qué pieza se ha estudiado y qué ha motivado la búsqueda del uso de poliamidas reforzadas con fibra de vidrio para este desempeño en particular.

La pieza estudiada es un elemento de conexión estanca con sistema antitracción que permite unir tubos de igual o diferente diámetro y material. Para la producción de dichas piezas, se decidió utilizar poliamida reforzada con fibra de vidrio, debido a sus propiedades duraderas y rígidas, así como a su capacidad para soportar altas cargas y temperaturas. Además, su reducido peso permite la sustitución de piezas de acero por alternativas más ligeras, lo que facilita el transporte de piezas y simplifica posibles reparaciones, frente a piezas realizadas en aleaciones cuyo transporte y movilidad es complicada debido a su elevado peso. La pieza en cuestión, se puede ver en la Figura 35.

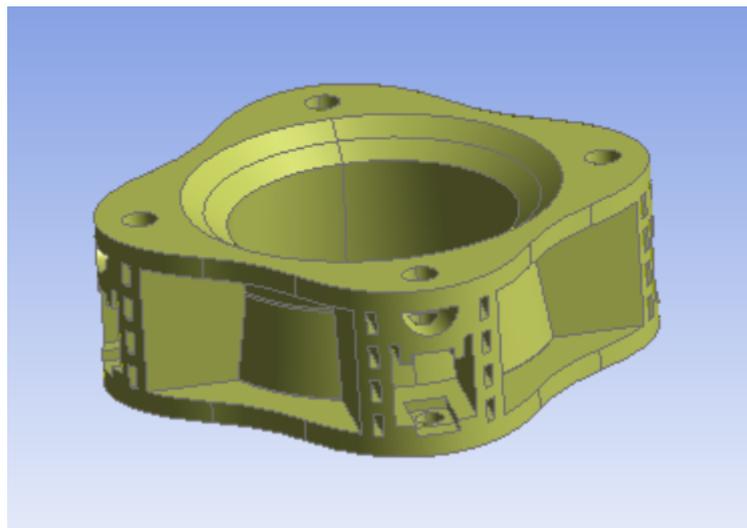


Figura 35: Pieza de conexión para fabricar con poliamida con fibra de vidrio

La intención de este apartado es llevar a cabo un ensayo de presión en la pieza mostrada en la Figura 35. Para ello, se realizará una simplificación en el ensayo, respecto al montaje final. Se simulará la aplicación de presión sobre la superficie interna de la pieza. En esta simplificación, la pieza se mantendrá cerrada por un lado, mediante una brida de acero, aseguradas con tornillos ajustados a un par de apriete de 30 N/m. La pieza completa a ensayar se puede observar en la Figura 36. Además en la Figura 37 se puede observar la malla empleada en los ensayos, en la que se ve como se ha intentado hacer mas precisa la malla de la pieza que la brida pues es la que nos interesa observar más detenidamente.

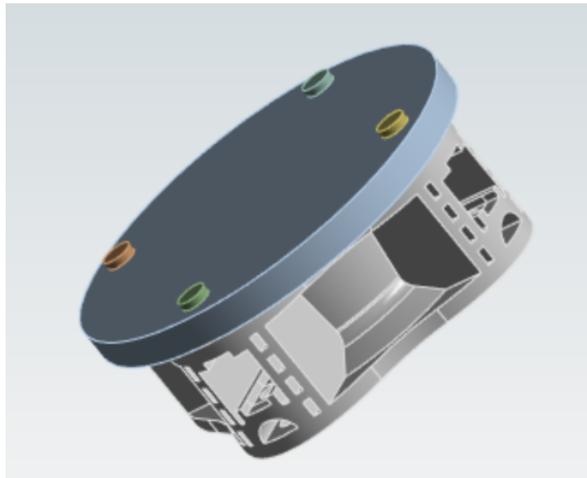


Figura 36: Pieza de conexión con brida de acero

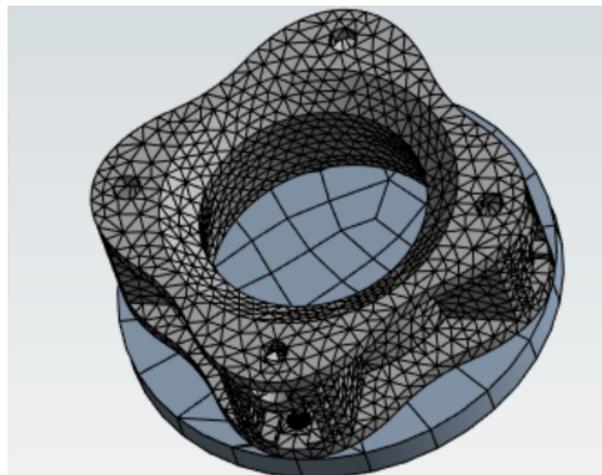


Figura 37: Malla de la pieza de conexión con brida de acero

Se han realizado ensayos a dos presiones diferentes: una a 16 bares y otra a 25 bares. Una vez realizados los ensayos, se ha analizado la deformación de la pieza y la tensión sufrida por la misma. De esta manera, es posible observar que, en cuanto a la tensión en las Figuras 38 y 39, tanto para 16 como para 25 bares, no hay ningún punto de la pieza que alcance una tensión superior a los

valores calculados experimentalmente, ni para la placa extruida de la Sección 3 ni para la pieza inyectada de la Sección 4. Por tanto, es posible afirmar que, mediante ANSYS, parece que las piezas realizadas con este material responderían de manera adecuada. Las propiedades introducidas en el programa han sido, la tensión de rotura y elástica tanto de la pieza extruida como la inyectada obtenidos en los ensayos. Mientras que, el módulo elástico introducido es el del fabricante.

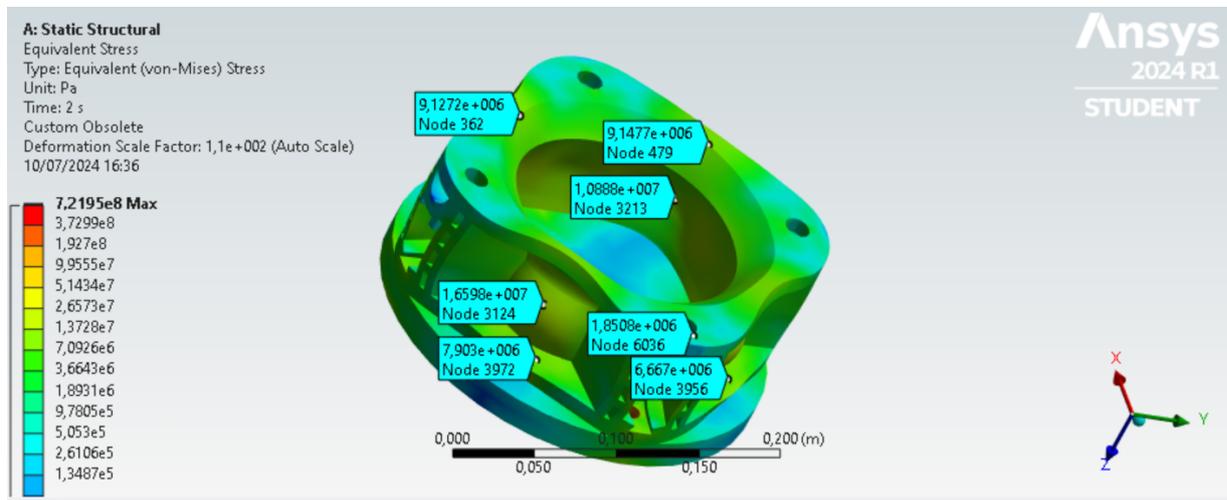


Figura 38: Resultados ANSYS. Tensión bajo una presión interna de 16 bares, propiedades de la pieza inyectada

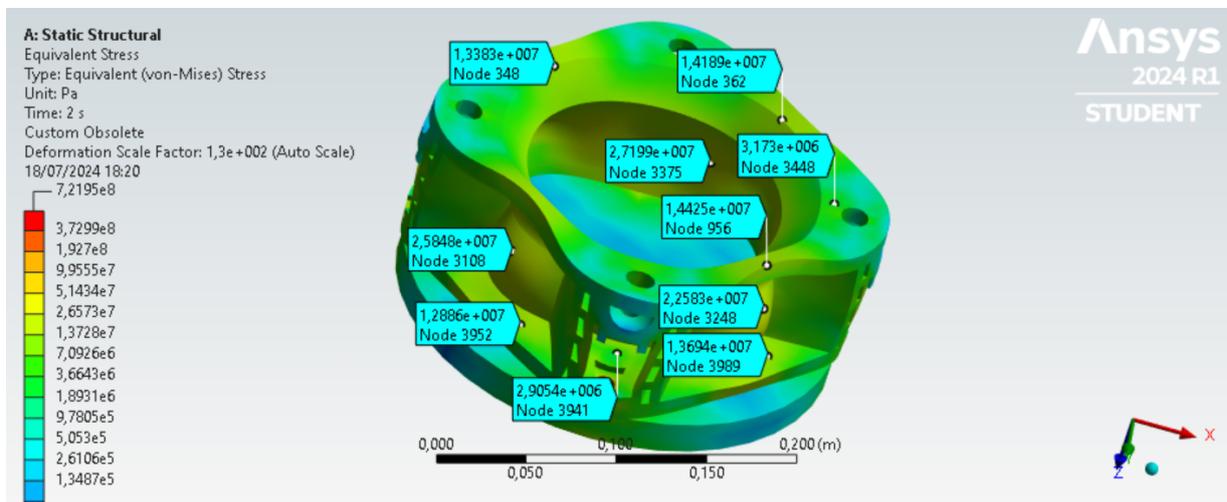


Figura 39: Resultados ANSYS. Tensión bajo una presión interna de 25 bares, propiedades de la pieza inyectada

Por otro lado, también es interesante observar la deformación que se produce en la pieza bajo estas tensiones. A la vista de la Figura 40, es posible apreciar cómo se separa la pieza de la brida. En el montaje final de la pieza, habrá una goma que asegure la estanqueidad. Además, se observa en la Figura 41 cómo la mayor deformación se produce en los puntos donde hay mayor tensión.

Aunque, como se ve en el valor máximo, la deformación es menor a 1 mm.

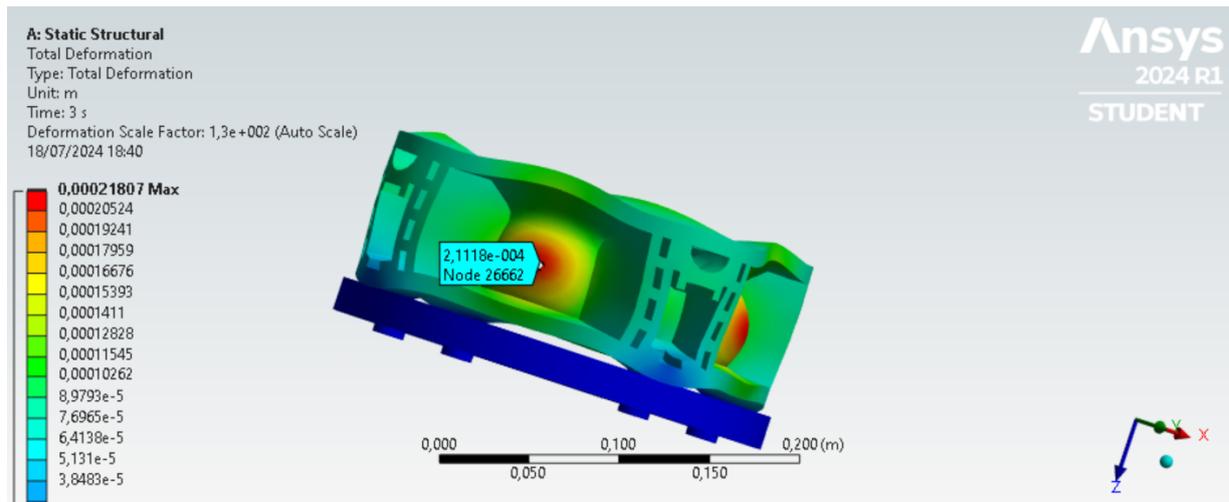


Figura 40: Resultados ANSYS. Tensión bajo una presión interna de 25 bares, con propiedades de pieza inyectada

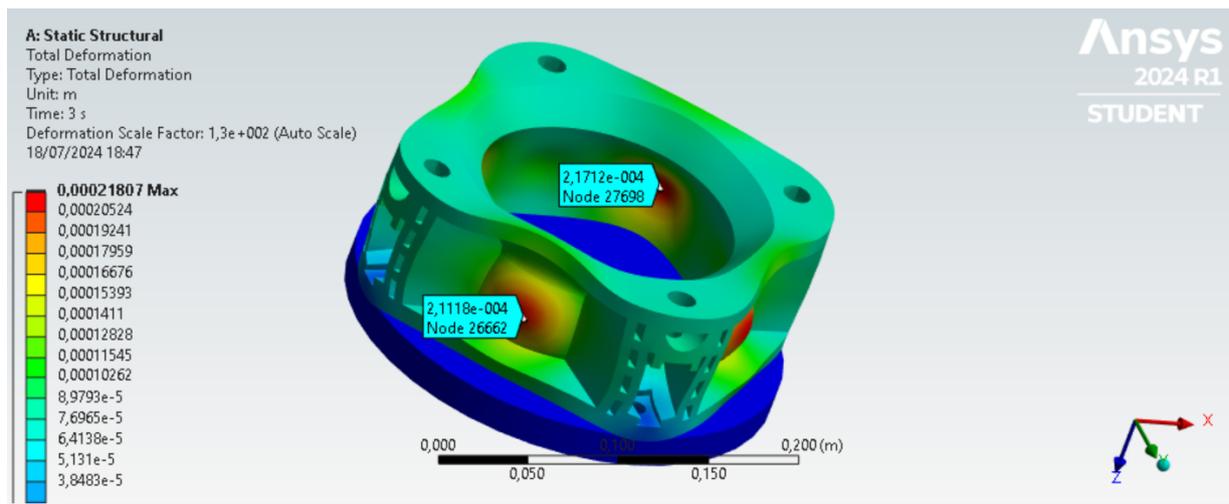


Figura 41: Resultados ANSYS. Tensión bajo una presión interna de 25 bares. con propiedades de pieza inyectada

Con todos los resultados obtenidos en el programa informático, es posible afirmar que, el material estudiado, a pesar de tener propiedades menores a las aportadas por el fabricante puede cumplir con las necesidades requeridas por la presión interna a la que se somete a la pieza. Esto se debe a que, como se observa en las Figuras 38 y 39 la tensión máxima a la que se somete es de 16,6 MPa y 27,2 MPa, tensiones que, según los datos recopilados en apartados anteriores, el material puede soportar. Para poder corroborar esto, a nivel experimental, resulta importante realizar una prueba de presión sobre la pieza. En el Apéndice G se observan el resto de imágenes extraídas de los resultados del programa.

6. Prueba de presión experimental.

Para poder corroborar que la pieza soporta las condiciones de presión requeridas, se ha realizado un ensayo experimental. Para la realización de este, se ha mecanizado una placa de material extruido cuyas dimensiones son 500x500x200 mm. Una vez obtenida dicha pieza, se realiza un montaje, siguiendo un esquema similar al de la Figura 42, cabe destacar que a la vista de los resultados de deformación de las Figuras 40 y 41, se ha añadido un refuerzo en las caras que sufrían una mayor deformación.

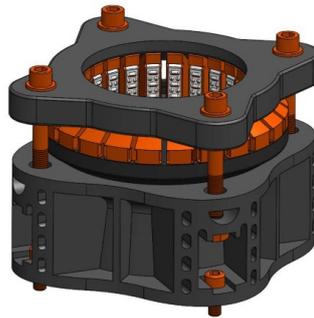


Figura 42: Imagen pieza completa para ensayo.

Funcionalmente la piezas se montarían de dos en dos como en la Figura 43, pudiendo unirse diferentes diámetros. Dado que ese es otro estudio diferente, al otro lado se situó una brida, al igual que en la Sección 5. Por tanto, el montaje incluye una goma con una serie de elementos de agarre para sujetar la tubería, y una contra brida del mismo material que la pieza. Al otro lado, se sitúa una brida ciega de acero como la pieza empleada en la simulación de la Sección 5. Como ya se apreció en la sección anterior la presión genera una pequeña deformación en la pieza (Figura 40), para que no se produzca un fallo en la estanqueidad se sitúa una junta tórica de goma que la mantiene.

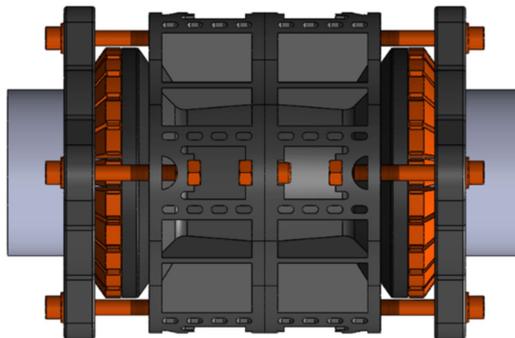


Figura 43: Imagen pieza completa para ensayo.

El montaje completo para la realización de la prueba es el que se muestra en las Figuras 44 y 45. Un punto importante a tener en cuenta es el par de apriete de los tornillos, para conseguir dos propósitos: del lado izquierdo comprimir la pieza de goma para lograr la estanqueidad contra el tubo y que las piezas metálicas se claven lo suficiente en el tubo para evitar que este sea expulsado por la presión, y, en segundo lugar, en la parte derecha que el par de apriete permita que la goma de estanqueidad soporte las deformaciones de la pieza contra la brida ciega, no produciéndose fugas.

Desde el punto de vista mecánico, lo primero que se observó es que la brida exterior de presión de la goma no soportaba el par de apriete necesario para comprimir la goma de estanqueidad, por lo que fue necesario colocar otra brida de acero, que se ve a la izquierda de la Figura 44.

Mediante este montaje y el uso de un banco de pruebas de presión como el mostrado en la Figura 46 es posible realizar el ensayo que se pretende. Para dicho ensayo, una vez extraído todo el aire antes de la colocación del manómetro calibrado, se someterá el montaje a una presión de 25 bares.



Figura 44: Montaje completo pieza para ensayo vista 1.



Figura 45: Montaje completo pieza para ensayo vista 2.



Figura 46: Banco de pruebas de presión

En lo que respecta a la prueba, inicialmente se realizó la prueba a una presión de 15 bares, que se corresponde con las pruebas exigidas por la norma **EN-1074** para la normalización hidráulica de PN10, es decir, 1,5 veces la presión máxima de trabajo. En la Figura 45 se puede ver que el manómetro señala esa presión de 15 bares. Posteriormente y para poder certificar la pieza como PN16 se realizó la prueba a 25 bares. Como se puede apreciar en la Figura 47, el barómetro alcanzó estos 25 bares.

Con todo esto, es posible realizar las pruebas. Las pruebas se realizaron de forma exitosa. El montaje mantuvo la estanqueidad y soportó de forma satisfactoria la tensión interna a la que se sometía. Por tanto, se han corroborado los resultados obtenidos en las secciones anteriores.



Figura 47: Barómetro.

De esta manera, una vez completados los diferentes ensayos de los materiales, la realización de la simulación mediante ANSYS y por último el ensayos experimental de la prueba de presión sobre el montaje completo de la pieza, es posible afirmar que la pieza con los materiales estudiados sería apropiada para su función. Este sistema de mecanizar las piezas antes de la fabricación del molde, unido a la comparación entre el material mecanizado y el inyectado, permite a la industria tener una seguridad de que el molde de inyección a realizar será satisfactorio. El siguiente paso, sería realizar el diseño del molde, y un estudio del proceso de inyección para poder conseguir la mejor orientación de las fibras en los puntos de tensión más altos vistos en la Sección 5.

7. Presupuesto del proyecto

Una vez finalizados los estudios del trabajo, resulta interesante realizar un análisis de los costes. Para ello, se lleva a cabo un presupuesto. En primer lugar, en la Tabla 44, se observa el coste de los procesos realizados en el laboratorio. En esta se incluyen las amortizaciones de las máquinas empleadas. La fórmula es sencilla: para un producto comprado, se considera la amortización a 5 años. Se divide el costo del producto entre las horas totales de esos 5 años y se multiplica por las horas dedicadas. Otro elemento a considerar es la mano de obra de los ingenieros, tanto junior como senior, y los técnicos de laboratorio.

Precio Sierra	3.849,17 €	Amortización	0,09 €
Precio Disco de corte	8.918,17 €	Amortización	0,20 €
Precio pulidora	7.200,00 €	Amortización	0,16 €
Precio Máquina universal	150.000,00 €	Amortización	3,42 €
Precio Máquina impacto	50.000,00 €	Amortización	1,14 €
Precio Microscopio	18.000,00 €	Amortización	0,41 €
Precio Mano de Obra Junior	30,00 €	Horas Dedicadas	120,00
Precio Mano de Obra Senior	50,00 €	Horas Dedicadas	120,00
Precio Mano de Técnico	15,00 €	Horas Dedicadas	15,00
Coste Sierra	1,23 €	Horas dedicadas	14,00
Coste Disco de corte	4,07 €	Horas Dedicadas	20,00
Coste Pulidora	3,29 €	Horas Dedicadas	20,00
Coste Máquina Universal	82,19 €	Horas Dedicadas	24,00
Coste Máquina de impacto	22,93 €	Horas Dedicadas	20,00
Coste Microscopio	9,04 €	Horas Dedicadas	22,00
Coste Mano de obra Junior	3.600,00 €	Horas Dedicadas	120,00
Coste Mano de obra Senior	6.000,00 €	Horas Dedicadas	120,00
Coste Mano de obra Técnico	225,00 €	Horas Dedicadas	15,00
Coste Total Ensayos	9.947,65 €		

Tabla 44: Presupuesto de los ensayos realizados en el laboratorio.

Por otro lado, se ha realizado un presupuesto del uso del programa informático *ANSYS Mechanical* (Tabla 45), en este, nuevamente, se han incluido las horas de trabajo de los ingenieros y las amortizaciones tanto de la licencia anual del programa como del ordenador portátil empleado para el estudio (amortizado a 5 años).

Precio Programa	30.000,00 €	Amortización	0,68 €
Precio Ordenador	1.000,00 €	Amortización	0,02 €
Precio Horas Junior	30,00 €	Horas dedicadas Junior	40,00
Precio Horas Senior	50,00 €	Horas dedicadas Senior	3,00
Coste Amortización Programa	20,55 €	Horas Dedicadas	30
Coste Amortización Ordenador	0,91 €	Horas Dedicadas	40
Coste Horas Junior	1.200,00 €	Horas Dedicadas	40
Coste Horas Senior	150,00 €	Horas Dedicadas	3
Coste Total ANSYS	1.370,55 €		

Tabla 45: Presupuesto de la simulación mediante ANSYS.

Al igual que para los ensayos del laboratorio y para la simulación, se ha realizado un presupuesto del ensayo de presión realizado. Este presupuesto se encuentra en la Tabla 46

Precio Mecanizado	725,00 €		
Precio Horas Senior	50,00 €	Horas dedicadas	12
Precio Horas Junior	30,00 €	Horas dedicadas	12
Precio Horas Técnico	15,00 €	Horas dedicadas	12
Precio Amortización Banco	100,000 €	Amortización	0,002 €
Coste Mecanizado	725,00 €		
Coste Horas Senior	600,00 €	Horas dedicadas	12
Coste Horas Junior	360,00 €	Horas dedicadas	12
Coste Horas Técnico	180,00 €	Horas dedicadas	12
Coste Amortización Banco	0,027 €	Horas dedicadas	12
Coste Total	1.865,03 €		

Tabla 46: Presupuesto del ensayo de presión.

Por último, se ha realizado un presupuesto sobre el coste de la redacción de este informe. En este, solo se han tenido en cuenta el coste de las horas dedicadas por el ingeniero junior, así como, el coste de amortización de la licencia anual de *Office 365* y del uso del ordenador.

Precio Ordenador	1.000,00 €	Amortización	0,02 €
Precio Horas Junior	30,00 €	Horas dedicadas	130
Coste uso de ordenador	2,97 €	Horas dedicadas	130
Coste de horas Junior	3.900,00 €	Horas dedicadas	130
Precio licencia Office	99,00 €	Amortización	0,01 €
Coste licencia Office	0,57 €	Horas dedicadas	50
Coste Total	3.903,53 €		

Tabla 47: Presupuesto de la redacción del informe.

Sumando el coste de las Tablas 44, 45, 46 y 47 se obtiene como resultado un coste total del proyecto de 17.086,76 €.

8. Conclusiones

Una vez realizados todos los ensayos, las simulaciones y valorados los presupuestos de los diferentes apartados, resulta importante resumir y realizar una serie de conclusiones. En primer lugar, en las Tablas se puede apreciar una recopilación de las propiedades obtenidas en los ensayos y los valores de los mismos para la pieza extruida y la inyectada respectivamente, aportados por el fabricante. Para los resultados de los ensayos se ha empleado el valor medio para la placa extruida y el valor más alto para la pieza inyectada. En la Tabla 1 se refiere a las probetas de dirección longitudinal y 2 a las de dirección transversal. Como ya se comentó anteriormente ante la falta de un extensómetro de precisión, los valores obtenidos de los módulos elásticos no se pueden considerar concluyentes y solo sirven para comparar los valores de la placa extruida y la pieza inyectada.

Propiedad	Fabric. extruida	Ensayos extruida 1	Ensayos extruida 2
Tens. rotura tracc.	98	59,970	47,395
Tens. elástica tracc.	98	28,565	24,103
Módulo elástico tracc.	5700	2546,620	2125
Tens. rotura flex.	140	122,181	112,354
Tens. elástica flex.	-	53,788	49,686
Módulo elástico flex.	5200	3026,354	2787,970
Energía absorbida	60	52,484	116,026

Tabla 48: Resumen de los resultados de las propiedades de la placa extruida.

Propiedad	Fabric. inyectada	Ensayos inyectada
Tens. rotura tracc.	170	58,393
Tens. elástica tracc.	-	27,722
Módulo elástico tracc.	5000	2857,143
Tens. rotura flex.	200	138,518
Tens. elástica flex.	-	76,274
Módulo elástico flex.	-	3089,073
Energía absorbida	-	122,016

Tabla 49: Resumen de los resultados de las propiedades de la pieza inyectada.

Por otro lado, es interesante ver como de las Figuras 38 y 39, se extraen como tensiones máximas en la pieza $16,6 \text{ MPa}$ y $27,2 \text{ MPa}$ respectivamente. Que comparándolo con las tensiones recopiladas en las tablas anteriores se observa que el material está preparado para soportarlos. A su vez, no superan el valor del límite elástico por lo que la deformación que se produce debería recuperarse, a excepción del caso particular de las probetas de dirección transversal de la placa extruida cuando se somete a 25 bares. Aun así cabe mencionar que la diferencia entre el límite elástico y dicha tensión es pequeña.

Mediante el ensayo explicado en la Sección 7, se confirmó que la pieza con el material extruido, mecanizada es capaz de soportar estas cargas. Por tanto viendo que en general las propiedades de la pieza inyectada, en este caso ligeramente superiores, pero, intuyendo que la diferencia será mayor con una correcta inyección, las piezas de material inyectado deberían responder aún mejor a las situaciones de presión interna a las que se somete a la pieza.

Por tanto, a lo largo del trabajo se han caracterizado los 2 materiales polímeros técnicos, para su uso en componentes sometidos a presiones internas. Como candidatos a sustitutos de aleaciones.

Se ha comprobado que ambos materiales, en el diseño considerado, cumplen con las especificaciones de la pieza. Sin embargo, se ha detectado una variabilidad en las propiedades intrínsecas debido a la orientación preferencial de las fibras en distintas direcciones, resultado del proceso de fabricación. Además, se han encontrado defectos producidos durante los procesos de fabricación, como las porosidades en la inyección, que claramente reducen las propiedades declaradas del material. Por lo tanto, sería necesario realizar un estudio del proceso de inyección para evitar las porosidades y lograr una orientación y distribución favorable de las fibras en los puntos de máxima tensión.

La fabricación de los moldes de inyección es un proceso muy caro debido a los materiales empleados, el sistema de refrigeración y las diferentes correderas de este. En este caso, el molde llevará cuatro correderas, una para cada una de las partes donde se alojan los tornillos. Además, al ser la parte negativa de la pieza, es complicado reducir grosores una vez fabricado.

La fabricación del molde tendría un coste aproximado de unos 40000 €, sumando esto al coste del trabajo, a excepción del mecanizado, daría un coste de 56361,76 €. Esto, frente a los 17086,76 € que costaría hacer un estudio como el realizado en este trabajo, con el mecanizado, implica que realizar esta comparación entre el material extraído de placas extruidas y el de inyección permite, por un precio más asequible, estudiar la viabilidad de las piezas previo a realizar un molde.

Al ser mejores las propiedades del material inyectado, si la pieza mecanizada cumple con las características requeridas, la inyectada también lo hará, e incluso mejorará el funcionamiento. Así, se pueden realizar mejoras en el diseño de las piezas sin necesidad de hacer un molde para cada una de ellas.

En resumen, una verificación experimental de la pieza antes de la fabricación del molde puede aportar una garantía de que la pieza va a trabajar correctamente y que no se van a tener que hacer modificaciones en el molde.

A. Apendice A: Gráficas y cálculos de ensayos de tracción

A.1. Probetas de la placa extruida

Probeta de tracción en dirección longitudinal 1 (TLT1):

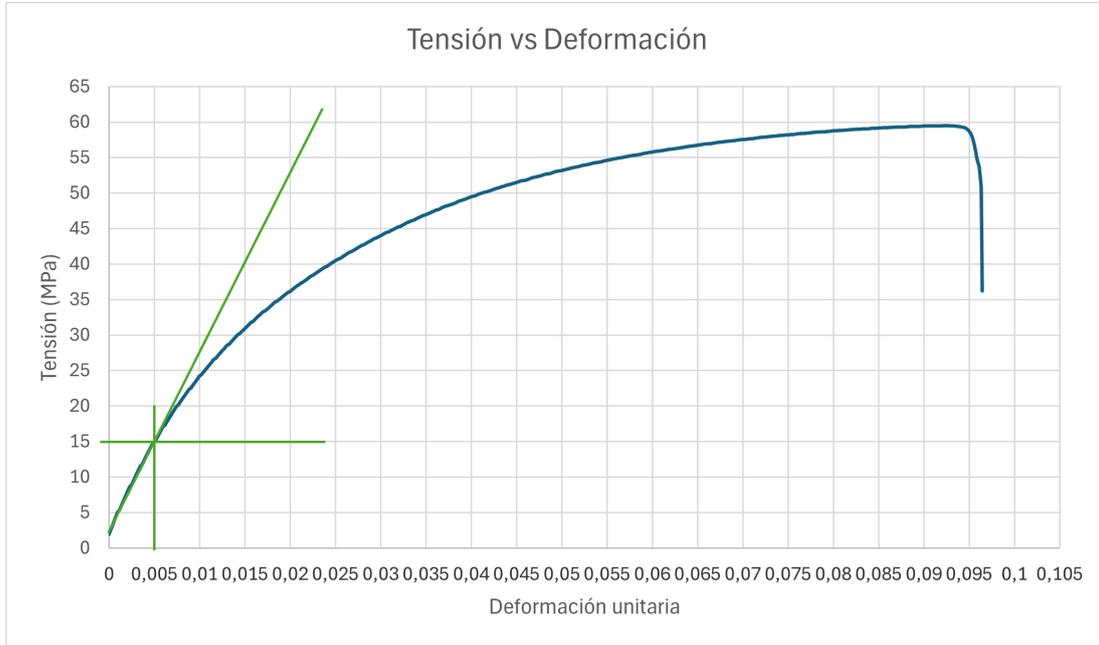


Figura 48: Curva tensión-deformación probeta de tracción en dirección longitudinal 1

Muestra	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Espesor final (mm)
TLT1	4,85	10,66	4,7
Sección (mm²)	Sección (m²)		
51,701	0,000051701		
Ancho Final (mm)	Dist. entre mordazas (mm)	Velocidad de ensayo (mm/min)	Longitud final (mm)
10,61	80	5	85,8
Alargamiento máximo (mm)	Deformación unitaria		
7,7	0,0725		
Carga máxima (kN)	Carga máxima (N)	Carga elástica (kN)	Carga elástica (N)
3,075780465	3075,780465	1,435389044	1435,389044
Tensión máxima (MPa)	Tension máxima (Pa)	Tensión elástica (Pa)	Tensión elástica (MPa)
59,49170161	59491701,61	27763274,3	27,7632743
Tensión 1 (MPa)	Tensión 2 (MPa)		
15	5		
		Módulo de Young (MPa)	
		2500	
Deformación 1	Deformación 2		
0,005	0,001		

Figura 49: Cálculos probeta de tracción en dirección longitudinal 1

Probeta de tracción en dirección longitudinal 2 (TLT2):

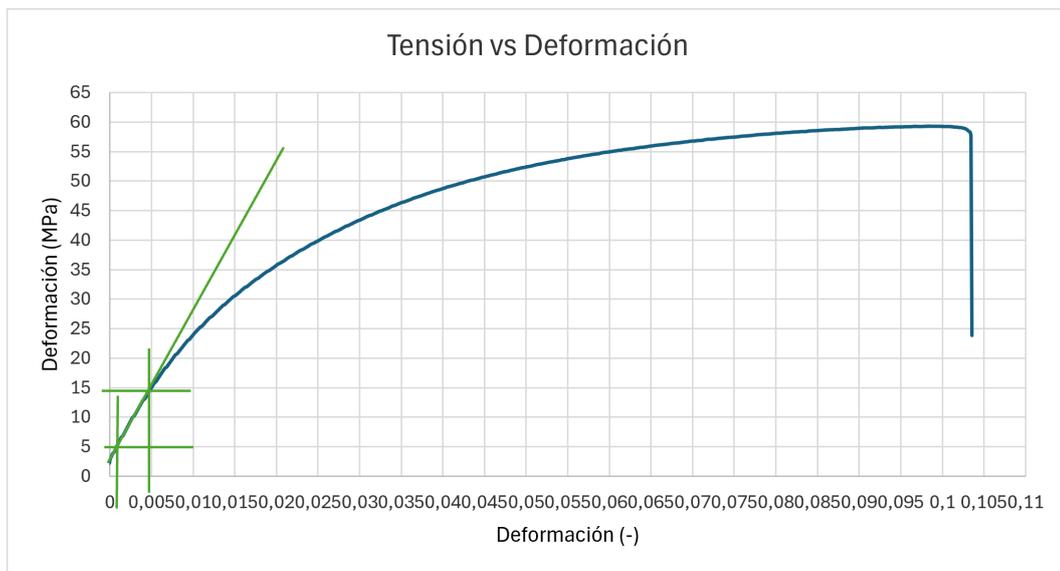


Figura 50: Curva tensión-deformación probeta de tracción en dirección longitudinal 2

Muestra	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Espesor final (mm)
TLT2	4,15	10,73	4,11
Seccion (mm^2)	Sección (m^2)		
44,5295	4,45295E-05		
Ancho Final (mm)	Dist. entre mordazas (mm)	Velocidad de ensayo (mm/min)	Longitud final (mm)
10,62	80	5	86,2
Alargamiento máximo (mm)	Deformación unitaria		
8,21	0,0775		
Carga máxima (kN)	Carga máxima (N)	Carga elástica (kN)	Carga elástica (N)
2,642929	2642,929	1,247303099	1247,303099
Tension máxima (Pa)	Tensión máxima (MPa)	Tensión elástica (Pa)	Tensión elástica (MPa)
59352317	59,352317	28010714,22	28,01071422
Tensión 1 (MPa)	Tensión 2 (MPa)		
15	5		
		Modulo de Young (MPa)	
		2564,102564	
Deformación 1	Deformación 2		
0,0049	0,001		

Figura 51: Cálculos probeta de tracción en dirección longitudinal 2

Probeta de tracción en dirección longitudinal 3 (TLT3):



Figura 52: Curva tensión-deformación probeta de tracción en dirección longitudinal 3

Muestra	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Espesor final (mm)
TLT3	4,13	10,74	4,1
Sección (mm²)	Sección (m²)		
44,3562	4,43562E-05		
Ancho Final	Dist. entre mordazas (mm)	Velocidad de ensayo (mm/min)	Longitud final (mm)
10,65	80	5	83,6
Alargamiento máximo (mm)	Deformación unitaria		
8,06	0,045		
Carga máxima (kN)	Carga máxima (N)	Carga elástica (kN)	Carga elástica (N)
2,708715039	2708,715039	1,327244335	1327,244335
Tensión máxima (Pa)	Tensión máxima (MPa)	Tensión elástica (Pa)	Tensión elástica (MPa)
61067337,57	61,06733757	29922408,49	29,92240849
Tensión 1 (MPa)	Tensión 2 (MPa)		
16	7,5		
	Módulo de Young (MPa)		
	2575,757576		
Deformación 1	Deformación 2		
0,0048	0,0015		

Figura 53: Cálculos probeta de tracción en dirección longitudinal 3

Probeta de tracción en dirección transversal 2 (TST2):



Figura 54: Curva tensión-deformación probeta de tracción en dirección transversal 2

Muestra	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Espesor final (mm)
TST2	4,1	10,7	3,8
Sección (mm²)	Sección (m²)		
43,87	0,00004387		
Ancho Final (mm)	Dist. entre mordazas (mm)	Velocidad de ensayo (mm/min)	Longitud final (mm)
10,63	80	5	83,41
Alargamiento máximo (mm)	Deformación unitaria		
3,41	0,042625		
Carga máxima (kN)	Carga máxima (N)	Carga elástica (kN)	Carga elástica (N)
2,043238726	2043,238726	1,050074384	1050,074384
Tensión máxima (Pa)	Tensión máxima (MPa)	Tensión elástica (Pa)	Tensión elástica (MPa)
46574851,28	46,57485128	23936047,05	23,93604705
Tensión 1 (MPa)	Tensión 2 (MPa)		
15	10		
		Módulo de Young (MPa)	
		2000	
Deformación 1	Deformación 2		
0,0047	0,0022		

Figura 55: Cálculos probeta de tracción en dirección transversal 2

A.2. Probetas de la pieza inyectada

Probeta en de la pieza inyectada 1:



Figura 56: Curva tensión-deformación probeta de tracción de la pieza inyectada 1

Muestra	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Espesor final (mm)
TB1	3,96	11,11	3,85
Sección (mm²)	Sección (m²)		
43,9956	4,39956E-05		
Ancho Final (mm)	Dist. entre mordazas (mm)	Velocidad de ensayo (mm/min)	Longitud final (mm)
11,01	80	5	84,2
Alargamiento máximo (mm)	Deformación unitaria		
4,2	0,0525		
Carga máxima (kN)	Carga máxima (N)	Carga elástica (kN)	Carga elástica (N)
2,540166375	2540,166375	1,285886036	1285,886036
Tensión máxima (Pa)	Tensión máxima (MPa)	Tensión elástica (Pa)	Tensión elástica (MPa)
57736827,65	57,73682765	29227605,39	29,22760539
Tensión 1 (MPa)	Tensión 2 (MPa)		
18,5	10		
		Módulo de Young (MPa)	
		2236,842105	
Deformación 1	Deformación 2		
0,008	0,0042		

Figura 57: Cálculos probeta de tracción de la pieza inyectada 1

Probeta en de la pieza inyectada 2:

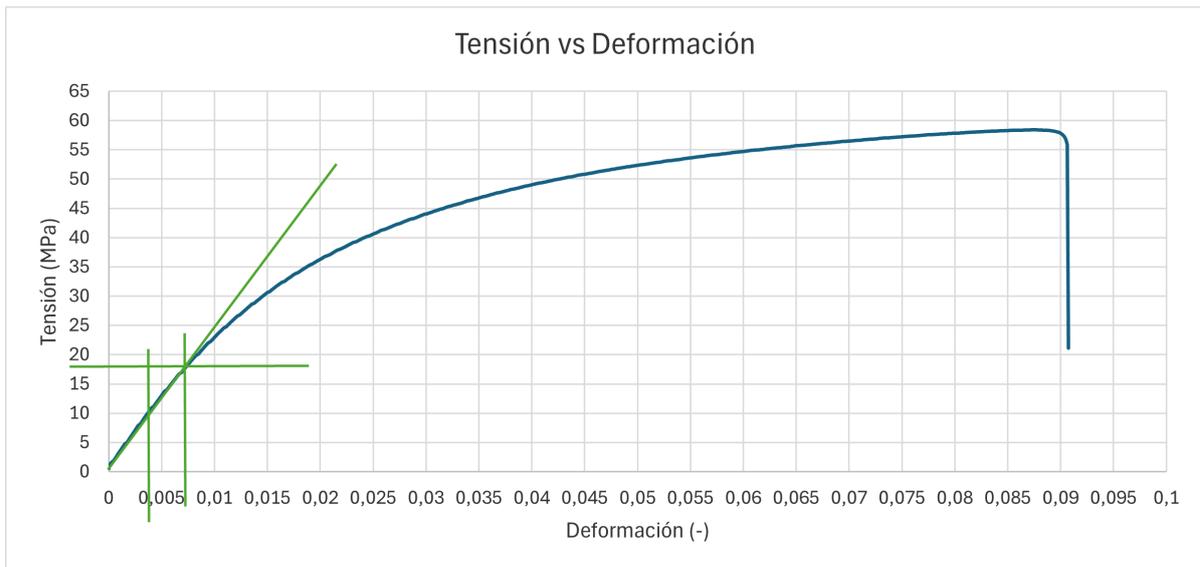


Figura 58: Curva tensión-deformación probeta de tracción de la pieza inyectada 2

Muestra	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Espesor final (mm)
TB2	4,25	11,09	4,21
Sección (mm²)	Sección (m²)		
47,1325	4,71325E-05		
Ancho Final (mm)	Dist. entre mordazas (mm)	Velocidad de ensayo (mm/min)	Longitud final (mm)
11,04	80	5	85,2
Alargamiento máximo (mm)	Deformación unitaria		
	0,065		
Carga máxima (kN)	Carga máxima (N)	Carga elástica (kN)	Carga elástica (N)
2,752224963	2752,224963	1,30661515	1306,61515
Tensión máxima (Pa)	Tension máxima (MPa)	Tensión elástica (Pa)	Tensión elástica (MPa)
58393358,35	58,39335835	27722169,41	27,72216941
Tensión 1 (MPa)	Tensión 2 (MPa)		
18	10		
	Módulo de Young (MPa)		
	2857,142857		
Deformación 1	Deformación 2		
0,007	0,0042		

Figura 59: Cálculos probeta de tracción de la pieza inyectada 2

Probeta en de la pieza inyectada 3:

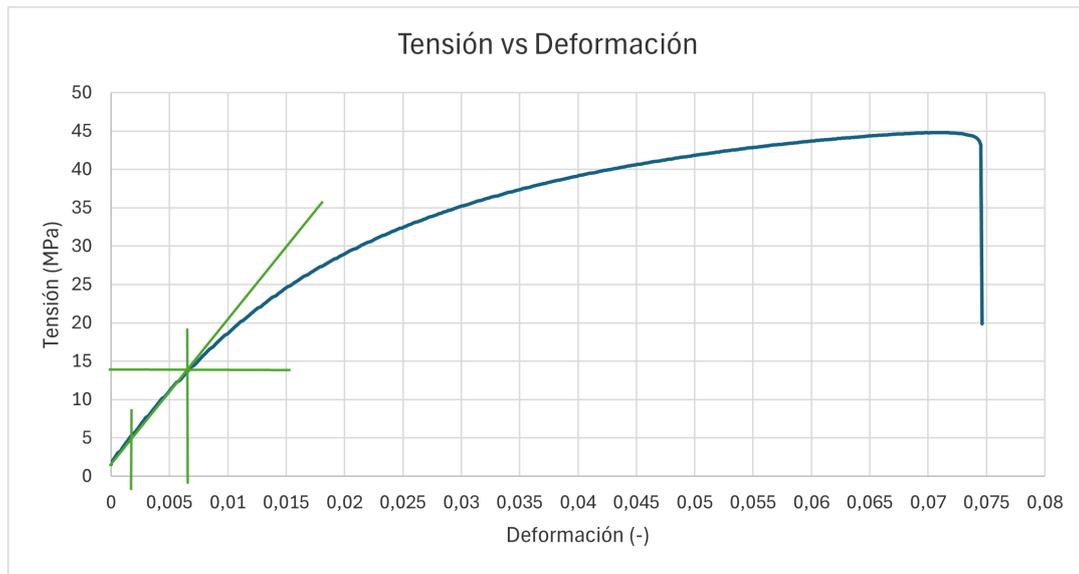


Figura 60: Curva tensión-deformación probeta de tracción de la pieza inyectada 3

Muestra	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Espesor final (mm)
TB3	3,41	10,74	3,21
Sección (mm²)	Sección (m²)		
36,6234	3,66234E-05		
Ancho Final (mm)	Dist. entre mordazas (mm)	Velocidad de ensayo (mm/min)	Longitud final (mm)
10,71	80	5	86,1
Alargamiento máximo (mm)	Deformación unitaria		
6,1	0,07625		
Carga máxima (kN)	Carga máxima (N)	Carga elástica (kN)	Carga elástica (N)
1,641176455	1641,176455	0,791001495	791,0014949
Tensión máxima (Pa)	Tensión máxima (MPa)	Tensión elástica (Pa)	Tensión elástica (MPa)
44812236,32	44,81223632	21598253,98	21,59825398
Tensión 1 (MPa)	Tensión 2 (MPa)		
14	5		
		Módulo de Young (MPa)	
		2307,692308	
Deformación 1	Deformación 2		
0,0061	0,0022		

Figura 61: Cálculos probeta de tracción de la pieza inyectada 3

B. Imágenes de la superficie de rotura de las probetas de la placa ensayadas a tracción

Probeta de tracción en dirección longitudinal 1 (TLT1):



Figura 62: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TLT1



Figura 63: Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción TLT1

Probeta de tracción en dirección longitudinal 2 (TLT2):



Figura 64: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TLT2

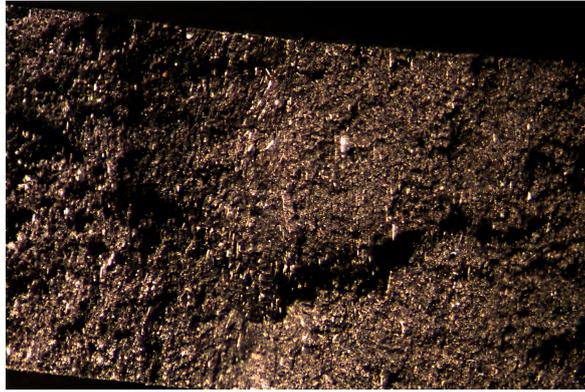


Figura 65: Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción TLT2

Probeta de tracción en dirección transversal 2 (TST2):



Figura 66: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TST2

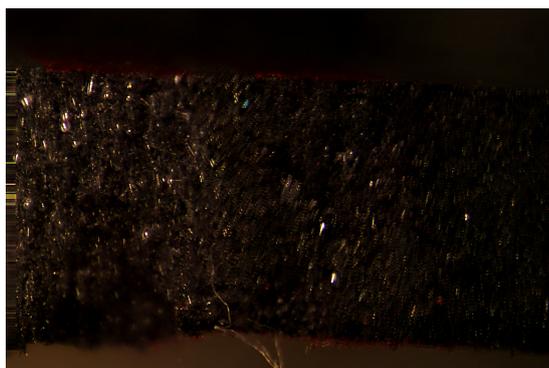


Figura 67: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TST2

C. Gráficas y cálculos de ensayos de tracción

C.1. Probetas de la placa extruida

Probeta de tracción en dirección longitudinal 1 (LT1):

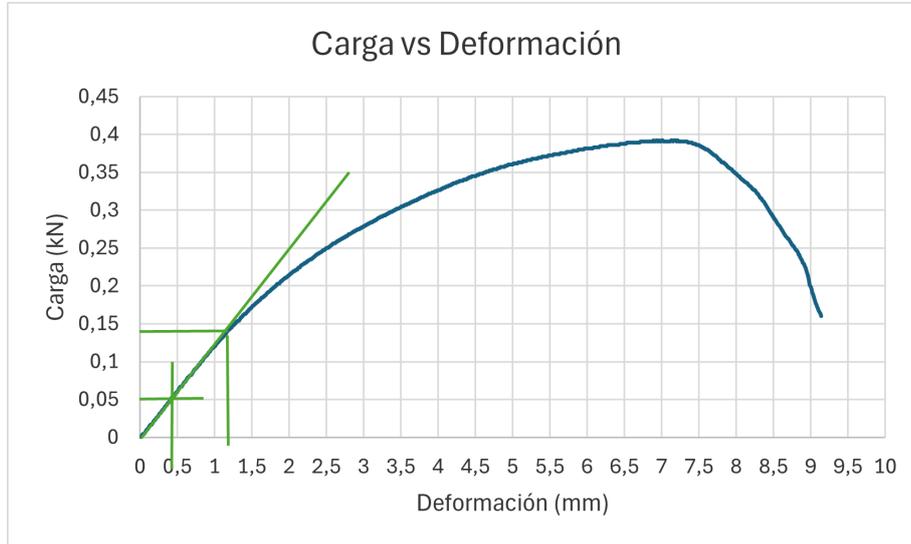


Figura 68: Curva carga-deformación probeta de flexión en dirección longitudinal LT1

Muestra	Unidad	Ancho	Espesor	C		
LT1	(mm)	10,65	4,47	2,235		
	(m)	0,01065	0,00447	0,002235		
Dist. entre apoyos	Unidad	Defor. Max.	Unidad	Carga elástica	Carga de rotura	
46	(mm)	9,137241737	(kN)	0,392425666	0,165154665	
0,046	(m)	0,009137242	(N)	392,4256658	165,1546654	
Momento de inercia (I)	Momento Flector Rotura	Momento Flector elástico				
7,92667E-11	4,512895157	1,899278653				
	Tensión de Rotura	Tensión elástica				
(Pa)	127245326,5	53551949,23				
(MPa)	127,2453265	53,55194923				
					Modulo elástico (Pa)	Modulo elástico (Mpa)
					3069888292	3069,888292
	Carga 1	Carga 2				
(kN)	0,05	0,14				
(N)	50	140				
				Pendiente (N/m)		
				120000		
	Deformación 1	Deformación 2				
(mm)	0,45	1,2				
(m)	0,00045	0,0012				

Figura 69: Cálculos probeta de flexión en dirección longitudinal LT1

Probeta de tracción en dirección longitudinal 2 (LT2):



Figura 70: Curva carga-deformación probeta de flexión en dirección longitudinal LT2

Muestra	Unidad	Ancho	Espesor	C		
LT2	(mm)	10,61	4,27	2,135		
	(m)	0,01061	0,00427	0,002135		
Dist. entre apoyos	Unidad	Deform. Max.	Unidad	Carga elástica	Carga de rotura	
46	(mm)	7,576480686	(kN)	0,342811668	0,153376492	
0,046	(m)	0,007576481	(N)	342,8116675	153,3764925	
Momento de inercia (I)	Momento Flector Rotura	Momento Flector elástico				
6,88363E-11	3,942334176	1,763829664				
	Tensión de Rotura	Tensión elástica				
(Pa)	122273840	54706226,42				
(MPa)	122,27384	54,70622642				
				Modulo elástico (Pa)	Módulo elástico (Mpa)	
				2945876220	2945,87622	
	Carga 1	Carga 2				
(kN)	0,05	0,13				
(N)	50	130		Pendiente (N/m)		
				100000		
	Deformación 1	Deformación 2				
(mm)	0,7	1,5				
(m)	0,0007	0,0015				

Figura 71: Cálculos probeta de flexión en dirección longitudinal LT2

Probeta de tracción en dirección longitudinal 3 (LT3):

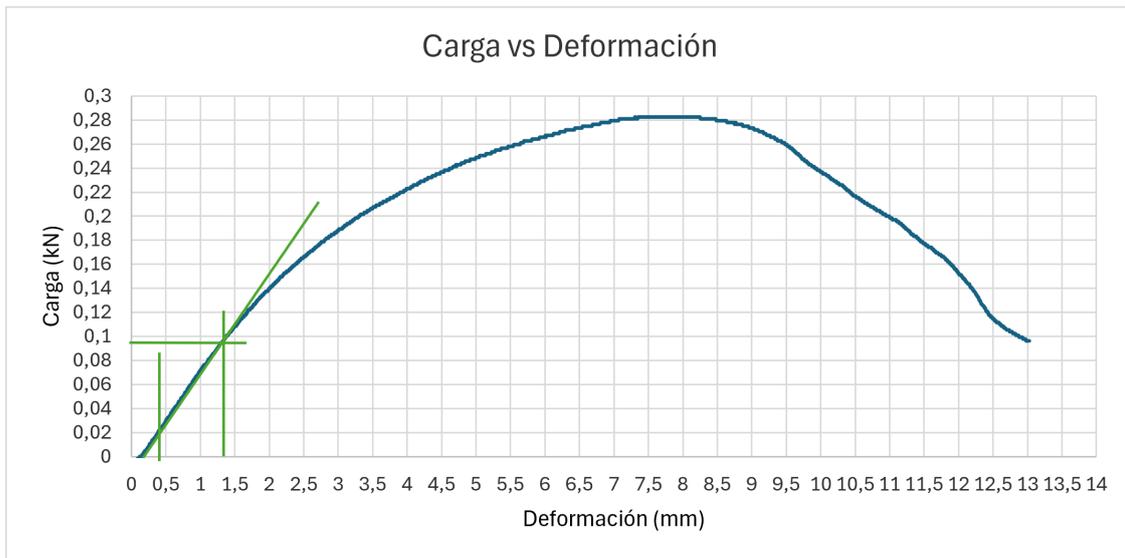


Figura 72: Curva carga-deformación probeta de flexión en dirección longitudinal LT3

Muestra	Unidad	Ancho	Espesor	C		
LT3	(mm)	10,66	3,96	1,98		
	(m)	0,01066	0,00396	0,00198		
Dist. entre apoyos	Unidad	Defor. Max.	Unidad	Carga elástica	Carga de rotura	
46	(mm)	7,525099027	(kN)	0,283509423	0,128659808	
0,046	(m)	0,007525099	(N)	283,5094232	128,6598083	
Momento de inercia (I)	Momento Flector Rotura	Momento Flector elástico				
5,51647E-11	3,260358366	1,479587796				
	Tensión de Rotura	Tensión elástica				
	117022403,2	53106100,66				
	(Pa)					
	117,0224032	53,10610066				
	(MPa)					
				Modulo elástico (Pa)	Módulo elástico (Mpa)	
				3063299748	3063,299748	
	Carga 1	Carga 2				
	(kN)	0,02	0,095			
	(N)	20	95			
				Pendiente (N/m)		
				83333,33333		
	Deformación 1	Deformación 2				
	(mm)	0,4	1,3			
	(m)	0,0004	0,0013			

Figura 73: Cálculos probeta de flexión en dirección longitudinal LT3

Probeta de flexión en dirección transversal 1 (ST1):

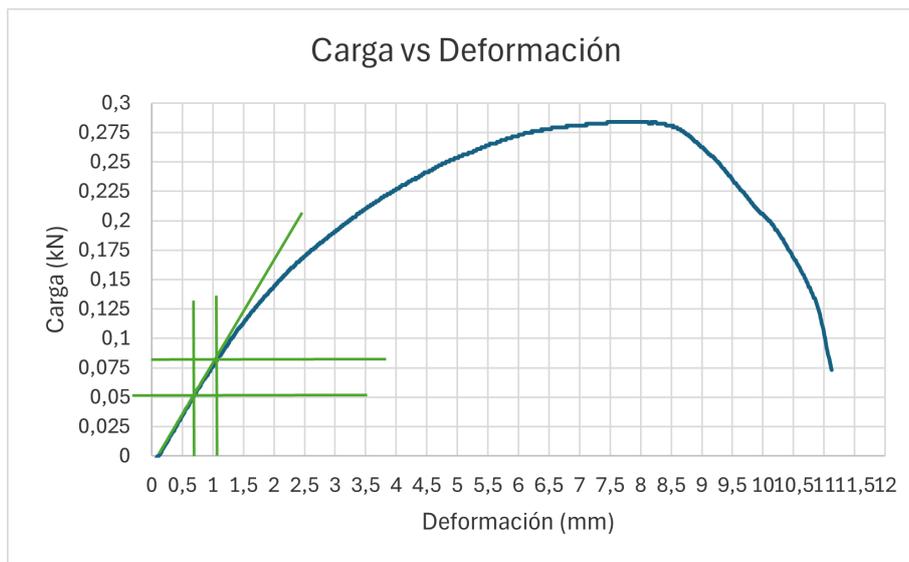


Figura 74: Curva carga-deformación probeta de flexión en dirección transversal ST1

Muestra	Unidad	Ancho	Espesor	C		
ST1	(mm)		10,65	4,19		2,095
	(m)		0,01065	0,00419		0,002095
Dist. entre apoyos	Unidad	Defor. Max.	Unidad	Carga elástica	Carga de rotura	
46	(mm)	7,731078949	(kN)	0,284994138	0,117024558	
0,046	(m)	0,007731079	(N)	284,9941376	117,0245576	
Momento de inercia (I)	Momento Flector Rotura	Momento Flector elástico				
6,52846E-11	3,277432582	1,345782412				
	Tensión de Rotura	Tensión elástica				
	105173751,1	43186543,4				
	(MPa)	105,1737511				
						Modulo elástico (Pa)
	Carga 1	Carga 2				2662410623
	(kN)	0,05				2662,410623
	(N)	50				
	Deformación 1	Deformación 2		Pendiente (N/m)		
	(mm)	0,7		85714,28571		
	(m)	0,0007				
		1,05				
		0,00105				

Figura 75: Cálculos probeta de flexión en dirección longitudinal ST1

Probeta de flexión en dirección transversal 3 (ST3):

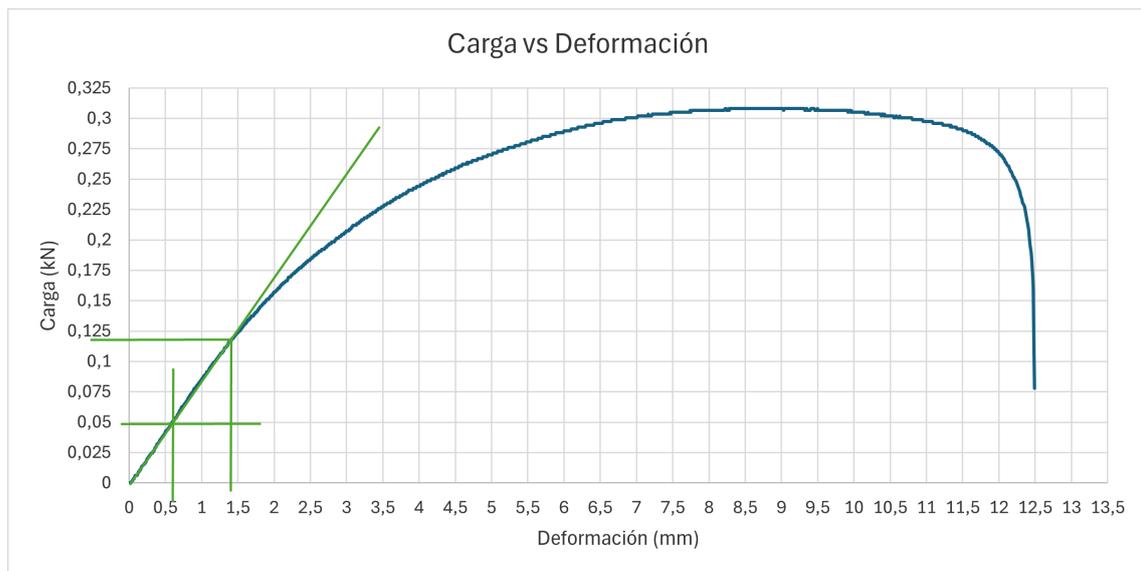


Figura 76: Curva carga-deformación probeta de flexión en dirección transversal ST3

Muestra	Unidad	Ancho	Espesor	C	
ST3	(mm)		10,7	4,1	2,05
	(m)		0,0107	0,0041	0,00205
Dist. entre apoyos	Unidad	Defor. Max.	Unidad	Carga elástica	Carga de rotura
46	(mm)	8,326853436	(kN)	0,309216511	0,141721477
0,046	(m)	0,008326853	(N)	309,2165106	141,7214768
Momento de inercia (I)	Momento Flector Rotura	Momento Flector elástico			
6,14546E-11	3,555989872	1,629796983			
	Tensión de Rotura	Tensión elástica			
	118620643,2	54366737,07			
	118,6206432	54,36673707			
				Modulo elástico (Pa)	Módulo elástico (Mpa)
				3079746232	3079,746232
	Carga 1	Carga 2			
	0,05	0,12			
	50	120			
			Pendiente (N/m)		
			93333,33333		
	Deformación 1	Deformación 2			
	0,65	1,4			
	0,00065	0,0014			

Figura 77: Cálculos probeta de flexión en dirección longitudinal ST3

Probeta de flexión en dirección transversal 4 (ST4):

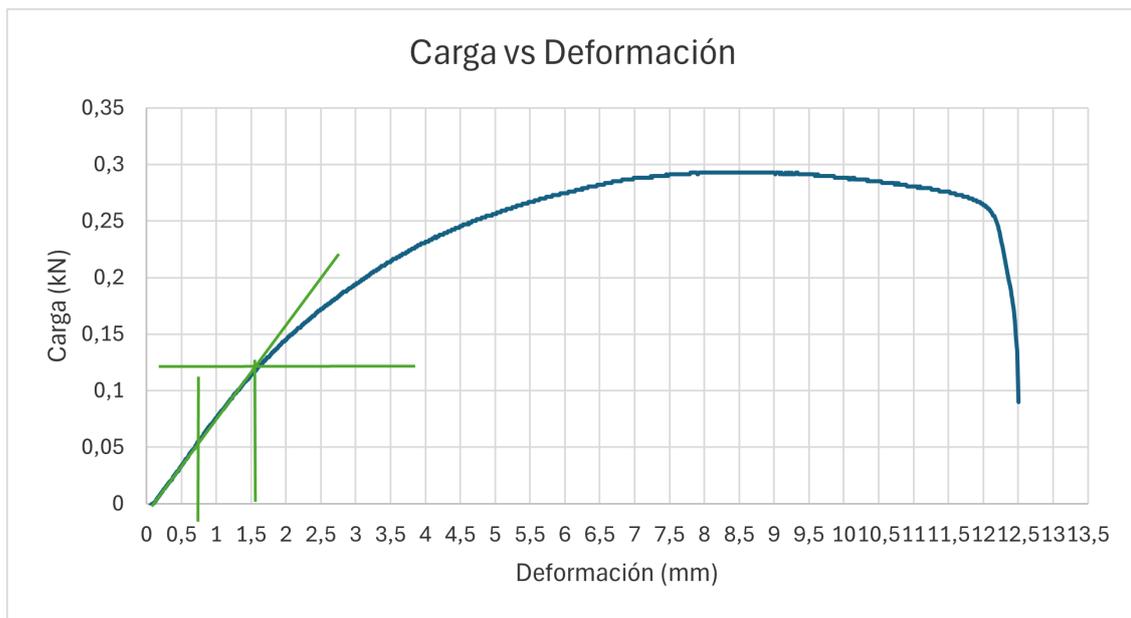


Figura 78: Curva carga-deformación probeta de flexión en dirección transversal ST4

Muestra	Unidad	Ancho	Espesor	C		
ST4	(mm)	10,71	4,09	2,045		
	(m)	0,01071	0,00409	0,002045		
Dist. entre apoyos	Unidad	Defor. Max.	Unidad	Carga elástica	Carga de rotura	
46	(mm)	8,432100892	(kN)	0,294101471	0,133733938	
0,046	(m)	0,008432101	(N)	294,1014712	133,733938	
Momento de inercia (I)	Momento Flector Rotura	Momento Flector elástico				
6,1063E-11	3,382166919	1,537940287				
	Tensión de Rotura	Tensión elástica				
(Pa)	113268774,3	51505622,1				
(MPa)	113,2687743	51,5056221				
	Modulo elástico (Pa)	Modulo elástico (Mpa)				
	2621752960	2621,75296				
	Carga 1	Carga 2				
(kN)	0,05	0,11				
(N)	50	110				
	Deformación 1	Deformación 2		Pendiente (N/m)		
				78947,36842		
(mm)	0,75	1,51				
(m)	0,00075	0,00151				

Figura 79: Cálculos probeta de flexión en dirección longitudinal ST4

C.2. Probetas de la pieza inyectada

Probeta de flexión en la pieza inyectada 1:

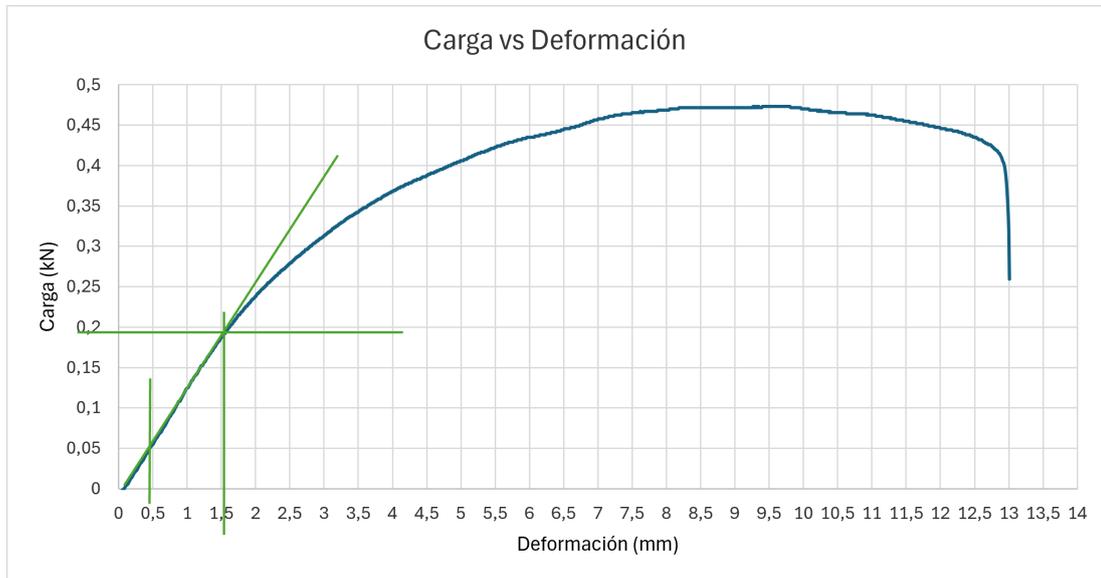


Figura 80: Curva carga-deformación probeta de flexión de la pieza inyectada 1

Muestra	Unidad	Ancho	Espesor	C		
1	(mm)		10,99	4,68	2,34	
	(m)		0,01099	0,00468	0,00234	
Dist. entre apoyos	Unidad	Defor. Max.	Unidad	Carga elástica	Carga de rotura	
46	(mm)	9,452230053	(kN)	0,474169199	0,240590519	
0,046	(m)	0,00945223	(N)	474,1691986	240,590519	
Momento de inercia (I)	Momento Flector Rotura	Momento Flector elástico				
9,38759E-11	5,452945784	2,766790969				
	Tensión de Rotura	Tensión elástica				
(Pa)	135923025,1	68966502,35				
(MPa)	135,9230251	68,96650235				
	Modulo elástico (Pa)	Modulo elástico (Mpa)				
	2994228322	2994,228322				
	Carga 1	Carga 2				
(kN)	0,05	0,19				
(N)	50	190				
	Deformación 1	Deformación 2				
(mm)	0,49	1,5				
(m)	0,00049	0,0015				
			Pendiente (N/m)			
			138613,8614			

Figura 81: Cálculos probeta de flexión de la pieza inyectada 1

Probeta de flexión en la pieza inyectada 3:

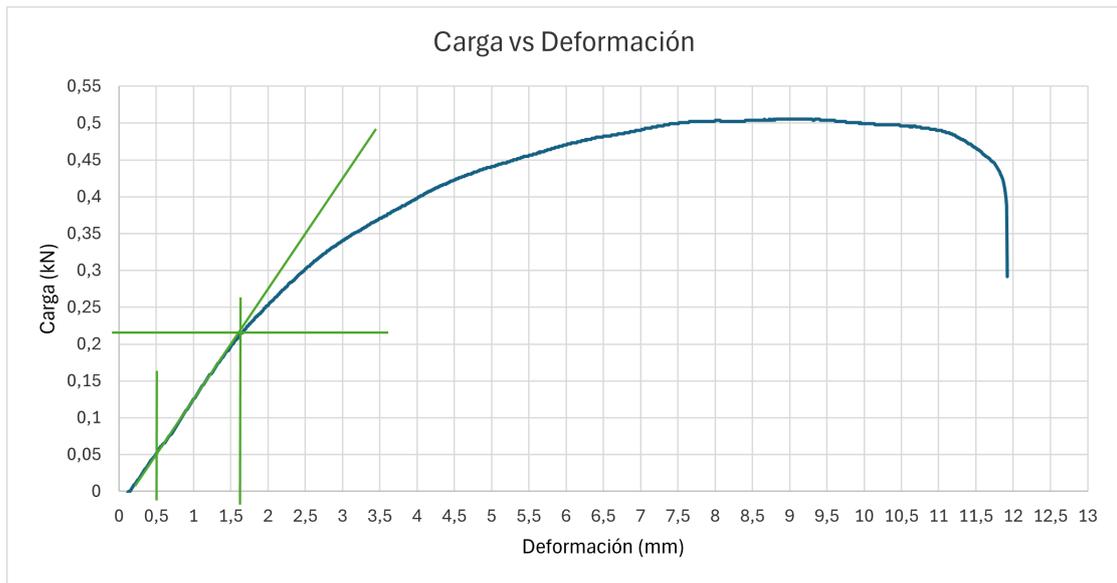


Figura 82: Curva carga-deformación probeta de flexión de la pieza inyectada 3

Muestra	Unidad	Ancho	Espesor	C		
3	(mm)		11,13	4,76	2,38	
	(m)		0,01113	0,00476	0,00238	
Dist. entre apoyos	Unidad	Deform. Max.	Unidad	Carga elástica	Carga de rotura	
46	(mm)	8,893112382	(kN)	0,506249769	0,278762716	
0,046	(m)	0,008893112	(N)	506,2497689	278,7627163	
Momento de inercia (I)	Momento Flector Rotura	Momento Flector elástico				
1,00031E-10	5,821872342	3,205771238				
	Tensión de Rotura	Tensión elástica				
(Pa)	138517568,3	76273681,45		Modulo elástico (Pa)	Modulo elástico (Mpa)	
(MPa)	138,5175683	76,27368145		3089072952	3089,072952	
	Carga 1	Carga 2				
(kN)	0,05	0,21				
(N)	50	210		Pendiente (N/m)		
				152380,9524		
	Deformación 1	Deformación 2				
(mm)	0,5	1,55				
(m)	0,0005	0,00155				

Figura 83: Cálculos probeta de flexión de la pieza inyectada 3

Probeta de flexión en la pieza inyectada 5:

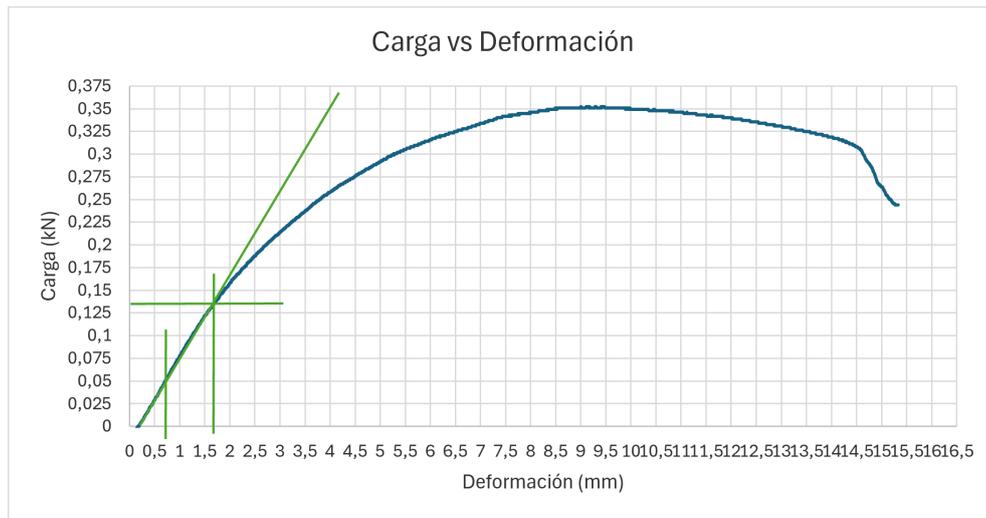


Figura 84: Curva carga-deformación probeta de flexión de la pieza inyectada 5

Muestra	Unidad	Ancho	Espesor	C		
5	(mm)	11,15	4,28	2,14		
	(m)	0,01115	0,00428	0,00214		
Dist. entre apoyos	Unidad	Deform. Max.	Unidad	Carga elástica	Carga de rotura	
46	(mm)	9,264031345	(kN)	0,352799776	0,159125479	
0,046	(m)	0,009264031	(N)	352,7997762	159,1254794	
Momento de inercia (I)	Momento Flector Rotura	Momento Flector elástico				
7,28492E-11	4,057197426	1,829943013				
	Tensión de Rotura	Tensión elástica				
(Pa)	119183184,8	53755933,79				
(MPa)	119,1831848	53,75593379				
				Modulo elástico (Pa)	Modulo elástico (Mpa)	
				2536171817	2536,171817	
	Carga 1	Carga 2				
(kN)	0,05	0,132				
(N)	50	132		Pendiente (N/m)		
				91111,11111		
	Deformación 1	Deformación 2				
(mm)	0,7	1,6				
(m)	0,0007	0,0016				

Figura 85: Cálculos probeta de flexión de la pieza inyectada 5

Probeta de flexión en la pieza inyectada 7:



Figura 86: Curva carga-deformación probeta de flexión de la pieza inyectada 7

Muestra	Unidad	Ancho	Espesor	C		
7	(mm)	11,04	4,06	2,03		
	(m)	0,01104	0,00406	0,00203		
Dist. entre apoyos	Unidad	Deform. Max.	Unidad	Carga elástica	Carga de rotura	
46	(mm)	7,401007876	(kN)	0,161073653	0,364475628	
0,046	(m)	0,007401008	(N)	161,0736527	364,4756276	
Momento de inercia (I)	Momento Flector Rotura	Momento Flector elástico				
6,15695E-11	4,191469717	1,852347006				
	Tensión de Rotura	Tensión elástica				
(Pa)	138196308,6	61073450,55				
(MPa)	138,1963086	61,07345055				
	Carga 1	Carga 2			Modulo elástico (Pa)	Módulo elástico (Mpa)
(kN)	0,05	0,15			3293565688	3293,565688
(N)	50	150		Pendiente (N/m)		
				100000		
	Deformación 1	Deformación 2				
(mm)	0,7	1,7				
(m)	0,0007	0,0017				

Figura 87: Cálculos probeta de flexión de la pieza inyectada 7

Probeta de flexión en la pieza inyectada 11:



Figura 90: Curva carga-deformación probeta de flexión de la pieza inyectada 11

Muestra	Unidad	Ancho	Espesor	C	
11	(mm)	10,93	4,14	2,07	
	(m)	0,01093	0,00414	0,00207	
Dist. entre apoyos	Unidad	Defor. Max.	Unidad	Carga elástica	Carga de rotura
46	(mm)	10,29718349	(kN)	0,270828884	0,122537646
0,046	(m)	0,010297183	(N)	270,8288842	122,5376456
Momento de inercia (I)	Momento Flector Rotura	Momento Flector elástico			
6,46309E-11	3,114532169	1,409182925			
	Tensión de Rotura	Tensión elástica			
(Pa)	99752370,97	45133371,65			
(MPa)	99,75237097	45,13337165		Modulo elástico (Pa)	Módulo elástico (Mpa)
				2178862510	2178,86251
	Carga 1	Carga 2			
(kN)	0,05	0,1			
(N)	50	100		Pendiente (N/m)	
				69444,44444	
	Deformación 1	Deformación 2			
(mm)	0,8	1,52			
(m)	0,0008	0,00152			

Figura 91: Cálculos probeta de flexión de la pieza inyectada 11

D. Imágenes de la superficie de rotura de las probetas de la placa ensayadas a impacto

Probeta de impacto en dirección longitudinal 1 (ILT1):



Figura 92: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de impacto ILT1

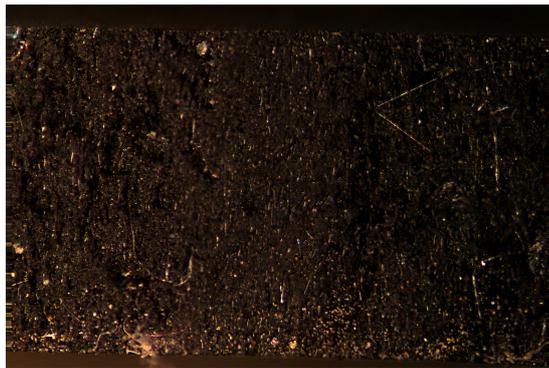


Figura 93: Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de impacto ILT1

Probeta de impacto en dirección longitudinal 2 (ILT2):

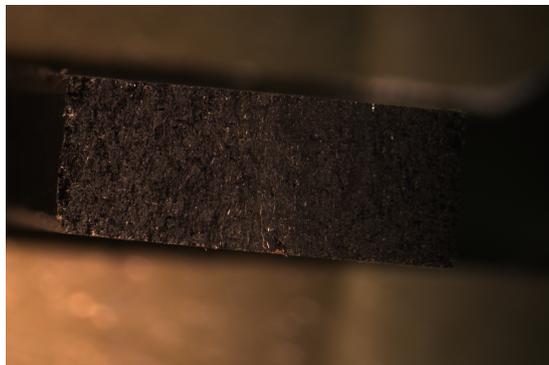


Figura 94: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de impacto ILT2



Figura 95: Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de impacto ILT2

Probeta de impacto en dirección longitudinal 3 (ILT3):



Figura 96: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de impacto ILT3



Figura 97: Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de impacto ILT3

E. Imágenes de la superficie de rotura de las probetas de la pieza inyectada ensayadas a tracción

Probeta de tracción de la pieza inyectada TB1:

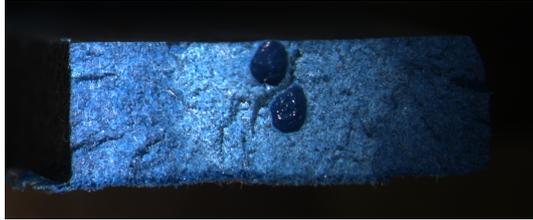


Figura 98: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TB1

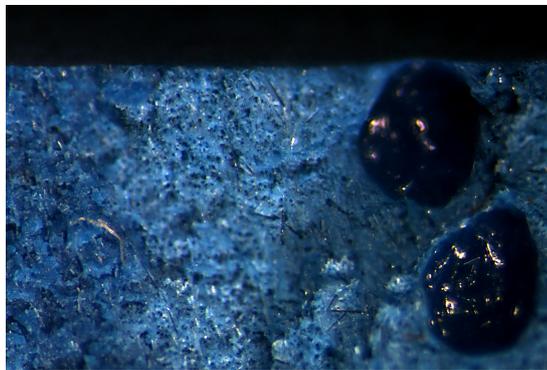


Figura 99: Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción TB1

Probeta de tracción de la pieza inyectada TB3:

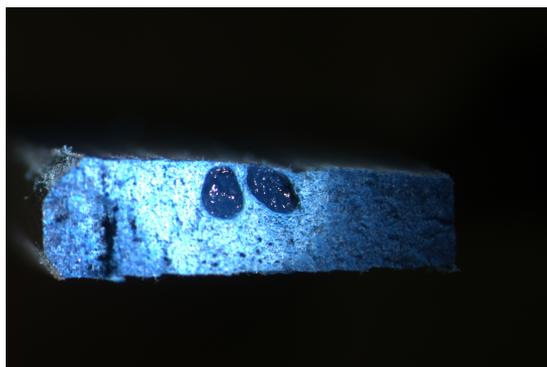


Figura 100: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TB3

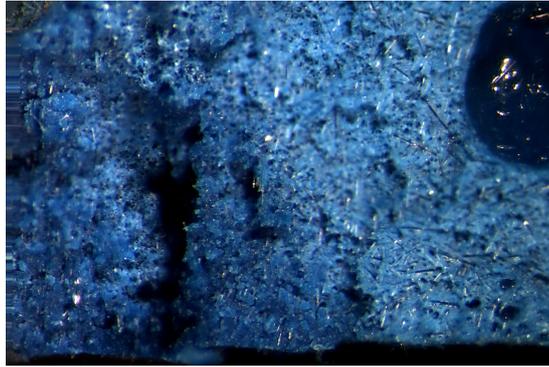


Figura 101: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción TB3

F. Imágenes de la superficie de rotura de las probetas de la pieza inyectada ensayadas a impacto

Probeta de impacto de la pieza inyectada P2:

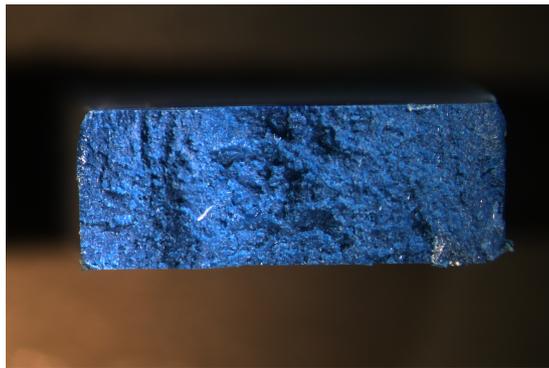


Figura 102: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción P2



Figura 103: Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción P2

Probeta de impacto de la pieza inyectada P6:

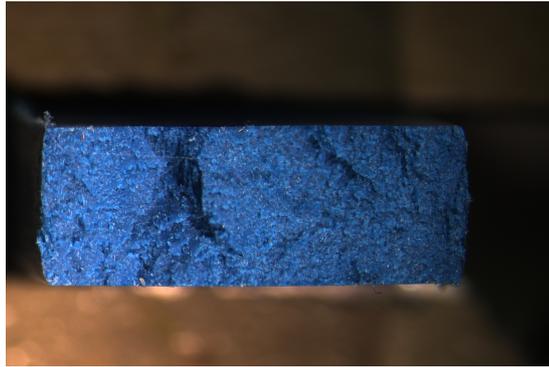


Figura 104: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción P4

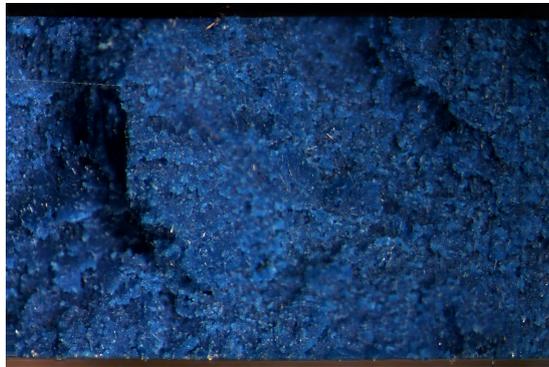


Figura 105: Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción P4

Probeta de impacto de la pieza inyectada P6:



Figura 106: Imagen microscopio x1 de la probeta de ensayo de tracción P6

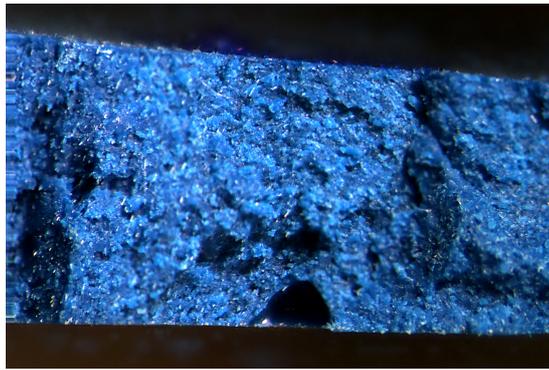


Figura 107: Imagen microscopio x2 de la probeta de ensayo de tracción P6

G. Resultados de ANSYS

Deformación 16 bares en material extruido.

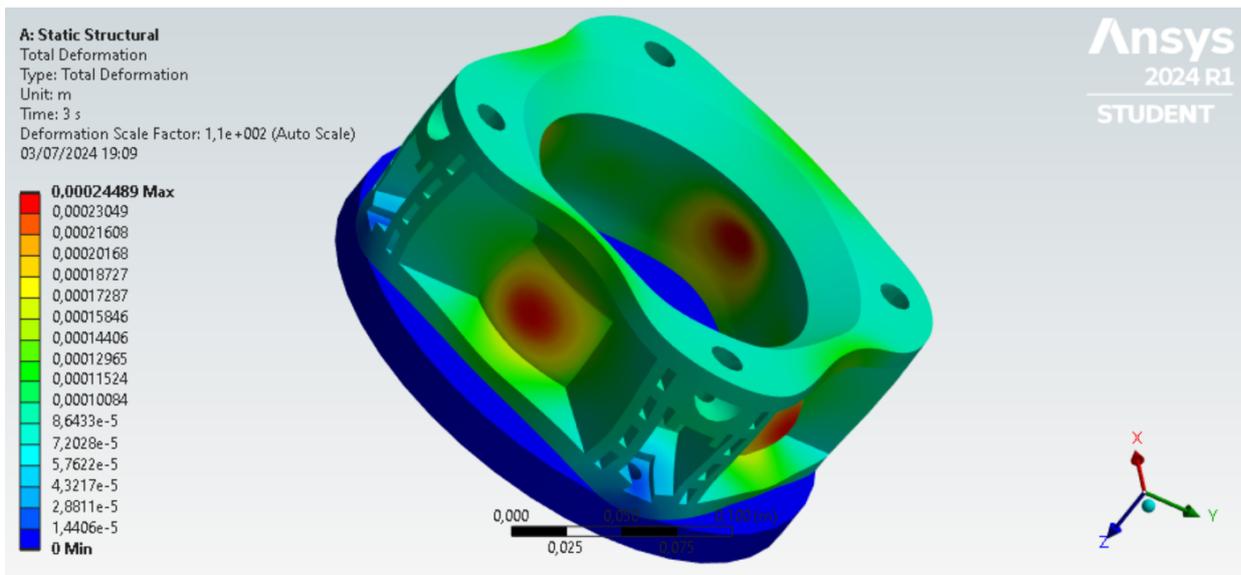


Figura 108: Deformación bajo una presión interna de 16 bares para el material extruido

Deformación 16 bares en material inyectado.

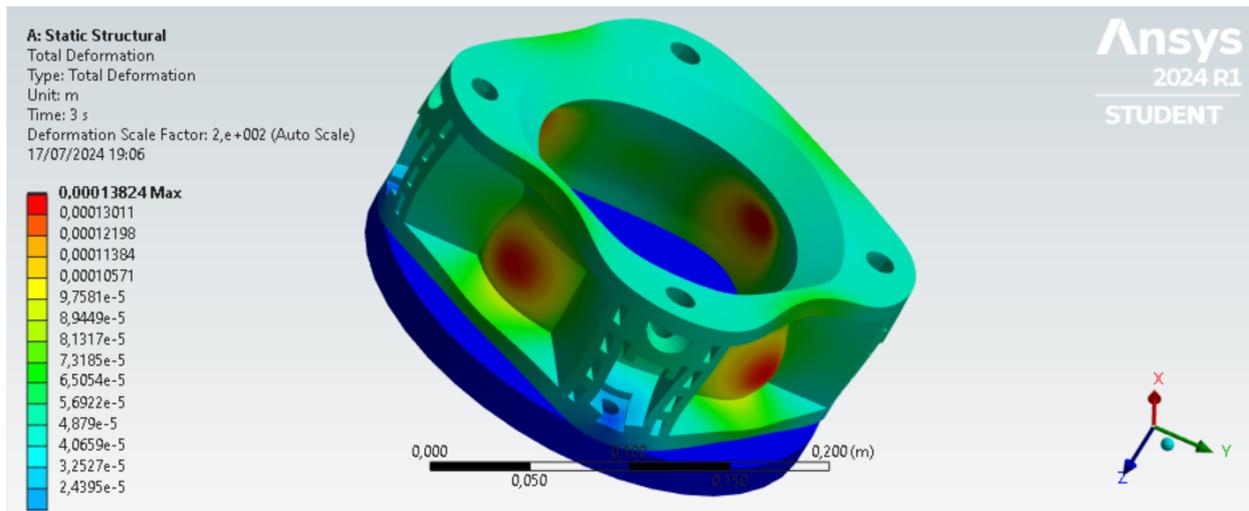


Figura 109: Deformación bajo una presión interna de 16 bares para el material inyectado

Tensión, 25 bares en material extruido.

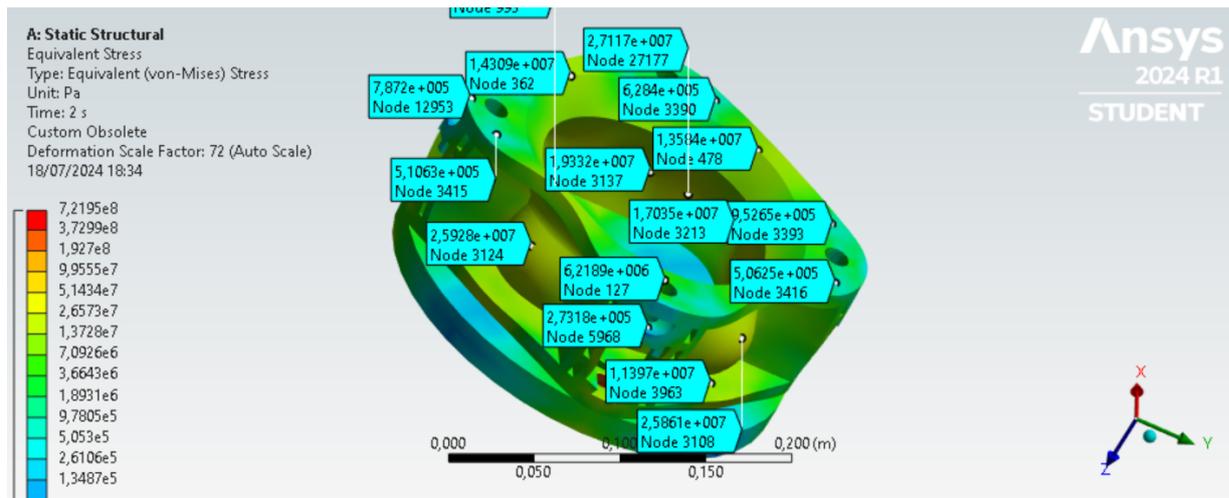


Figura 110: Resultados ANSYS. Tensión bajo una presión interna de 25 bares, propiedades de la pieza extruida

Bibliografía

Referencias

- [1] Solano García, L. *Procesos de fabricación mecánica*. Ed. Universitat Politècnica de València, 2020.
- [2] Callister, W.D. *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Ed. Reverté S.A., Barcelona.
- [3] Perez Aparicio, J.L. *Teoría de vigas en ingeniería aeroespacial*. Ed. Universitat Politècnica de València, 2021.
- [4] Ciencia y Tecnología de los Materiales. Práctica 6 <https://www.jmcacer.webs.ull.es>
- [5] Ensayo de Flexión, Universidad Distrital José de Caldas <https://www.rita.udistrital.edu.co>
- [6] International Organization for Standardization. *ISO 527-2:2012 Plastics – Determination of tensile properties – Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*. ISO, 2012.
- [7] Asociación Española de Normalización. *UNE-EN ISO 179-2:2021 Plásticos – Determinación de las propiedades de impacto Charpy – Parte 2: Condiciones de ensayo para plásticos moldeados y extrudidos*. AENOR, 2021.
- [8] Comité Europeo de Normalización. *EN 1074:2000 Válvulas para el abastecimiento de agua - Requisitos funcionales y métodos de ensayo*. CEN, 2000.