



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO MECÁNICO DE LA RESISTENCIA DE PROBETAS FABRICADAS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D CON FIBRA DE VIDRIO Y NYLON REFORZADO CON FIBRA DE CARBONO

Alumno: Jesús Águila Perea

Tutor: Prof. D. Alberto García Collado

Dpto: Ingeniería de los Procesos de Fabricación

Abril, 2022



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Informática

Don Alberto García Collado , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Estudio mecánico de la resistencia de probetas fabricadas mediante impresión 3D con fibra de vidrio y nylon reforzado con fibra de carbono, que presenta Jesús Águila Perea, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Abril de 2022

El alumno:

Jesús Águila Perea

El tutor:

Alberto García Collado

GARCIA
COLLADO
ALBERTO
JOSE -
77325627H

Firmado
digitalmente por
GARCIA COLLADO
ALBERTO JOSE -
77325627H
Fecha: 2022.05.25
13:16:31 +02'00'

Índice

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Impresión 3D.....	10
1.2. Impresión 3D de composites	14
1.3. Correlación digital de imágenes	18
2. OBJETIVOS	20
3. EQUIPAMIENTO.....	21
3.1. Impresora Markforged Mark Two y materiales de impresión	21
3.2. Equipo de ensayos.....	25
3.3. Equipo de toma de imágenes.....	28
3.4. Software.....	29
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	31
4.1. Ensayo a tracción.....	31
4.1.1. Diseño de probetas de tracción.....	33
4.1.2. Preparación del ensayo.....	38
4.1.3. Obtención y tratamiento de resultados	42
4.2. Ensayo a cortante	55
4.2.1. Diseño de probetas de cortante	58
4.2.2. Preparación del ensayo.....	63
4.2.3. Obtención y tratamiento de resultados	67
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
5.1. Ensayos de tracción	78
5.2. Ensayos de cortante.....	82
6. CONCLUSIONES.....	86
7. TRABAJOS FUTUROS	86
Referencias	89
Plano I: Probeta de ensayo a tracción	91
Plano II: Probeta de ensayo a cortante.....	92

Índice de ilustraciones

Ilustración 1.1: Elementos clave del proceso FDM	12
Ilustración 1.2: Esquema de las partes internas de trabajo del proceso FDM	12
Ilustración 1.3: Esquema del “raster angle” en impresión 3D	13
Ilustración 3.1: Impresora MarkForged Mark Two.....	21
Ilustración 3.2: Dimensiones de la impresora MarkForged Mark Two	21
Ilustración 3.3: Elementos impresora MarkForged Mark Two vista frontal	22
Ilustración 3.4: Elementos impresora MarkForged Mark Two vista superior	23
Ilustración 3.5: Bobina de Onyx.....	23
Ilustración 3.6: Caja a prueba de humedad Markforged	24
Ilustración 3.7: Orificio de salida de filamento de la caja Markforged.....	24
Ilustración 3.8: Bobina de fibra de vidrio	25
Ilustración 3.9: Elementos de la máquina de ensayos Instron 5569	26
Ilustración 3.10: Mordazas para ensayos de tracción	26
Ilustración 3.11: Mordazas para ensayos de cortante.....	27
Ilustración 3.12: Cámara Basler con trípode.....	28
Ilustración 3.13: Distintos tipos de patrones de relleno que ofrece el software Eiger	29
Ilustración 4.1: Gráfica tensión deformación para la determinación del módulo de elasticidad en tracción.....	32
Ilustración 4.2: Dimensiones de diseño permitidas de las probetas de ensayos de tracción.....	33
Ilustración 4.3: Pantalla previa a la impresión probeta tracción y de determinación de parámetros generales. Software Eiger	34
Ilustración 4.4: Vista interna del modelo probeta tracción. Software Eiger.....	35
Ilustración 4.5: Disposición de capas concéntricas de fibra de refuerzo en una probeta de tracción. Software Eiger	36
Ilustración 4.6: Disposición del refuerzo de fibra en una probeta de tracción con ángulo 45°. Software Eiger.....	36
Ilustración 4.7: Disposición de las capas que contienen fibra de refuerzo en una probeta de tracción con distribución de capas continuas a 0°. Software Eiger	37
Ilustración 4.8: Disposición de las capas que contienen fibra de refuerzo en una probeta de tracción con distribución de capas alternas a 0°. Software Eiger	37
Ilustración 4.9: Probeta de tracción antes del moteado	38
Ilustración 4.10: Probeta de tracción tras el moteado	39
Ilustración 4.11: Probeta de tracción en las mordazas, vista frontal.....	39
Ilustración 4.12: Probeta de tracción en las mordazas, vista lateral.....	39
Ilustración 4.13: Montaje de equipo de toma de imágenes para ensayos de tracción.....	40

Ilustración 4.14: Probeta de tracción en las mordazas antes del ensayo	41
Ilustración 4.15: Probeta de tracción en las mordazas una vez finalizado el ensayo	41
Ilustración 4.16: Rotura en una probeta de tracción para un ensayo válido	42
Ilustración 4.17: Rotura en una probeta de tracción para un ensayo no válido	42
Ilustración 4.18: Selección de area de análisis probeta de tracción. Software Vic-2D 6.....	47
Ilustración 4.19: Selección de subset, step y punto inicial probeta de tracción. Software Vic-2D 6	48
Ilustración 4.20: Progreso del análisis DIC probeta de tracción. Software Vic-2D 6.....	48
Ilustración 4.21: Colocación extensómetro digital probeta de tracción. Software Vic-2D 6 ...	49
Ilustración 4.22: Gráfica de deformación eyy. Software Vic-2D 6	49
Ilustración 4.23: Elementos de ensayo a cortante	56
Ilustración 4.24: Colocación de los extensómetros para cálculo de deformaciones en cortante	57
Ilustración 4.25: Gráfica tensión deformación para la determinación del módulo de elasticidad en cortante.....	57
Ilustración 4.26: Dimensiones de diseño permitidas en probetas de ensayos a tracción	58
Ilustración 4.27: Pantalla previa a la impresión probeta cortante y de determinación de parámetros generales. Software Eiger	60
Ilustración 4.28: Disposición de las capas que contienen fibra de refuerzo en una probeta de cortante con distribución de capas continuas a 45°/-45°. Software Eiger.....	60
Ilustración 4.29: Disposición de las capas de fibra de vidrio de refuerzo en una probeta de cortante con distribución de capas continuas a 45°/-45° en zona no perteneciente a la entalla. Software Eiger	62
Ilustración 4.30: Probeta de cortante antes del moteado	63
Ilustración 4.31: Probeta de cortante despues del moteado	63
Ilustración 4.32: Probeta de cortante en las mordazas	64
Ilustración 4.33: Montaje de equipo de toma de imágenes para ensayos de cortante	64
Ilustración 4.34: Probeta de cortante en las mordazas antes del ensayo	65
Ilustración 4.35: Probeta de cortante en las mordazas una vez finalizado el ensayo.....	66
Ilustración 4.36: Rotura en una probeta de cortante para un ensayo válido.....	66
Ilustración 4.37: Rotura en una probeta de cortante para un ensayo no válido.....	66
Ilustración 4.30: Selección de area de análisis probeta de cortante. Software Vic-2D 6	71
Ilustración 4.31: Selección de subset, step y punto inicial probeta de cortante. Software Vic-2D 6	71

Índice de gráficas

Gráfico 4.1: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°	43
Gráfico 4.2: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 0°	43
Gráfico 4.3: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 90°	44
Gráfico 4.4: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 90°	44
Gráfico 4.5: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°/90°	45
Gráfico 4.6: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 0°/90°	45
Gráfico 4.7: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 45°/-45°	46
Gráfico 4.8: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 45°/-45°	46
Gráfico 4.9: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°	50
Gráfico 4.10: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 0°	51
Gráfico 4.11: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 90°	51
Gráfico 4.12: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 90°	52
Gráfico 4.13: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°/90°	52
Gráfico 4.14: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 0°/90°	53
Gráfico 4.15: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 45°/-45°	53
Gráfico 4.16: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 45°/-45°	54
Gráfico 4.17: Gráfica tensión-deformación para cálculo del Módulo de Young configuración continua a 0°	54
Gráfico 4.18: Gráfica tensión-deformación y pendientes configuración continua a 0°	55
Gráfico 4.19: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°	67

Gráfico 4.20: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 0°	67
Gráfico 4.21: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 90°	68
Gráfico 4.22: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 90°	68
Gráfico 4.23: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°/90°	69
Gráfico 4.24: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 0°/90°	69
Gráfico 4.25: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 45°/-45°	70
Gráfico 4.26: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 45°/-45°	70
Gráfico 4.27: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°	73
Gráfico 4.28: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alaterna a 0°	73
Gráfico 4.29: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 90°	74
Gráfico 4.30: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 90°	74
Gráfico 4.31: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°/90°	75
Gráfico 4.32: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 0°/90°	75
Gráfico 4.33: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 45°/-45°	76
Gráfico 4.34: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 45°/-45°	76
Gráfico 4.35: Gráfica tensión-deformación y pendientes configuración continua a 90°	77
Gráfico 5.1: Diagrama de barras Módulo de Young para las distintas configuraciones de fibra en tracción	79
Gráfico 5.2: Diagrama de barras tensión máxima para las distintas configuraciones de fibra en tracción	80
Gráfico 5.3: Diagrama de barras deformación para las distintas configuraciones de fibra en tracción	81
Gráfico 5.4: Diagrama de barras Módulo de Young para las distintas configuraciones de fibra en cortante	83
Gráfico 5.5: Diagrama de barras tensión máxima para las distintas configuraciones de fibra en cortante	84

Gráfico 5.6: Diagrama de barras deformación para las distintas configuraciones de fibra en tracción85

Índice de tablas

Tabla 1.1: Comparación de métodos de impresión con propiedades mecánicas normalizadas con un contenido de volumen de fibra del 15%16

Tabla 1.2: Propiedades mecánicas individuales del onyx y nylon para procesos FDM17

Tabla 1.3: Propiedades mecánicas individuales de diferentes fibras continuas de refuerzo para procesos FDM18

Tabla 4.1: Distribución de las capas de fibra de vidrio en las probetas de tracción y ángulo de impresión.....38

Tabla 4.2: Distribución de las capas de fibra de vidrio en las probetas de cortante y ángulo de impresión.....62

Tabla 5.1: Propiedades mecánicas de las probetas de tracción para las diferentes configuraciones78

Tabla 5.2: Propiedades mecánicas de las probetas de cortante para las diferentes configuraciones82

RESUMEN

La impresión 3D es un tipo de tecnología basada en la fabricación aditiva que surgió en 1988 y que ha experimentado un gran desarrollo hasta nuestros días. Esta tecnología ha cobrado gran importancia en sectores como la arquitectura, ingeniería, automoción o medicina para la creación de prototipos rápidos o piezas finales, resultando de gran utilidad para la fabricación de geometrías complejas y a medida.

La tecnología FDM es el método de impresión más común y consiste básicamente en la deposición de un filamento termoplástico fundido capa a capa sobre una superficie de impresión para crear una geometría en 3D diseñada previamente mediante un software CAD.

Los avances de las tecnologías de impresión afectan especialmente a los materiales empleados en la creación de modelos. Cada vez más empresas están desarrollando materiales compuestos o “composites” para la impresión 3D de piezas. Desde el punto de vista de la ingeniería, un composite consiste en un material que ha sido reforzado con fibra. La fibra es uno de los elementos más utilizados como refuerzo en materiales compuestos, mejorando la resistencia, carga de rotura, rigidez y relación resistencia/peso por la introducción de fibras fuertes, rígidas y frágiles en una matriz más blanda y dúctil.

Las técnicas de fabricación aditiva tienen una similitud con las de los materiales compuestos tradicionales, ya que ambas se basan en apilar una serie de capas discretas. Por lo tanto, la adaptación exitosa de las tecnologías de impresión 3D a los materiales compuestos podría permitir un método simple de fabricación de compuestos con un menor costo de producción y un alto grado de automatización.

En el presente proyecto se evalúa el comportamiento de probetas fabricadas mediante FDM con onyx (nylon combinado con fibra de carbono) reforzado con fibra continua de vidrio para distintas configuraciones de impresión. Las propiedades mecánicas de las probetas se obtienen sometiéndolas a ensayos de tracción y cortante y el posterior análisis mediante correlación digital de imágenes.

ABSTRACT

3D printing is a technology based on additive manufacturing that emerged in 1988 and has undergone great development to this date. This technology has taken on importance in sectors such as architecture, engineering, automotive or medicine for the creation of quick prototypes or final parts, being very useful for manufacture of complex and custom geometries.

FDM technology is the most common printing method and basically consists of the deposition of a molten thermoplastic filament layer by layer on a printing surface to create a 3D geometry previously designed using CAD software.

The advances in printing technologies especially affect the materials used to create the models. Many companies are developing composite materials or “composites” for 3D printing parts. From an engineering point of view, a composite consists of a material that has been reinforced with fiber. Fiber is one of the elements most employed as reinforcement in composite materials, improving resistance, breaking load, stiffness and strength/weight ratio by introducing strong, rigid and brittle fibers into a softer and more ductile matrix.

Additive manufacturing techniques bear a similarity to traditional composite materials in that they are both based on stacking a series of discrete layers. Therefore, the successful adaptation of 3D printing technologies to composite materials could enable a simple method of manufacturing composites with lower production cost and a high automation.

This project evaluates the behavior of specimens manufactured by FDM with onyx (nylon combined with carbon fiber) reinforced with continuous glass fiber for different printing configurations. The mechanical properties of the specimens are obtained by subjecting them to tensile and shear tests and subsequent analysis by digital image correlation.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Impresión 3D

La impresión 3D se considera un tipo de tecnología basada en la fabricación aditiva. Partiendo de un modelo diseñado a través de ordenador, permite manipular automáticamente diferentes materiales y agregarlos capa a capa hasta llegar a construir un objeto en tres dimensiones. Difiere de los tradicionales mecanizados, que se basan principalmente en la eliminación de material por métodos tales como fresado, torneado, corte y perforación.

Esta tecnología es empleada para múltiples aplicaciones y procesos de producción en diferentes sectores como:

- Arquitectura y topografía: focalizada en la fabricación de maquetas, proporcionando un modelo rápido. También se están empezando a realizar construcciones usando impresoras de gran envergadura.
- Diseño e ingeniería: es uno de los principales focos a los que se dirige la impresión 3D. Ha permitido una reducción en los tiempos de fabricación de las piezas necesarias, tanto en modelos finales como en prototipos. Esta tecnología permite generar piezas sin tener que recurrir a moldes o piezas de muy alto coste.
- Aeronáutica y automoción: la impresión 3D es útil en la fabricación de piezas con estructuras aligeradas o canales internos y sometidos a frecuentes cambios de diseño.
- Medicina: se pueden fabricar implantes médicos personalizados, productos ortopédicos o herramientas quirúrgicas a medida.
- Otras aplicaciones: la industria del ocio es uno de los grandes nichos de mercado para la impresión 3D, principalmente debido a la personalización de piezas para uso personal. Ha permitido además a artistas experimentar con nuevas formas y técnicas para desarrollar proyectos casi imposibles. La fabricación aditiva está cobrando también fuerza en el sector educativo, joyería e incluso en la industria de la alimentación.

La impresión 3D en los diferentes sectores presenta entre otras, las siguientes ventajas:

- Posibilidad de reproducir cualquier geometría.
- Ofrecer una respuesta inmediata a las cambiantes necesidades del mercado.
- Posibilitar la diferenciación y personalización de productos por parte de los consumidores.
- Reducir errores de montaje.

La primera impresora 3D tuvo lugar a finales de 1988, por parte de la empresa 3D Systems. El método que empleaba esta impresora era la estereolitografía, técnica que utiliza el principio de la fotopolimerización para crear modelos 3D a partir de resinas sensibles a los rayos ultravioleta que se solidifican por el paso de una láser capa por capa.

De forma paralela Scott y Lisa Crump desarrollaron el proceso FDM (“Fused Deposition Modelling”), basado en una placa de impresión, una bobina de filamento y un extrusor. El filamento termoplástico es succionado y fundido por el extrusor de la impresora, que deposita el material de forma precisa, capa por capa, sobre la cama de impresión. Este método es el más común hoy día en impresión 3D.

A lo largo de los años se fueron creando otros modelos de impresoras, mejorando y desarrollando nuevos procesos. De forma paulatina, fue calando la idea de hacer accesible esta tecnología al ámbito personal.

A partir de 2005 tiene lugar el inicio del proyecto “RepRap”, extendiéndose el uso de impresoras de código abierto, lo que permite a los usuarios reproducir y mejorar impresoras 3D.

Hoy en día, el mercado de la impresión 3D se encuentra en plena expansión.

El primer paso es el diseño del objeto deseado mediante software CAD. Seguidamente, dicho archivo es convertido a formato .STL mediante un software denominado “slicer”, en el que se determinan los parámetros de impresión.

La impresión comienza cuando la máquina alcanza una temperatura suficiente para la fusión del material, y una vez calentada, se extruye un filamento de material de 1,75 mm o 2,85 mm de diámetro sobre la plataforma a través de la boquilla que se desplaza sobre los ejes X, Y y Z. La plataforma va descendiendo un nivel a medida que va completando las capas aplicadas hasta que se imprima el objeto, es decir, los objetos se imprimen desde abajo hacia arriba.

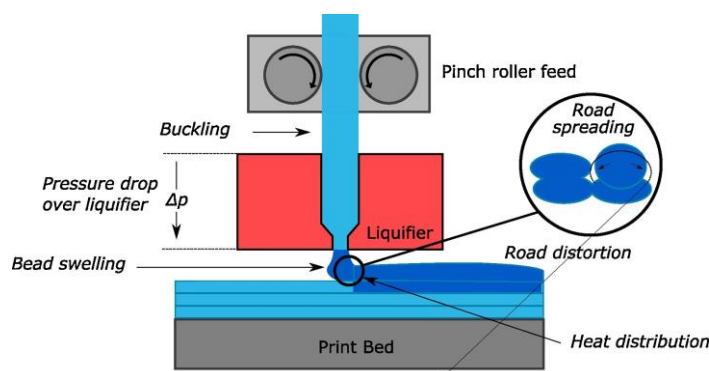


Ilustración 1.1: Elementos clave del proceso FDM. Fuente: “An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites”. ScienceDirect (Web)

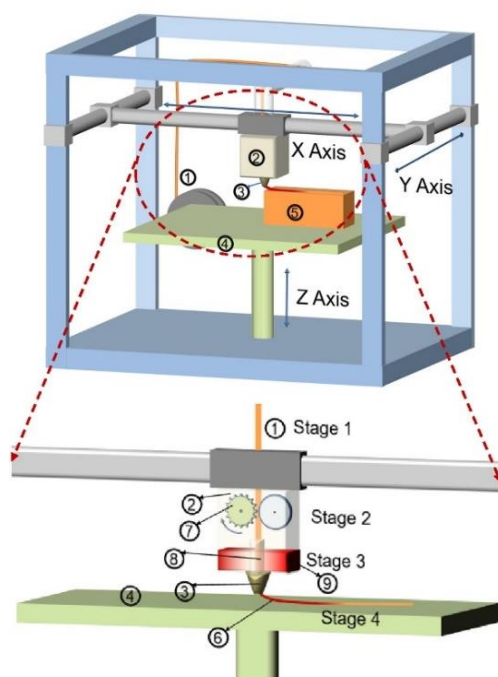


Ilustración 1.2: Esquema de las partes internas de trabajo del proceso FDM (1. Filamento de material, 2. cabezal de extrusión [7. motor de accionamiento dentado, 8. tubo guía, 9. elemento calefactor], 3. boquilla de extrusión, 4. cama de impresión, 5. pieza impresa, 6 filamento depositado). Fuente: “Carbon fibre damage during 3D printing of polymer matrix laminates using the FDM process”. ScienceDirect (Web)

Existen muchos parámetros a tener en cuenta durante el proceso de impresión, y éstos se determinan mediante el “slicer”. Se conoce como slicer al software que se

emplea para generar el G-Code de impresión de un modelo 3D, así se convierte un archivo 3D en formato .STL.

Entre los parámetros más importantes que se deben considerar para lograr una impresión exitosa y de buena calidad al utilizar una impresora de FDM destacan:

- Altura de capa (mm): define el espesor de cada capa en el eje Z. A menor espesor de capa, más definición, pero más tiempo de impresión.
- Perímetros: el número de perímetros define el espesor del contorno de la pieza.
- Densidad de relleno: se refiere al porcentaje relleno que se utilizará como estructura interna. La impresora crea una retícula que dará fortaleza a la pieza.
- Velocidad de impresión: la velocidad a la que se imprime la pieza. Se recomiendan velocidades lentas para obtener mejores acabados.
- Temperatura de impresión: temperatura que alcanza el noozle para fundir el filamento de material. Es importante regular bien la temperatura para mantener una correcta tasa de deposición de material fundido.
- Soportes: son necesarios cuando una parte de la pieza no se encuentra apoyada sobre la capa anterior.

Otra variable del proceso FDM es el “raster angle”, como se muestra en la *ilustración 1.3*, es el ángulo de la ruta de impresión con respecto al eje X de la cama de impresión y conduce a diferentes propiedades en las direcciones principales del material similar al comportamiento ortotrópico de los compuestos de fibra.

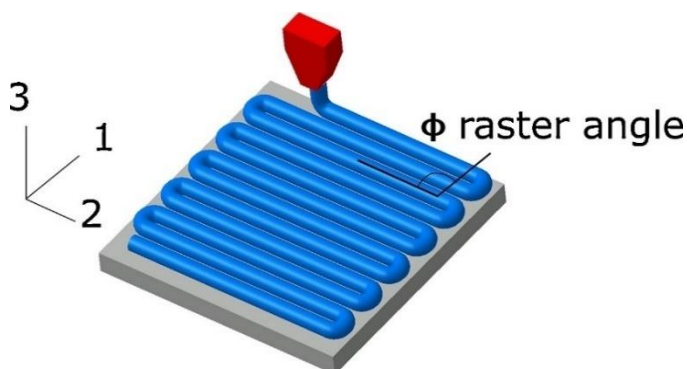


Ilustración 1.3: Esquema del “raster angle” en impresión 3D. “Fuente: An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites”. ScienceDirect (Web)

1.2. Impresión 3D de composites

Hoy día, los avances de las tecnologías de impresión afectan especialmente a los materiales empleados en la creación de modelos.

Las investigaciones sobre los materiales de impresión están relacionadas con las características de la maquinaria que los aplica y, sobre todo, con la finalidad de uso de los modelos que se imprimen.

Existe una gran variedad de materiales empleados en el proceso FDM, principalmente polímeros termoplásticos como el PLA, ABS, PET, Nylon, TPE, TPC o policarbonato. Existen otros muchos filamentos combinados basados en madera, metal o arcilla populares por su estética, y filamentos con características especiales, como filamentos biodegradables, conductores eléctricos, fosforescentes o magnéticos entre otros. Sin embargo, las propiedades mecánicas de los materiales termoplásticos utilizados son bajas en comparación con los materiales de ingeniería comunes.

Cada vez más empresas están desarrollando materiales compuestos para la impresión 3D de piezas, también denominados “composites”.

La impresión 3D de composites es muy beneficiosa para la fabricación de piezas ligeras que requieran gran resistencia. Las fibras agregan dicha resistencia a una parte concreta de la pieza sin aumentar significativamente el peso.

Un material compuesto se produce cuando dos o más materiales se unen para dar una combinación de propiedades que no puede ser obtenida en los materiales originales. Desde el punto de vista de la ingeniería, este término se emplea con mayor frecuencia para hablar de un material que ha sido reforzado con fibra.

En los materiales compuestos se pueden identificar dos fases o componentes:

- Una fase discontinua y más rígida, que se denomina refuerzo.
- Otra fase continua y generalmente menos rígida, denominada matriz.

Las funciones del refuerzo son las de absorber las tensiones, incrementar la rigidez y la resistencia del compuesto. Por otro lado, el papel de la matriz es servir de transmisor de tensiones entre los elementos del refuerzo y actuar como ligante manteniendo el refuerzo en su posición fija.

Existen dos tipos de elementos de refuerzo:

- Refuerzos discontinuos.

Se pueden tener materiales de refuerzo discontinuo en forma de partícula, de plaqueta y en forma de fibra discontinua o fibra corta.

En general estos refuerzos solo se utilizan en aplicaciones de poca responsabilidad estructural.

Con el empleo de refuerzo en forma de partículas el aumento de propiedades no es muy significativo. Por el contrario, su comportamiento mecánico es isótropo y los materiales menos costosos y más fáciles de fabricar.

Con el uso de plaquetas como elemento de refuerzo el aumento de propiedades tampoco es elevado, aunque alcanzan mayores grados de compactación que los materiales compuestos reforzados con partículas.

Cuando se emplean fibras cortas como refuerzo de los materiales, la longitud de éstas determina las propiedades del material. Estos materiales tienen naturaleza anisótropa, ofreciendo excelentes propiedades en la dirección de las fibras.

- Refuerzos continuos.

Comparación de métodos de impresión con propiedades mecánicas normalizadas con un contenido de volumen de fibra del 15% La fibra es uno de los elementos más utilizados como refuerzo en materiales compuestos. Estos compuestos mejoran la resistencia, carga de rotura, rigidez y relación resistencia/peso por la introducción de fibras fuertes, rígidas y frágiles en una matriz más blanda y dúctil.

Las técnicas de fabricación aditiva tienen una similitud con las de los materiales compuestos tradicionales, ya que ambas se basan en apilar una serie de capas discretas. Por lo tanto, es razonable sugerir que la adaptación exitosa de las tecnologías de impresión 3D a los materiales compuestos podría permitir un método simple de fabricación de compuestos con un menor costo de producción y un alto grado de automatización.

Una empresa que desarrolla impresoras 3D comerciales capaces de procesar materiales compuestos continuos reforzados con fibra es MarkForged.

Las impresoras Mark One y Mark Two desarrolladas por MarkForged imprimen Nylon continuo reforzado con fibra de carbono con propiedades mecánicas un orden de magnitud superior a las impresoras 3D comunes.

	Método de impresión de fibra corta		Método de impresión de fibra continua	
Nombre de la marca	Nylforce		MarkForged	
Contenido de volumen de fibra	6%		27%	
Porosidad	1,1%		9%	
	<i>Medido</i>	<i>Normalizado</i>	<i>Medido</i>	<i>Normalizado</i>
Módulo de tracción [GPa]	1,85	4,6	62,5	46,9
Resistencia a la tracción [MPa]	33,5	83,8	968	726,0
Módulo de flexión [GPa]	3	7,5	41,6	31,2
Resistencia a la flexión [MPa]	55,3	138,3	485	363,8
Módulo de corte [GPa]	0,31	0,8	2,26	1,7
Resistencia al corte [MPa]	19	47,5	31.16	23,4

Tabla 1.1: Comparación de métodos de impresión con propiedades mecánicas normalizadas con un contenido de volumen de fibra del 15%. Fuente: "An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites". ScienceDirect (Web)

En el presente estudio se ha empleado onyx reforzado con fibras continuas de vidrio para la impresión de piezas realizadas con la impresora MarkForged Two.

El onyx es un material a base de nylon extremadamente rígido combinado con fibras de microcarbono. El material proporciona la dureza del nylon junto a la rigidez del plástico reforzado con fibra, además de resistencia al calor hasta 145°C.

La pieza final no requiere ningún procesamiento posterior ya que el onyx ofrece una superficie lisa y mate.

En la siguiente tabla se muestran las propiedades mecánicas del onyx en comparación con el nylon.

Composite Base	Test (ASTM)	Onyx	Nylon
Tensile Modulus (GPa)	D638	2.4	1.7
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	40	51
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	37	36
Tensile Strain at Break (%)	D638	25	150
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	71	50
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	3.0	1.4
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	145	41
Flame Resistance	UL94	—	—
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	330	110
Surface Resistance (Ω)	ANSI/ESD STM11.11 ³	—	—
Density (g/cm ³)	—	1.2	1.1

Tabla 1.2: Propiedades mecánicas individuales del onyx y nylon para procesos FDM. Fuente: “Material Datasheet: Composites”. Markforged (Web)

El material de refuerzo empleado es la fibra continua de vidrio cuyas propiedades aparecen en la siguiente tabla junto a otros tipos de fibra empleadas comúnmente.

Continuous Fiber	Test (ASTM)	Carbon	Kevlar®	Fiberglass
Tensile Strength (MPa)	D3039	800	610	590
Tensile Modulus (GPa)	D3039	60	27	21
Tensile Strain at Break (%)	D3039	1.5	2.7	3.8
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	540	240	200
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	51	26	22
Flexural Strain at Break (%)	D790 ¹	1.2	2.1	1.1
Compressive Strength (MPa)	D6641	320	97	140
Compressive Modulus (MPa)	D6641	54	28	21
Compressive Strain at Break (%)	D6641	0.7	1.5	—
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	105	105	105
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	960	2000	2600
Density (g/cm ³)	—	1.4	1.2	1.5

Tabla 1.3: Propiedades mecánicas individuales de diferentes fibras continuas de refuerzo para procesos FDM. Fuente: “Material Datasheet: Composites”. Markforged (Web)

La fibra de vidrio como refuerzo continuo es un material capaz de producir piezas 10 veces más resistentes que el ABS cuando se coloca en un material de base compuesta como el Onyx.

1.3. Correlación digital de imágenes

La Correlación Digital de Imágenes o DIC es una técnica óptica de campo completo que se emplea para la medición de desplazamientos y deformaciones.

La técnica consiste en tomar imágenes digitales durante un ensayo mecánico desde el estado inicial, que se considera el de referencia, hasta el estado final deformado y mediante la comparación de dichas imágenes se obtiene el campo completo de desplazamientos relativos.

Para la realización del ensayo, la superficie del espécimen debe tener un patrón de puntos para poder aplicar la técnica DIC. En general se aplica pintura en spray blanco sobre la superficie negra obteniendo un moteado aleatorio para generar el máximo contraste posible.

Tras preparar el espécimen, lo siguiente es la colocación de la cámara. La distancia en la que se ubica debe permitir que la imagen capturada sea del área de interés del ensayo. Una vez seleccionada la distancia, se debe alinear y colocar a la misma altura que la muestra.

Si es necesario, se puede colocar un foco de luz para identificar con mayor claridad el contraste entre las zonas blancas y negras.

Una vez tomadas las imágenes se utiliza un programa de posprocesado para analizarlas los resultados como Vic-2D.

Al analizar las imágenes se pueden obtener diversos resultados de interés:

- Representación de las deformaciones en un mapa de contorno.
- Animación de la evolución de las deformaciones.
- Valor promedio de deformaciones para un área determinada.
- Representación de deformaciones en ejes cartesianos.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente estudio es la caracterización mecánica de probetas de onyx impresas en 3D y la comparación de los efectos referentes a la disposición del refuerzo de fibra continua de vidrio.

Por otro lado, las motivaciones personales que impulsan la realización del proyecto son, en primer lugar, la representación del proceso completo desde que se diseña una pieza hasta la obtención de los resultados, adquiriendo los conocimientos necesarios para el diseño de una pieza en CAD, la determinación de los parámetros de impresión óptimos y el funcionamiento de una impresora 3D profesional, empleando nuevos materiales que podrán ser utilizados en la industria. Además, se pretende aprender la correcta realización de ensayos mecánicos de tracción y cortante y el posterior tratamiento de los datos recogidos para obtener las propiedades de las piezas impresas, ayudándose de la correlación digital de imágenes.

3. EQUIPAMIENTO

3.1. Impresora Markforged Mark Two y materiales de impresión

La MarkForged Mark Two es una impresora 3D desarrollada por el fabricante estadounidense MarkForged dedicada a la impresión profesional de piezas resistentes y versátiles.

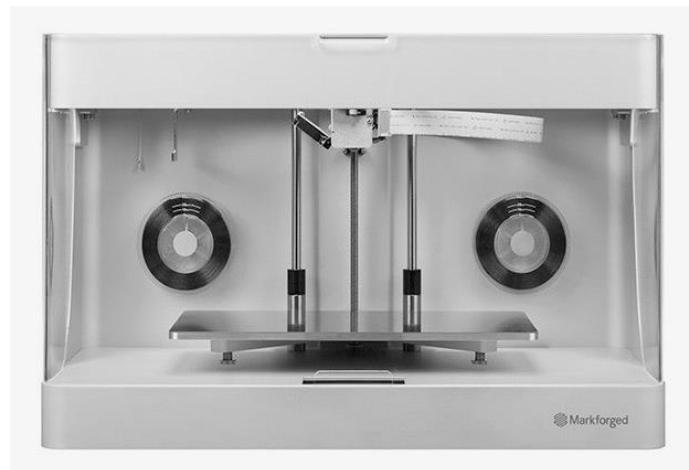


Ilustración 3.1: Impresora MarkForged Mark Two. Fuente: “Especificaciones del Producto: Mark Two”. Markforged (Web)

La impresora posee dos extrusores que le permite trabajar simultáneamente con dos materiales de impresión, uno a base de plástico (Nylon u Onix) y un material de refuerzo que puede ser filamento de fibra de carbono, fibra de vidrio o Kevlar entre otros.

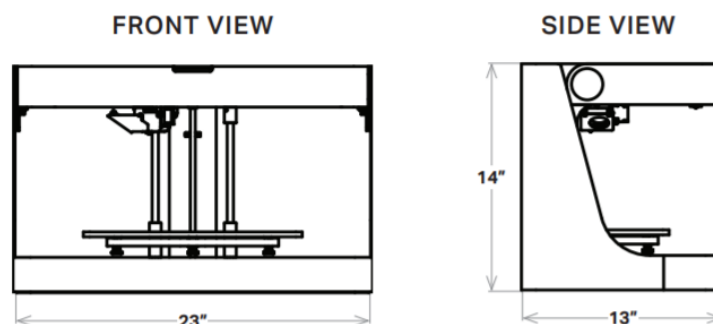


Ilustración 3.2: Dimensiones de la impresora MarkForged Mark Two. Fuente: “Especificaciones del Producto: Mark Two”. Markforged (Web)

Las características principales de la Mark Two son las siguientes:

- Proceso de impresión: extrusión de filamento fundido
- Dimensiones: 584x330x355 mm (23x13x14 in)
- Peso: 16 kg
- Altura de capa: 100 micras hasta 200
- Tamaño máximo de impresión: 320x132x154 mm
- Velocidad de impresión: 280 mm/s como máximo
- Múltiples geometrías de patrón de relleno

La impresora MarkForged Mark Two tiene dos boquillas de extrusión que brindan la capacidad de imprimir polímero termoplástico (nylon) seguido de una fibra (carbono, vidrio, Kevlar) reforzada para formar una matriz compuesta de polímero que tiene un peso ligero con propiedades mejoradas. El diámetro de la boquilla del filamento de nylon es de 0,4 mm, casi el mismo que el de las impresoras 3D de filamento de plástico convencionales.

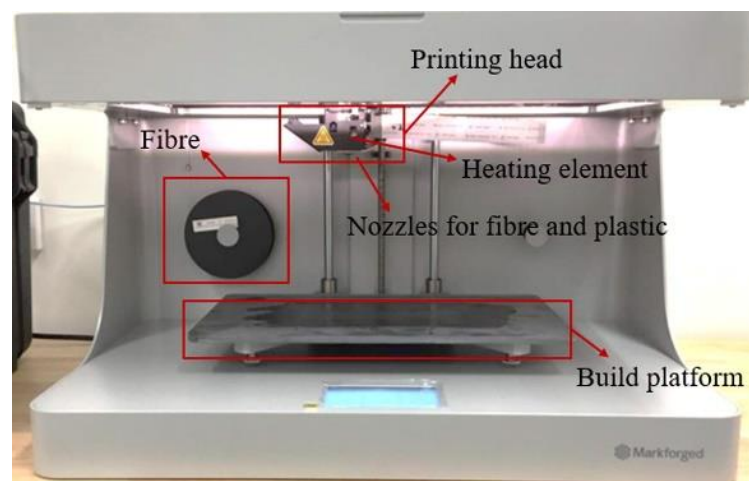


Ilustración 3.3: Elementos impresora MarkForged Mark Two vista frontal. Fuente: “Carbon fibre damage during 3D printing of polymer matrix laminates using the FDM process”. ScienceDirect (Web)

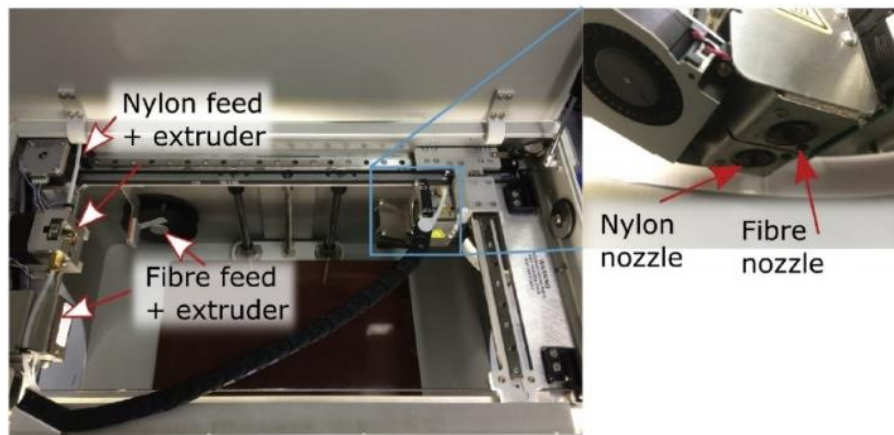


Ilustración 3.4: Elementos impresora MarkForged Mark Two vista superior. Fuente: “Carbon fibre damage during 3D printing of polymer matrix laminates using the FDM process”. ScienceDirect (Web)

Los materiales empleados para la impresión de las probetas de ensayos son el onyx y la fibra de vidrio como refuerzo.

Ambos materiales son desarrollados y comercializados por la empresa MarkForged.

Las bobinas de onyx adquiridas tienen 800 cm³ de material y para su uso deben ser almacenadas en una caja estanca a prueba de humedad, ya que si el material absorbe demasiada humedad puede afectar al proceso de impresión y provocar errores en la pieza final.



Ilustración 3.5: Bobina de Onyx. Fuente: Markforged (Web)



Ilustración 3.6: Caja a prueba de humedad Markforged. Fuente: Markforged (Web)

La caja posee un orificio de salida para introducir el filamento en el tubo de alimentación que va hasta el extrusor de la impresora.



Ilustración 3.7: Orificio de salida de filamento de la caja Markforged

El refuerzo de fibra continua utilizado es la fibra de vidrio CFF. Las bobinas de este filamento son fabricadas también por la empresa Markforged.



Ilustración 3.8: Bobina de fibra de vidrio. Fuente: Markforged (Web)

3.2. Equipo de ensayos

- Máquina de ensayos Instron 5569

Las máquinas de ensayos electromecánicos Instron se utilizan para probar una amplia gama de materiales en tensión o compresión.

Los bastidores de carga están diseñados para aplicar una carga a un espécimen a través de la cruceta móvil. El sistema de accionamiento desplaza la cruceta hacia arriba hasta aplicar una carga de tracción en la muestra, o hacia abajo para aplicar una carga de compresión.

Un transductor de carga mide la carga aplicada. La celda de carga convierte la carga en una señal eléctrica que recibe el sistema de control, que es capaz de monitorizarla. También se pueden utilizar transductores de deformación (extensómetros) para medir la deformación.

Los componentes principales de un sistema de prueba electromecánico Instron se observan en la imagen:

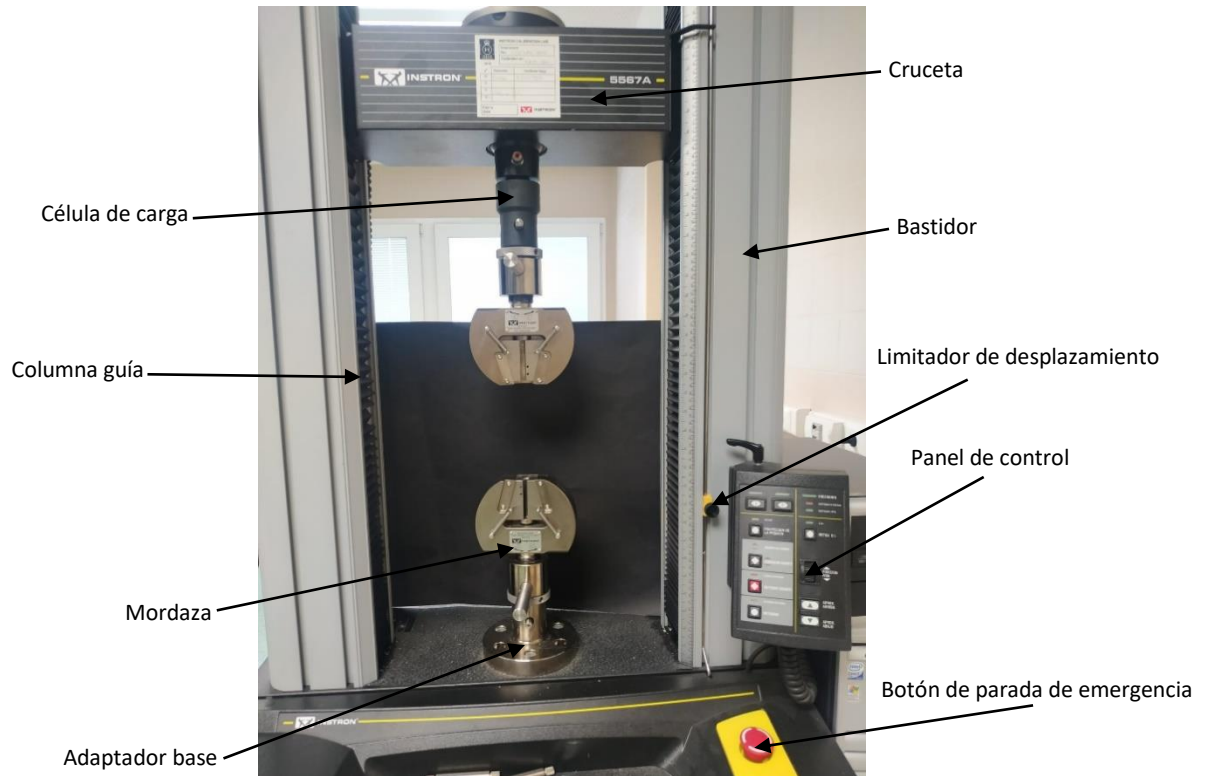


Ilustración 3.9: Elementos de la máquina de ensayos Instron 5569

- **Mordazas**

Dependiendo del ensayo que se realice se utilizarán unas mordazas u otras para sujetar las probetas, ambas cumpliendo con sus respectivas normas.

Las probetas usadas para tracción y cortante cumple con sus respectivas normas.



Ilustración 3.10: Mordazas para ensayos de tracción



Ilustración 3.11: Mordazas para ensayos de cortante

Las mordazas deben fijarse a la máquina de forma que el eje principal de la probeta coincida con la dirección de alargamiento a través de la línea central del montaje de sujeción.

3.3. Equipo de toma de imágenes

- Cámara de alta velocidad

Se usará una cámara marca Basler con resolución 1392 x 1040 píxeles para tomar las imágenes durante la realización de los ensayos para la realización de la correlación digital de imágenes.

La cámara incluye un trípode y elementos para su ajuste.



Ilustración 3.12: Cámara Basler con trípode

- Foco de luz

Ofrecerá una correcta iluminación de la probeta durante el ensayo para obtener imágenes con buena resolución, factor importante para la correlación digital de imágenes.

3.4. Software

- Eiger

La impresora Markforged tiene un software complementario llamado Eiger, donde se carga una pieza CAD como archivo STL (lenguaje de teselación estándar) y se definen los parámetros del proceso.

Este software es de "código cerrado" y no permite que el usuario ajuste los parámetros de impresión clave, como la temperatura, el movimiento de la boquilla o la velocidad de extrusión.

Para crear una pieza, hay varios parámetros de proceso disponibles en el software Eiger para elegir: tipo de fibra (carbono, Kevlar, fibra de vidrio), fracción de volumen de fibra, tipo de disposición de fibra (concéntrica e isotrópica, como se ve en la *ilustración 3.13*), patrón de relleno de matriz (rectangular, hexagonal, triangular y relleno sólido), densidad de relleno de matriz, ángulo de deposición de matriz y ángulo de deposición de fibra.

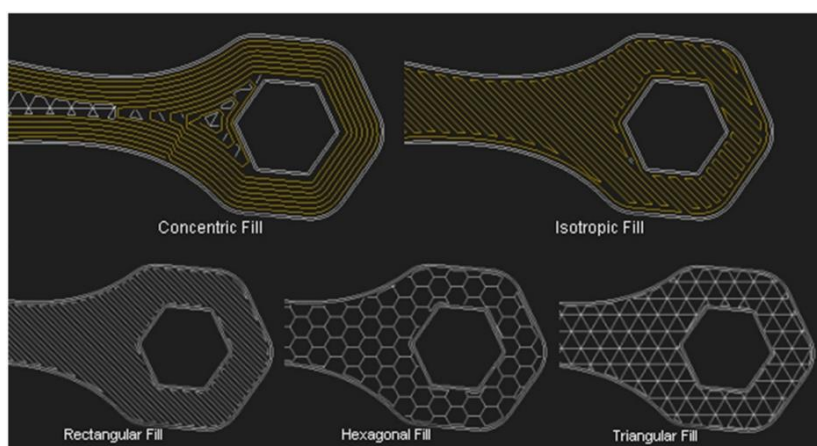


Ilustración 3.13: Distintos tipos de patrones de relleno que ofrece el software Eiger. Fuente: Eiger.io (Web)

- Instron Bluehill

Es el software que controla las máquinas de ensayos de Instron. Permite controlar los parámetros de ensayo como tipo de ensayo, velocidad, carga y precarga, etc. Además,



monitoriza los resultados del ensayo tomando mediciones de carga y deformación y permitir extraerlos.

- Basler Video Recording

Es un software de grabación de video y toma de secuencias de imágenes mediante una cámara conectada al ordenador.



Permite controlar parámetros como la saturación, la ganancia o el brillo entre otros para obtener una resolución de imagen que la haga adecuada para la correlación digital de imágenes.

- VIC-2D 6

VIC-2D es un sistema desarrollado por Correlated Solutions que se utiliza cuando es necesario medir las distribuciones de deformación en muestras planas de casi cualquier material.



Utiliza algoritmos de correlación de imágenes optimizados para proporcionar datos de deformación y desplazamiento bidimensionales sin contacto, de campo completo para ensayos mecánicos en muestras planas.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1. Ensayo a tracción

Para la realización de los ensayos de tracción se ha atendido a las normas UNE-EN ISO 527-1 y 527-4 que determinan las condiciones de ensayo para materiales compuestos termoplásticos y termoestables reforzados con fibra, que incorporan refuerzos unidireccionales o multidireccionales.

El ensayo consiste en que una probeta se somete a tracción a lo largo de su eje longitudinal principal, a velocidad de ensayo constante hasta que rompe. Durante este procedimiento se mide la carga que soporta la probeta y el alargamiento experimentado.

Para calcular los valores de esfuerzo se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

(Fórmula 4.1)

Donde:

σ es el valor del esfuerzo, expresado en megapascuales (MPa).

F es la carga aplicada, expresada en newtons (N)

A es el área de la sección transversal inicial de la probeta, expresada en milímetros cuadrados (mm²).

Para condiciones de ensayo en los que predomina una distribución homogénea de las deformaciones en la sección paralela de la probeta, se calculan los valores de deformaciones con la formula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0}$$

(Fórmula 4.2)

Donde:

ε es el valor de la deformación, expresado como una relación adimensional o como un porcentaje.

L_0 es la longitud de referencia de la probeta, expresada en milímetros (mm)

ΔL_0 es el incremento de la longitud de la probeta, expresada en milímetros (mm).

Estos valores de incremento de longitud de la probeta se pueden obtener mediante el uso de un extensómetro.

En este estudio las deformaciones se calcularán usando correlación digital de imágenes mediante VIC 2D-6, que es capaz de medir el incremento de longitud respecto a una longitud inicial usando unos extensómetros virtuales, calculando las deformaciones en la probeta.

Una vez calculados tanto los esfuerzos como la deformación, éstos se pueden representar gráficamente, obteniéndose una gráfica como la siguiente:

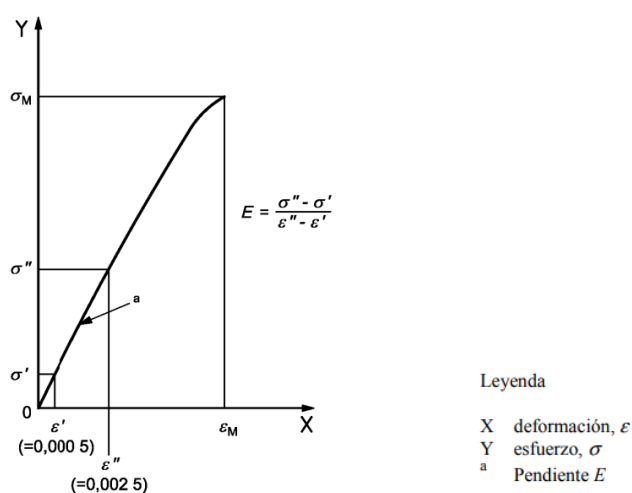


Ilustración 4.1: Gráfica tensión deformación para la determinación del módulo de elasticidad en tracción.

Fuente: UNE-EN ISO 527-4:1997. "Plastics. Determination of tensile properties"

Se calcula el módulo de elasticidad en tracción mediante la pendiente de una recta de regresión.

Mediante un equipo asistido por ordenador se aplica un método de regresión lineal aplicado a la parte de la curva situada entre los puntos σ' y σ'' , medidos respectivamente del valor de deformación $\varepsilon'=0,0005$ y $\varepsilon''=0,0025$.

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

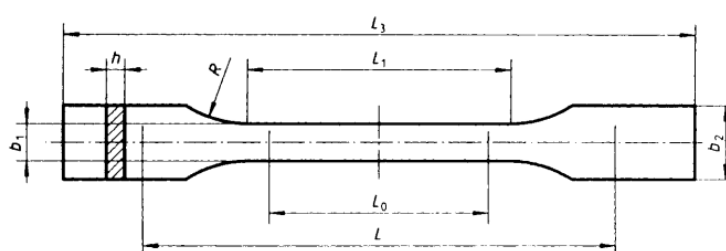
(Fórmula 4.3)

Donde $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ es la pendiente de una recta de regresión ajustada por mínimos cuadrados a la parte de la curva esfuerzo/deformación en el intervalo de deformación $0,0005 \leq \varepsilon \leq 0,0025$ expresada en megapascals (MPa).

4.1.1. Diseño de probetas de tracción

Las probetas a utilizar en el ensayo de tracción están fabricadas mediante FDM en la impresora Markforged Mark Two y están compuestas de Onyx como material principal y fibra continua de vidrio como material de refuerzo.

Para el diseño de las probetas se ha tenido en cuenta las dimensiones del equipo de ensayos disponible y atendiendo a la norma ISO 527-4 que indica las dimensiones permisibles para los especímenes.



Medidas en milímetros		
L_3	Longitud total	$\geq 150^{(1)}$
L_1	Longitud de la parte estrecha con bordes paralelos	$60 \pm 0,5$
R	Radio	$\geq 60^{(2)}$
b_2	Anchura en los extremos	$20 \pm 0,2$
b_1	Anchura en la parte estrecha	$10 \pm 0,2$
h	Espesor	2 a 10
L_0	Longitud de referencia (recomendada para extensómetros)	$50 \pm 0,5$
L	Distancia inicial entre las mordazas	115 ± 1

Ilustración 4.2: Dimensiones de diseño permitidas de las probetas de ensayos de tracción. Fuente: UNE-EN ISO 527-4:1997. "Plastics. Determination of tensile properties"

Las dimensiones de diseño pueden observarse en el plano que se encuentra en el *Anexo I: dimensiones de probetas para ensayos de tracción*.

En el presente estudio se pretende determinar las propiedades de tracción de las probetas para distintas distribuciones de la fibra de vidrio, que se configuran en el software Eiger.

El primer paso es el diseño de un modelo CAD atendiendo a las dimensiones del plano 1. Una vez realizado, se importará en formato *.stl a Eiger.

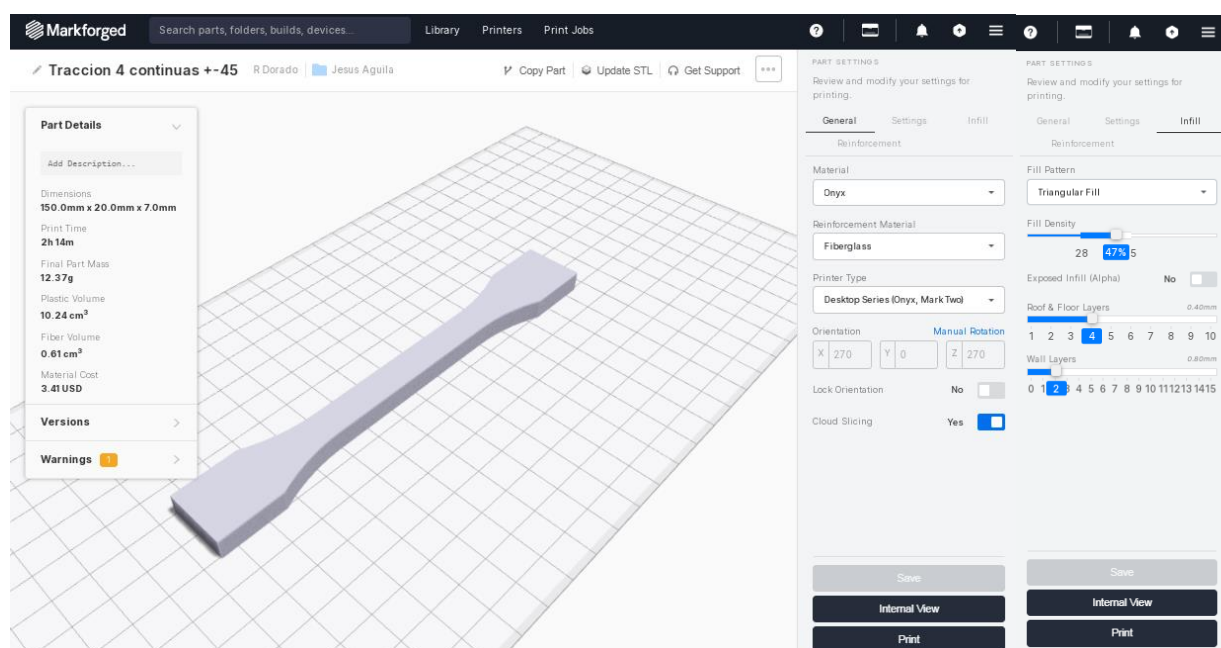


Ilustración 4.3: Pantalla previa a la impresión probeta tracción y de determinación de parámetros generales. Software Eiger

En el programa lo primero que aparece es una vista 3D del modelo importado y detalles como las dimensiones, el tiempo de impresión y la cantidad de material necesario. En los ajustes de la pieza se determinan los parámetros generales para todas las probetas.

Se eligen los materiales utilizados, Onyx como material principal y Fiberglass como material de refuerzo, y el tipo de impresora, en este caso Onyx Mark Two.

Posteriormente se seleccionan los parámetros de relleno. El patrón utilizado es triangular, con una densidad de relleno del 47%. Las capas de techo y suelo serán 4

y las capas de los muros laterales 2, siendo estas las capas recomendadas por Markforged.

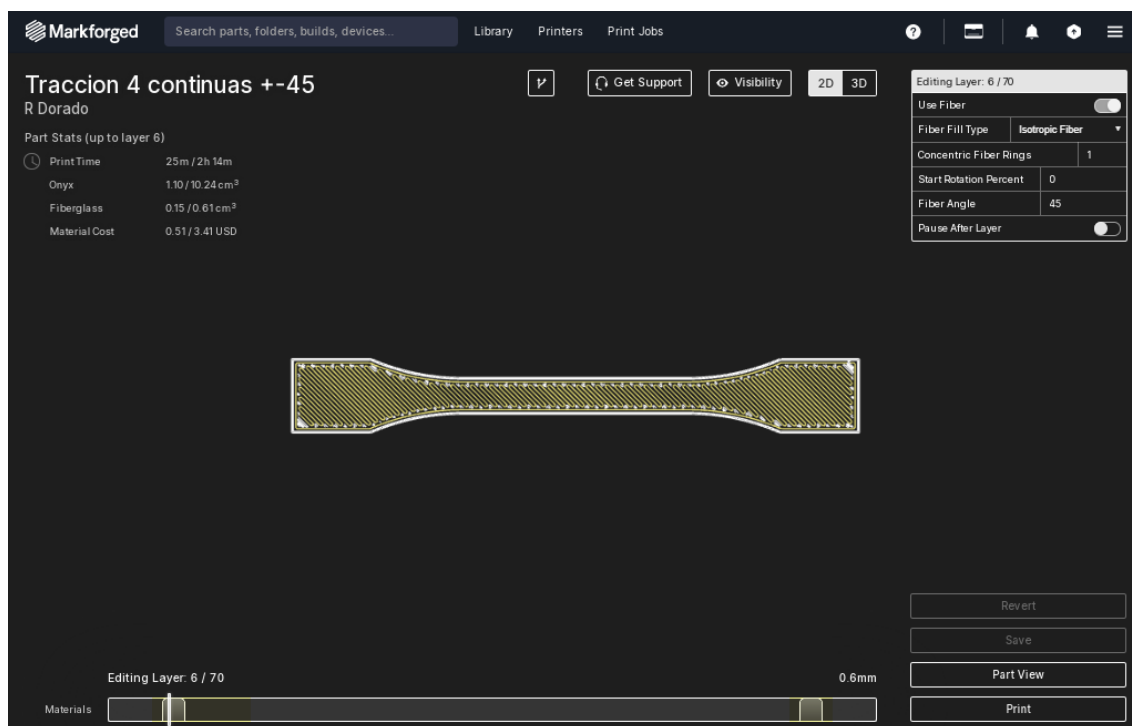


Ilustración 4.4: Vista interna del modelo probeta tracción. Software Eiger

Una vez seleccionados los parámetros generales se pasa a una vista interna del modelo.

Una de las principales ventajas de este software es que permite elegir la configuración de la fibra de refuerzo para cada una de las capas.

En la pestaña de edición de la capa ofrece la posibilidad de elegir si se desea añadir fibra y determinar sus parámetros.

El primer parámetro a determinar es el tipo de relleno de la fibra. Los dos métodos principales para colocar fibra se conocen como concéntrico e isotrópico.

La fibra concéntrica se coloca a lo largo de las paredes de una pieza, así, el software crea un patrón de anillos de fibra concéntricos a lo largo de todas las paredes dentro de una capa. Este tipo de relleno principalmente ayuda a resistir la flexión sobre el eje Z y fortalece las paredes contra la deformación.

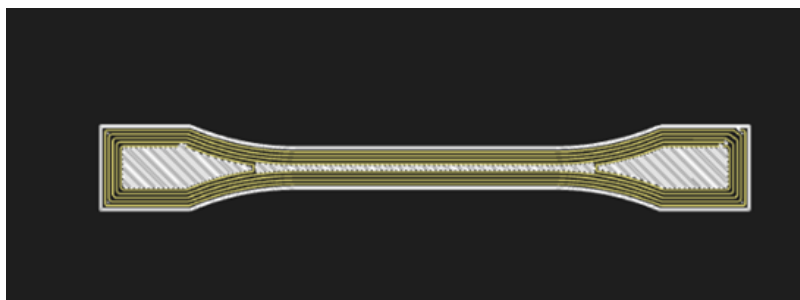


Ilustración 4.5: Disposición de capas concéntricas de fibra de refuerzo en una probeta de tracción.

Software Eiger

Por otro lado, el patrón isotrópico crea un tejido de fibra que alterna 45 grados en cada capa, aunque el ángulo de rotación puede ajustarse manualmente. Las capas de fibra de relleno isotrópica resisten la flexión en el plano XY. Este patrón también permite a los usuarios configurar y modificar anillos de fibra concéntricos, por lo que es una excelente opción para la resistencia universal.

En segundo lugar, se indican el número de anillos de fibra concéntricos que se desean.

Para este estudio en el que se desea estudiar la resistencia para diferentes ángulos de fibra y distribución de capas no será necesario elegir más de un anillo concéntrico.

El siguiente parámetro de impresión es el porcentaje de rotación de inicio de la fibra. Se recomienda variar este porcentaje entre cada capa sucesiva de fibra incrementándolo entre un 2% y 3% para evitar los espacios de fibra en el relleno.

Por último, se selecciona el ángulo de disposición de la fibra continua en cada capa o “raster angle”.

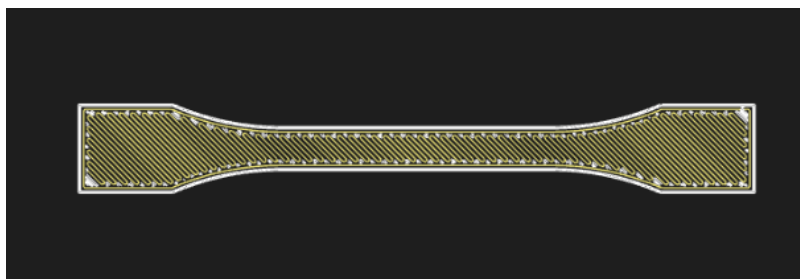


Ilustración 4.6: Disposición del refuerzo de fibra en una probeta de tracción con ángulo 45°. Software

Eiger

Además del ángulo de fibra continua, el otro parámetro de estudio es la distribución de las capas de dicha fibra. En el caso de las probetas de tracción se atiende a dos configuraciones, proyección de capas de fibra de forma alterna o continua.

En ambos casos se desea que la probeta tenga una distribución de capas de fibra de vidrio simétrica respecto a la capa central de Onyx. La primera capa de fibra se ubica después de cinco capas de Onyx sin refuerzo, mientras que la última, se imprime antes de las últimas cinco capas de Onyx.

En el caso de la configuración continua, las capas de fibra de vidrio se imprimen de forma sucesiva una capa tras la otra.

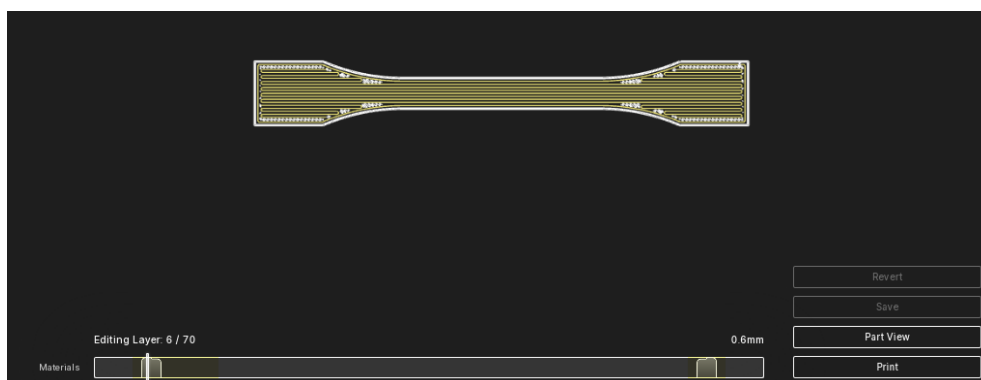


Ilustración 4.7: Disposición de las capas que contienen fibra de refuerzo en una probeta de tracción con distribución de capas continuas a 0°. Software Eiger

Para el caso de la configuración alterna, entre cada capa de fibra de refuerzo hay una capa de Onyx.

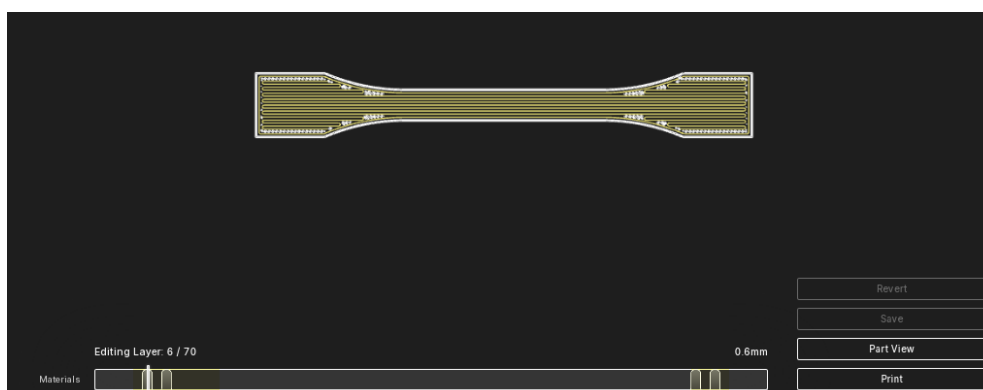


Ilustración 4.8: Disposición de las capas que contienen fibra de refuerzo en una probeta de tracción con distribución de capas alternas a 0°. Software Eiger

En la siguiente tabla se muestra un resumen de la distribución de la fibra de vidrio en las 70 capas que constituyen las distintas probetas de tracción empleadas.

Capas fibra vidrio/ángulo	Configuración de capas fibra de vidrio	Capas con refuerzo de fibra	Ángulo de impresión de capas
4 capas 0°	Continua	6, 7, 64, 65	0, 0, 0, 0
	Alternativa	6, 8, 63, 65	0, 0, 0, 0
4 capas 45/-45°	Continua	6, 7, 64, 65	45, -45, -45, 45
	Alternativa	6, 8, 63, 65	45, -45, -45, 45
4 capas 0/90°	Continua	6, 7, 64, 65	0, 90, 90, 0
	Alternativa	6, 8, 63, 65	0, 90, 90, 0
4 capas 90°	Continua	6, 7, 64, 65	90, 90, 90, 90
	Alternativa	6, 8, 63, 65	90, 90, 90, 90

Tabla 4.1: Distribución de las capas de fibra de vidrio en las probetas de tracción y ángulo de impresión

4.1.2. Preparación del ensayo

En primer lugar, se preparan las probetas para la correcta realización del ensayo. Es necesario un patrón de puntos diferenciados sobre la superficie de ensayo para la posterior realización de la correlación digital de imágenes. Al ser las probetas de color negro se realiza un moteado con spray blanco.



Ilustración 4.9: Probeta de tracción antes del moteado



Ilustración 4.10: Probeta de tracción tras el moteado

A continuación, se colocan las probetas sobre las mordazas de tracción. Esta debe quedar bien sujeta, con una fuerza suficiente para evitar que resbale la mordaza, pero evitando una fuerza excesiva que produzca aplastamiento de la sección. También es importante colocar la probeta alineada, lo más recta posible para que coincida el eje longitudinal con la dirección de aplicación de la carga.



Ilustración 4.11: Probeta de tracción en las mordazas, vista frontal



Ilustración 4.12: Probeta de tracción en las mordazas, vista lateral

Una vez colocada correctamente la probeta se monta el equipo de grabación. Se sitúa la cámara a una distancia suficiente que permita grabar la probeta durante todo el ensayo.

La iluminación es importante para conseguir una buena resolución de la superficie moteada de la probeta. Para ello se coloca un foco, tratando de obtener una iluminación completa de la probeta y evitando sombras.

Una vez montado todo el equipo se procede a ajustar los parámetros del ensayo.



Ilustración 4.13: Montaje de equipo de toma de imágenes para ensayos de tracción

En el software Instron Bluehill se determina el tipo de ensayo y la velocidad, en este caso será un ensayo a tracción con una velocidad de alargamiento 1 mm/min.

Antes de iniciar el ensayo se aplica una precarga, de aproximadamente unos 100 Newton para eliminar valores residuales en el comienzo del ensayo.

Durante la realización del ensayo el programa monitoriza el tiempo transcurrido en segundos, el alargamiento producido en milímetros y la fuerza ejercida en Newton.

Una vez realizado todo lo anterior, se comienza a grabar el ensayo mediante el software Basler Video Recording, capturando un fotograma del ensayo cada segundo.

En el mismo programa se ajustan los parámetros de imagen óptimos que garanticen una buena captura de la secuencia de imágenes. Es importante elegir unos correctos niveles de ganancia, saturación, contraste y brillo para obtener la mejor resolución de imagen posible y un buen contraste entre la superficie de la probeta y el moteado, ya que esto es clave para obtener posteriormente unos correctos resultados en la correlación digital de imágenes.

Por último, después de haber realizado todos los preparativos anteriores se da inicio al ensayo.

El ensayo terminará cuando la probeta rompa a lo largo de su sección. En ese momento el valor de la fuerza registrada en el programa descenderá bruscamente, finalizando automáticamente el ensayo.



Ilustración 4.14: Probeta de tracción en las mordazas antes del ensayo

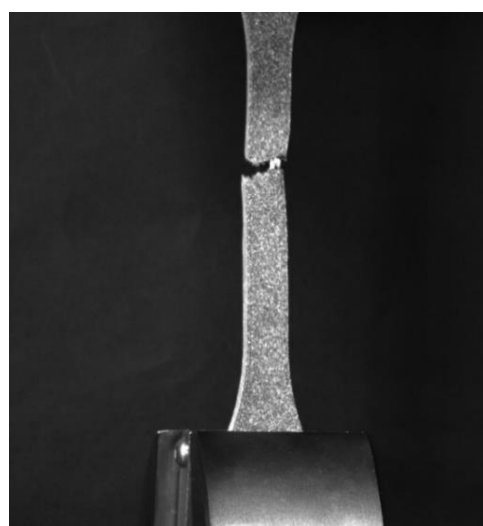


Ilustración 4.15: Probeta de tracción en las mordazas una vez finalizado el ensayo

Para que el ensayo sea considerado válido, la zona de rotura deberá estar situada en la zona central de la probeta. Un ejemplo de rotura válida es la *ilustración 3.16*, mientras que en la *ilustración 3.17* la rotura se produce en una zona muy cercana a la zona de sujeción de la mordaza.



Ilustración 4.16: Rotura en una probeta de tracción para un ensayo válido



Ilustración 4.17: Rotura en una probeta de tracción para un ensayo no válido

4.1.3. Obtención y tratamiento de resultados

Una vez concluido cada uno de los ensayos se obtiene unos resultados en distintos formatos.

El programa Instron Bluehill procesa los datos de extensión del espécimen y la carga aplicada para cada segundo de ensayo. Estos resultados se muestran de dos formas, en una tabla en formato de Excell con todos los datos registrados durante el ensayo, y en forma de gráfica que relaciona extensión frente a carga aplicada.

A continuación se muestran las gráficas de extensión (eje X en milímetros) frente a carga aplicada (eje Y en Newton) para las tres probetas ensayadas para cada configuración de capas de fibra de vidrio.

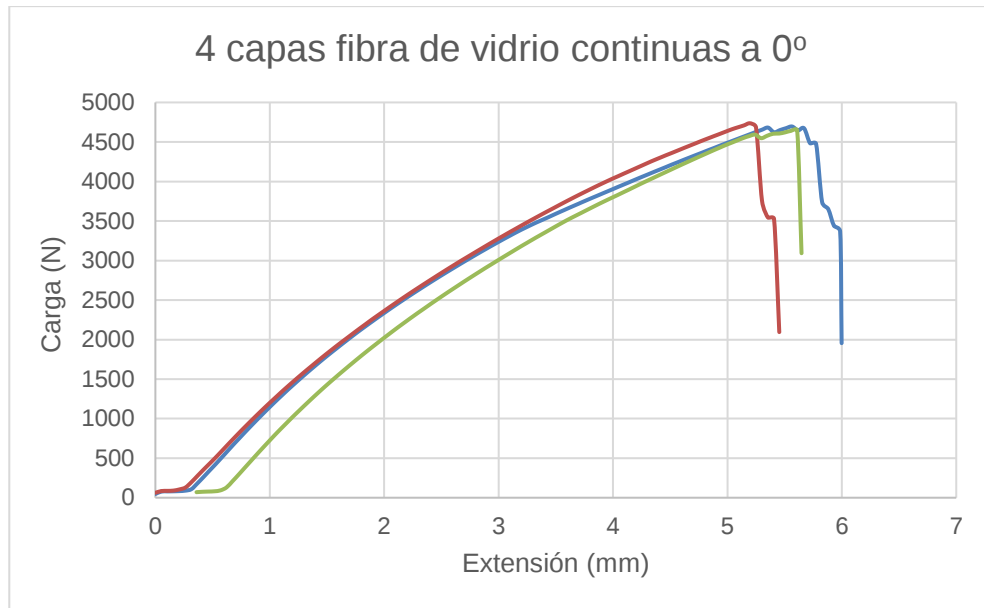


Gráfico 4.1: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°

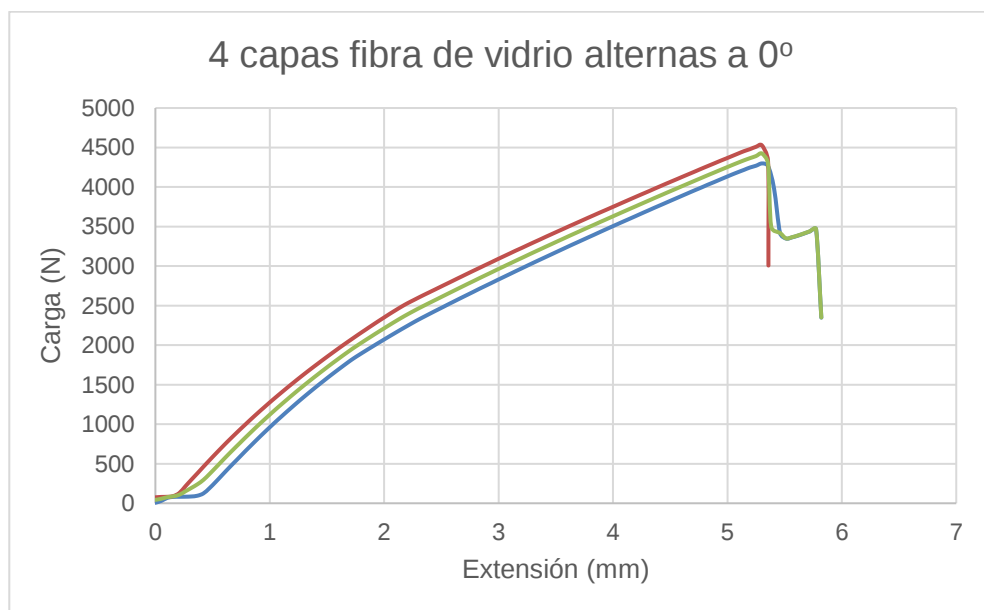


Gráfico 4.2: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 0°

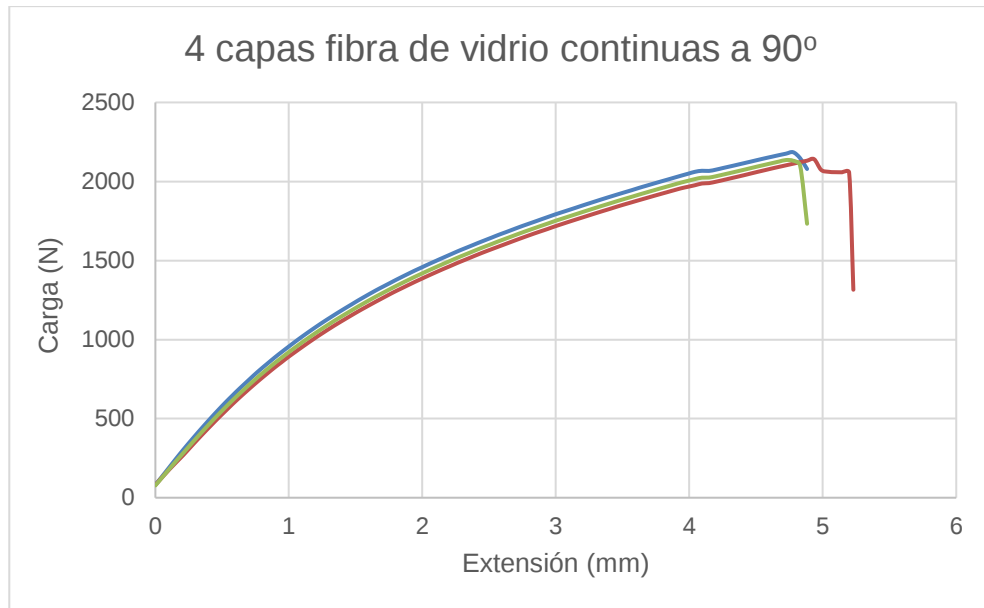


Gráfico 4.3: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 90°

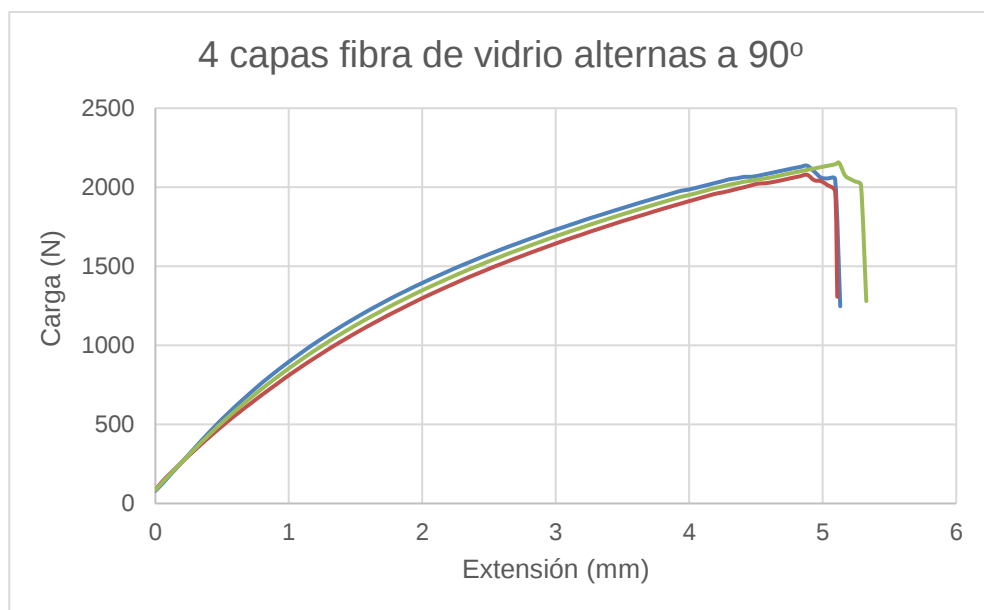


Gráfico 4.4: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 90°

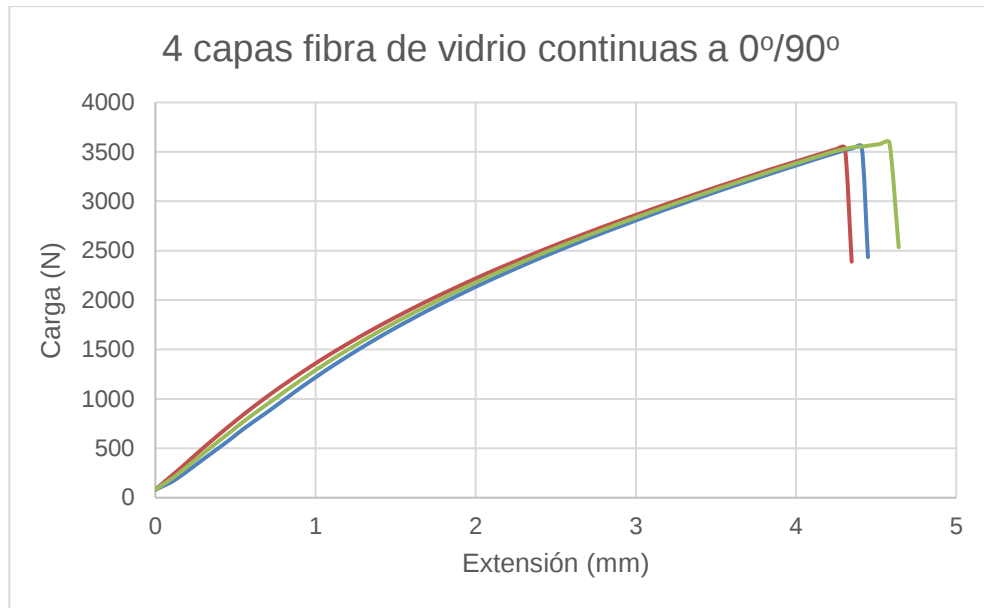


Gráfico 4.5: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°/90°

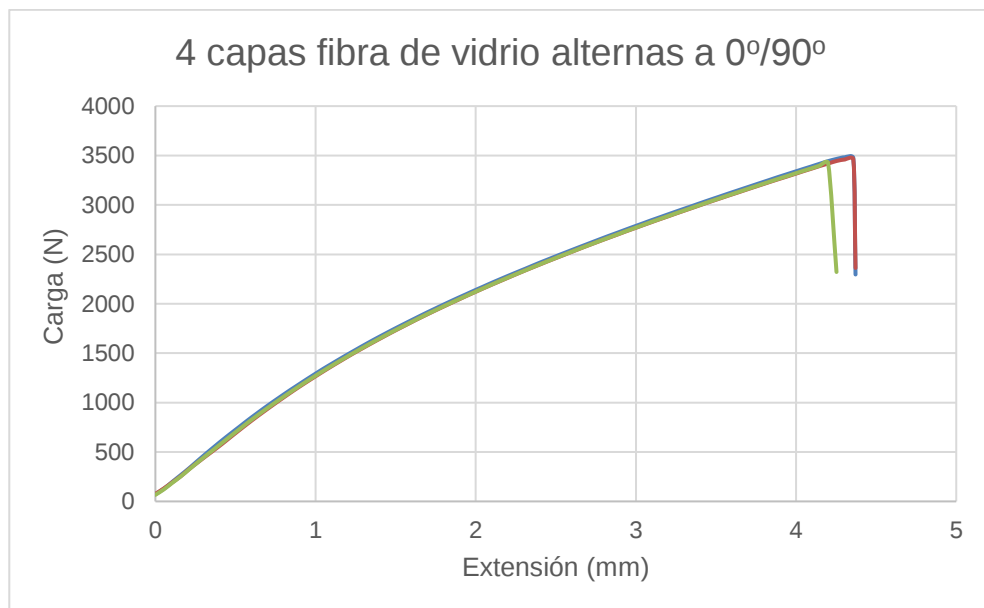


Gráfico 4.6: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 0°/90°

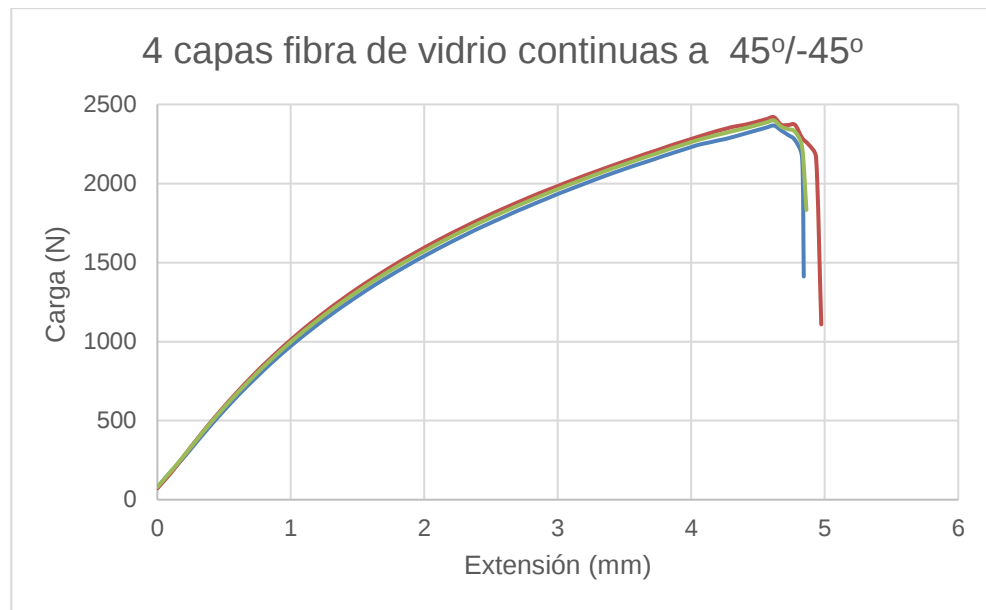


Gráfico 4.7: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a $45^{\circ}/-45^{\circ}$

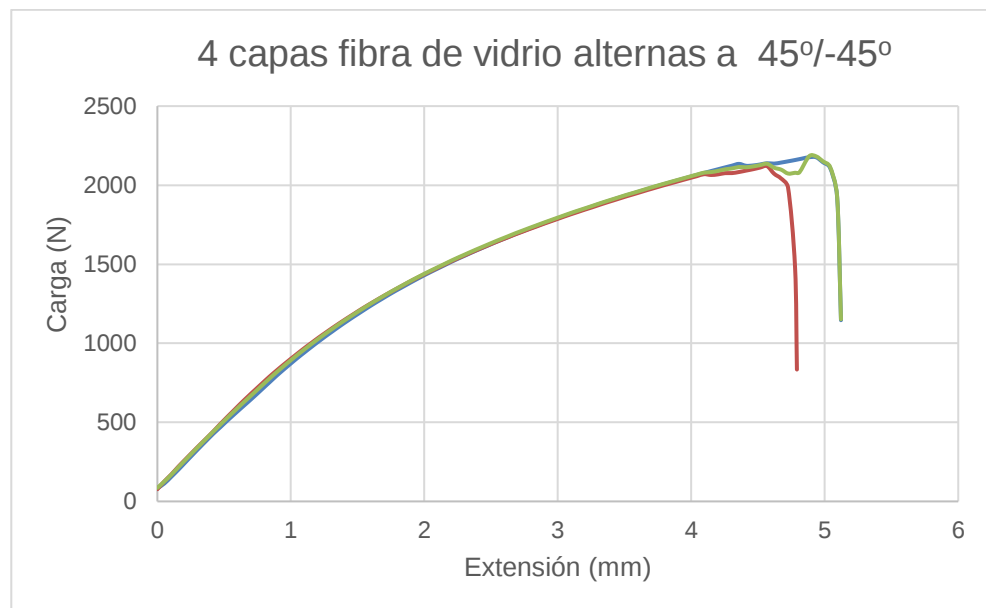


Gráfico 4.8: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a $45^{\circ}/-45^{\circ}$

Además de los datos numéricos se recogen datos en forma de imagen. Al grabar el ensayo con la cámara mediante el programa Basler Video Recording se consigue una imagen para cada segundo de ensayo. Con esta secuencia de

imágenes es posible calcular las deformaciones sufridas en las probetas mediante la correlación digital de imágenes.

Para calcular las deformaciones mediante DIC se procesan las imágenes obtenidas para cada probeta en el programa Vic-2D 6.

El primer paso es seleccionar la secuencia de imágenes del ensayo que se desea analizar. Para ello, al iniciar el programa se selecciona “Speckle images” y se seleccionan las imágenes desde el momento exacto en que comienza el ensayo hasta que finaliza.

Seguidamente, en el menú “images” se selecciona la primera imagen como referencia. Para calibrar la imagen se selecciona , después, se introduce la distancia que se desea medir, ésta debe ser la más larga posible. Con el icono  se señala la distancia medida.

Una vez calibrada la imagen se selecciona el área de interés. Ésta será un polígono que contiene la parte central de la probeta como se observa en la imagen.

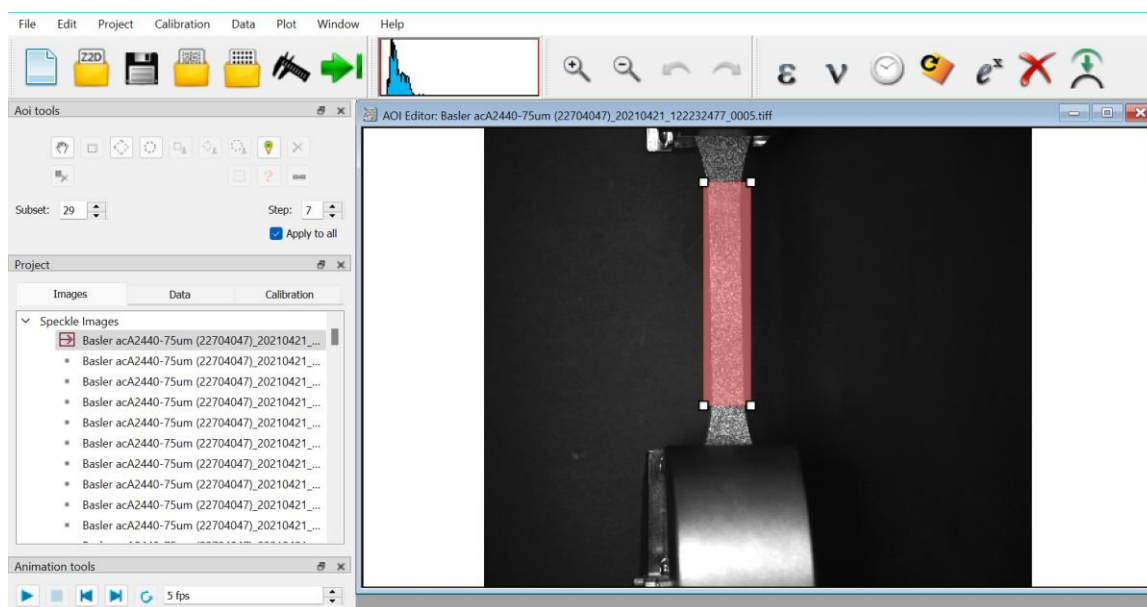


Ilustración 4.18: Selección de área de análisis probeta de tracción. Software Vic-2D 6

Posteriormente se selecciona el punto inicial del análisis y, por último, el número de subsets o divisiones del área de estudio y los steps. Estas dos variables influyen en el tiempo que tarda el análisis en realizarse y en la precisión.

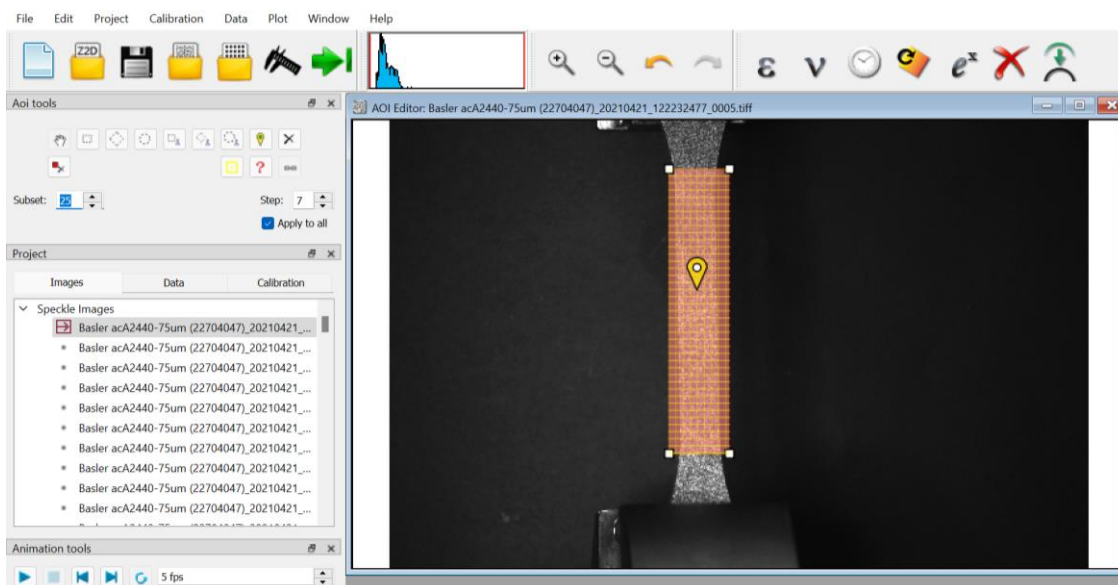


Ilustración 4.19: Selección de subset, step y punto inicial probeta de tracción. Software Vic-2D 6

Después de realizar todos los preparativos anteriores, se da comienzo al análisis en el icono 

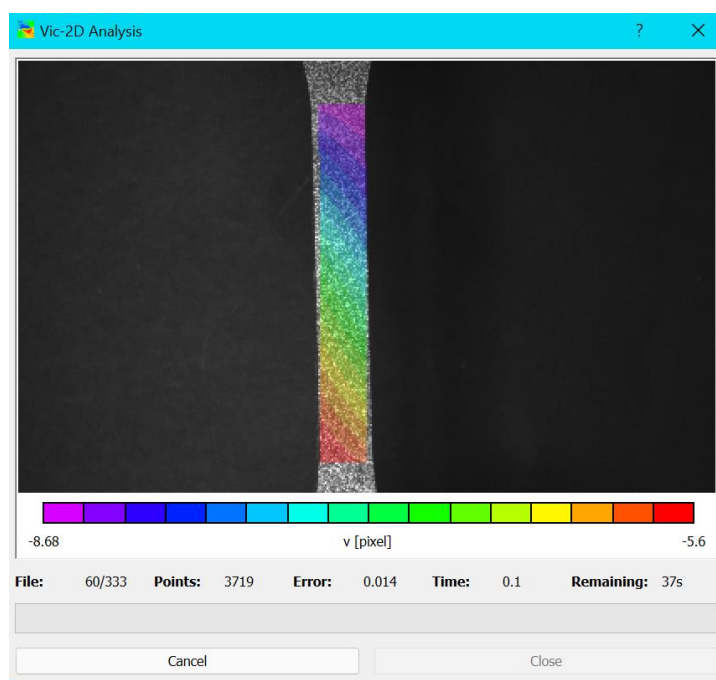


Ilustración 4.20: Progreso del análisis DIC probeta de tracción. Software Vic-2D 6

Cuando finaliza el análisis se selecciona la opción de “Remove rigid motion” y de “Smooth” para obtener resultados más limpios de ruido y eliminar desplazamientos que el software no haya procesado.

Para obtener los resultados de deformación deseados, en la pestaña DATA se selecciona la primera imagen y se incluye un punto que actúa como extensómetro. Este extensómetro se coloca en la zona central de la probeta.

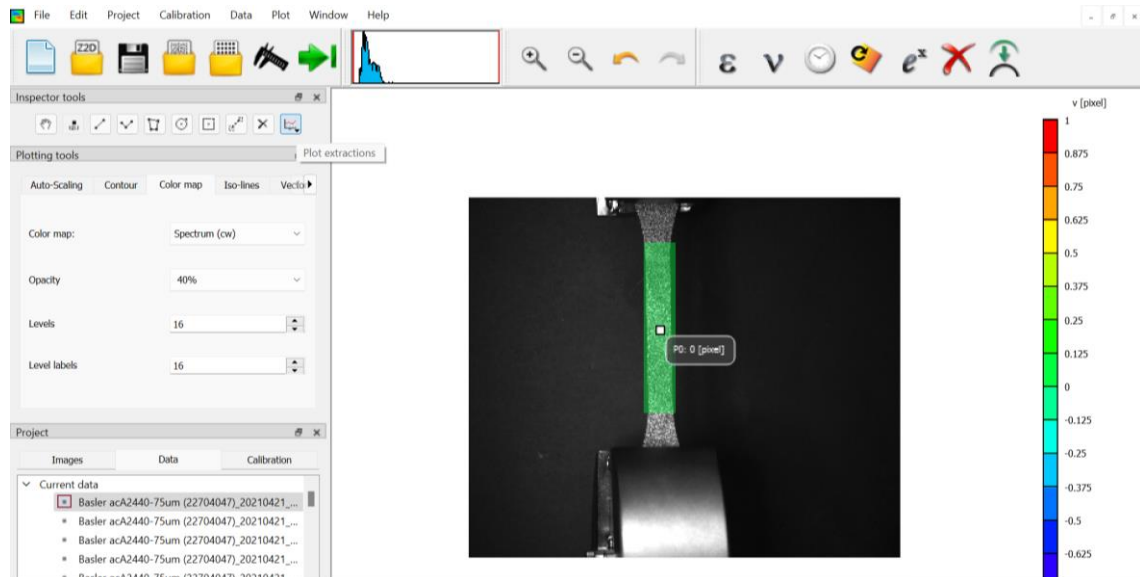


Ilustración 4.21: Colocación extensómetro digital probeta de tracción. Software Vic-2D 6

A continuación, en el icono  se obtiene una gráfica con las deformaciones medidas por el extensómetro colocado. En el caso del ensayo a tracción se representa la deformación vertical denominada en el software como e_{yy} para cada fotograma, denominado índice, que corresponde a un segundo de ensayo.

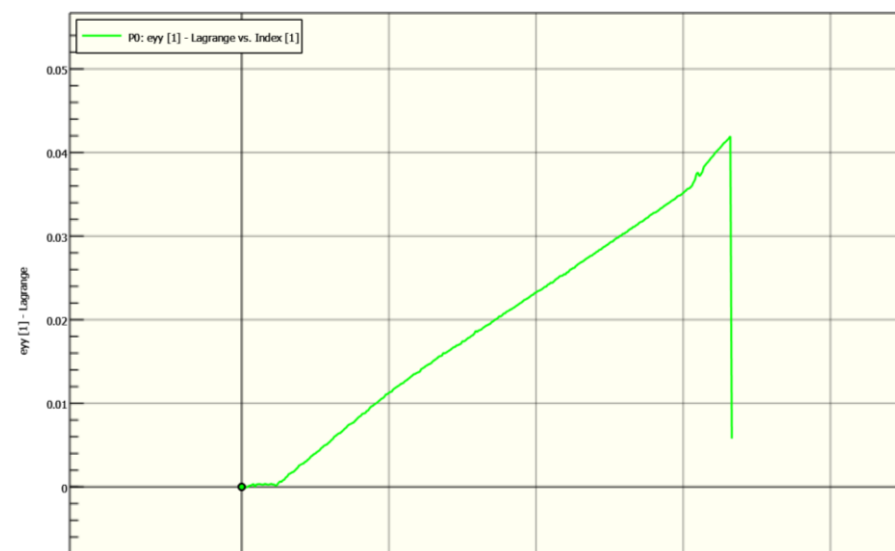


Ilustración 4.22: Gráfica de deformación e_{yy} . Software Vic-2D 6

Estos datos de deformación por tiempo se exportan en formato Excel.

Para cada ensayo se obtienen por tanto los datos de extensión y carga aplicada dados por el programa Instron Bluehill, y las deformaciones verticales obtenidos mediante correlación digital de imágenes por el programa Vic-2D 6.

Para calcular la tensión (MPa) se emplea la *fórmula 4.1*.

La sección transversal inicial de la probeta al ser rectangular, se calcula como el ancho multiplicado por el espesor. El ancho es de 10 mm y el espesor de 7 mm. Esto da una sección de 70 mm².

Con la carga en cada instante dividida por la sección se obtiene la tensión.

A continuación, se puede representar la curva tensión deformación para cada probeta. Se ha de tener en cuenta que se tienen datos de carga cada 3 segundos de ensayo y datos de deformación ϵ_{yy} cada segundo. Por tanto, se debe ajustar cada dato de carga con su desplazamiento correspondiente.

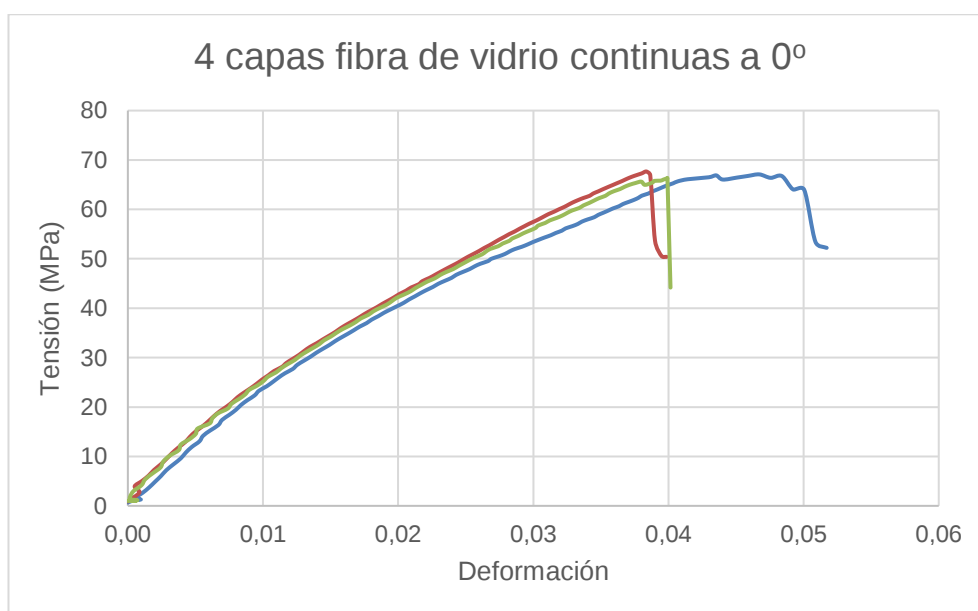


Gráfico 4.9: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°

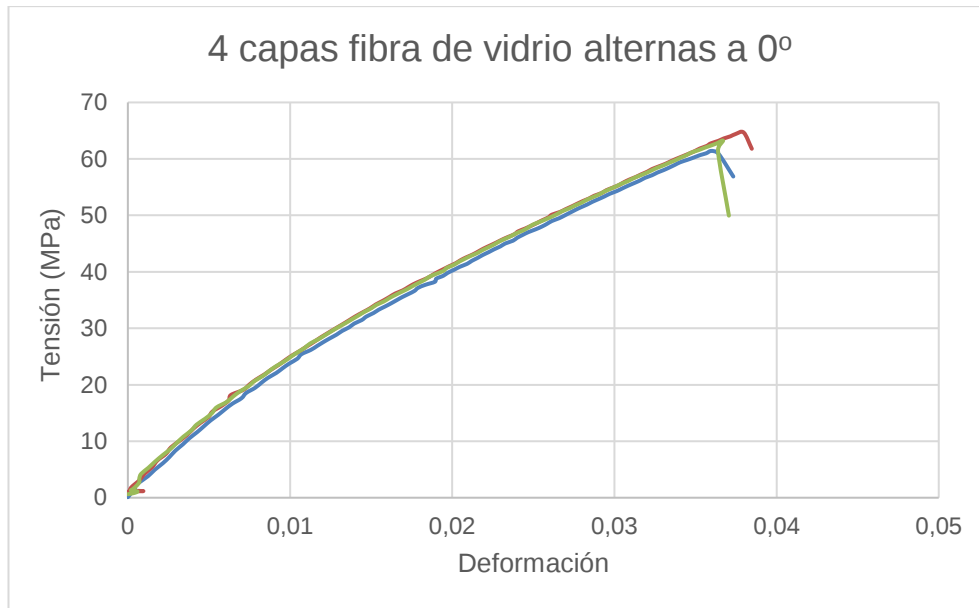


Gráfico 4.10: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 0°

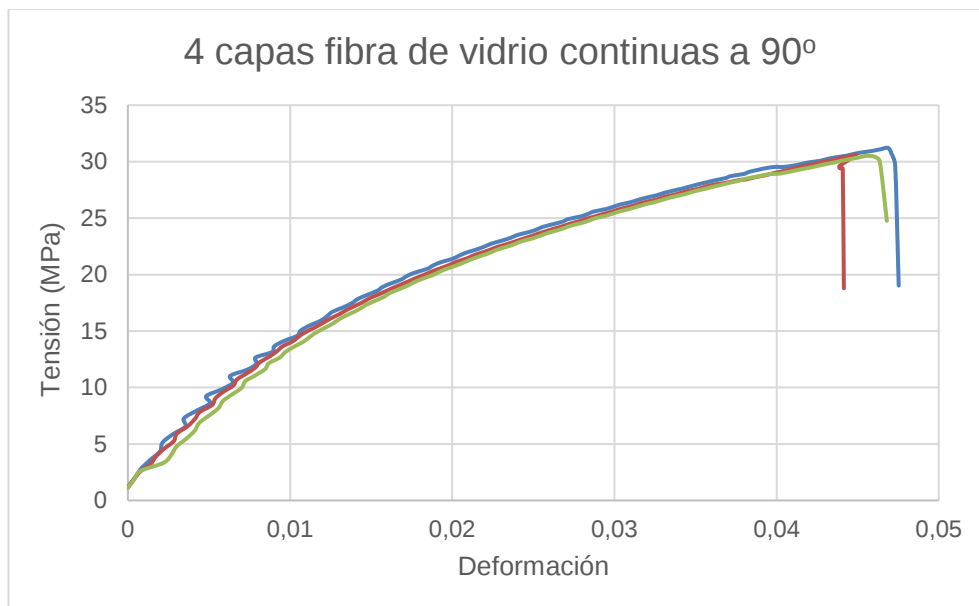


Gráfico 4.11: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 90°

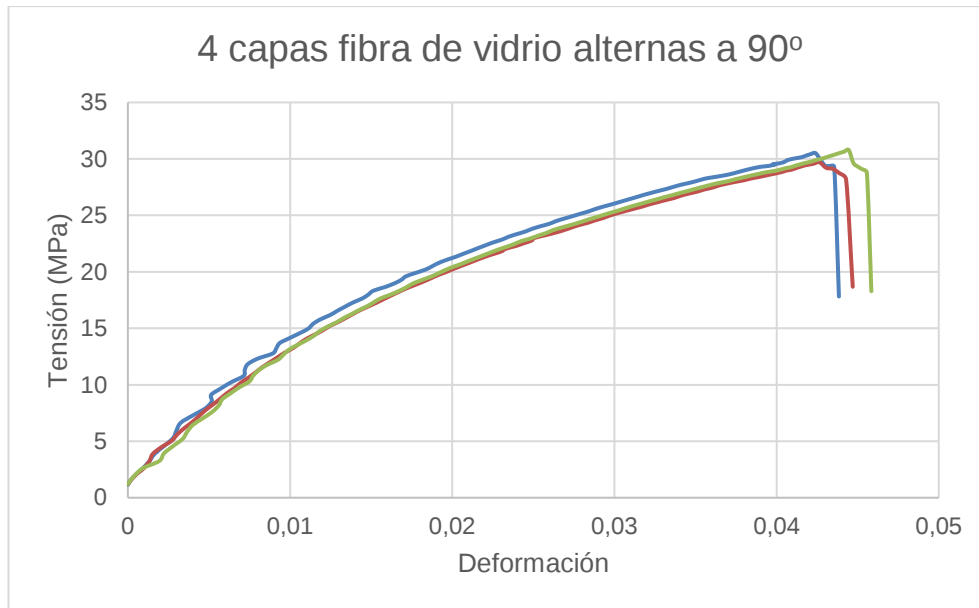


Gráfico 4.12: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 90°

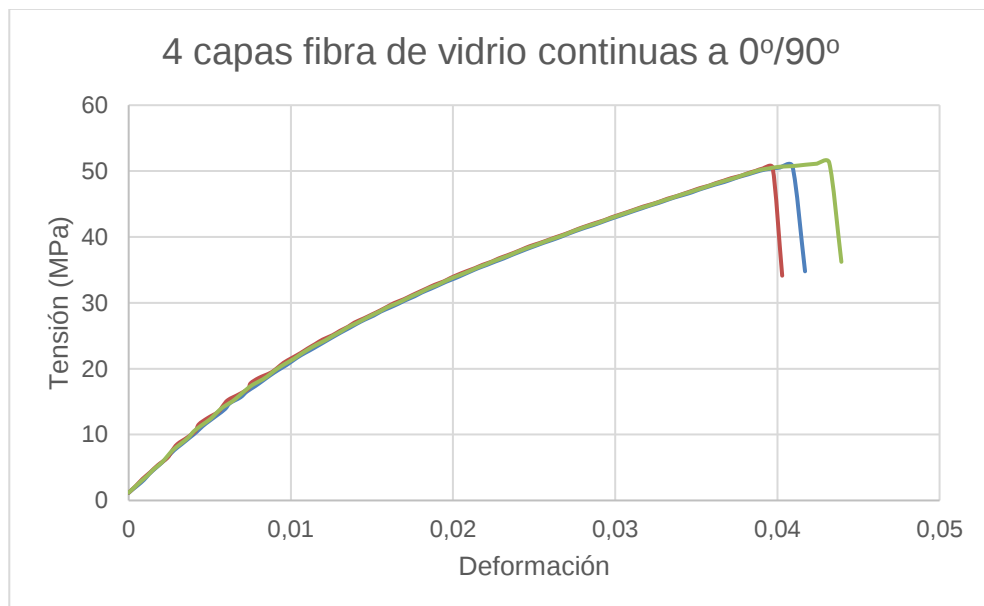


Gráfico 4.13: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°/90°

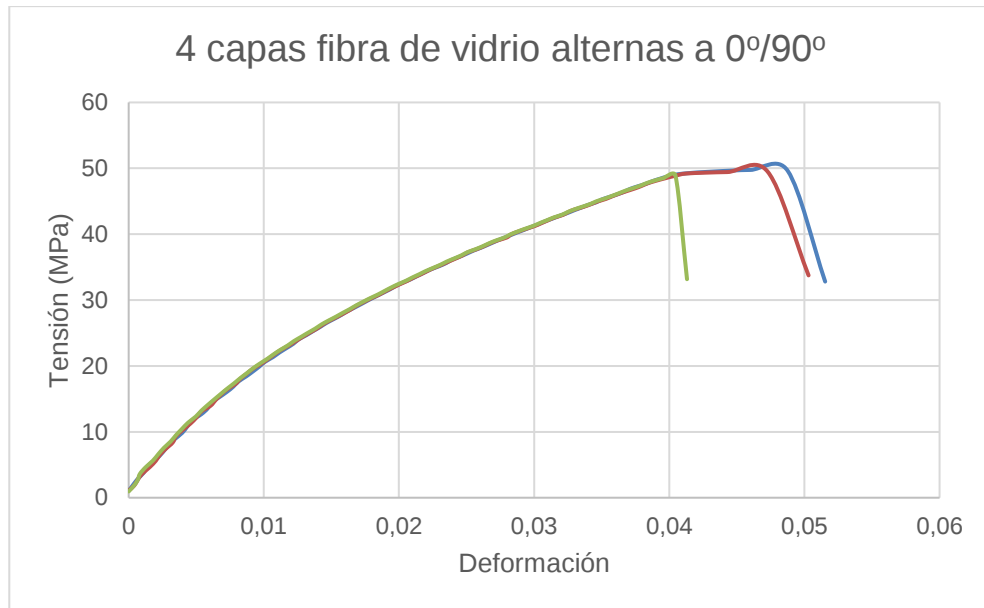


Gráfico 4.14: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 0°/90°

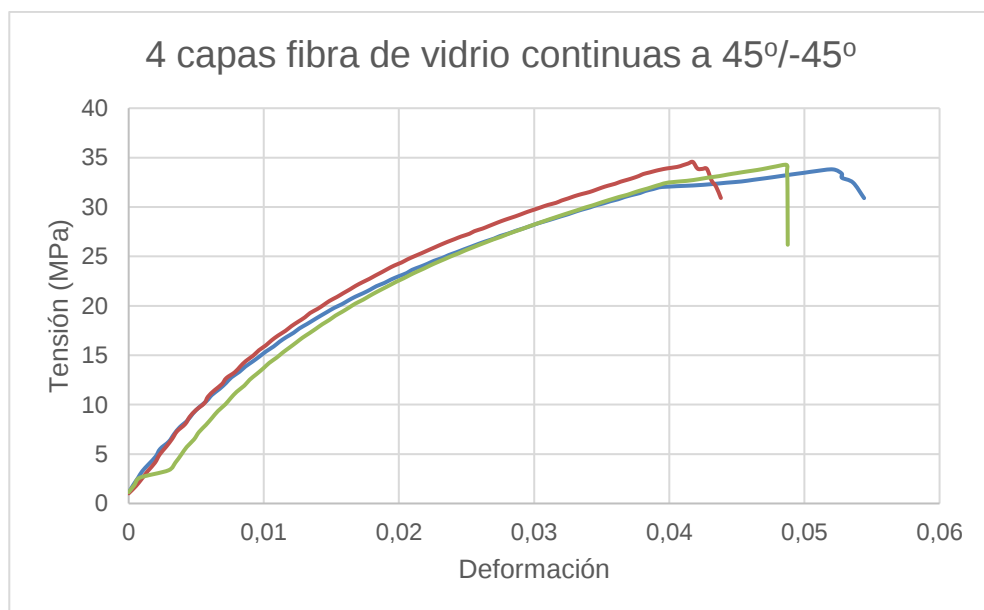


Gráfico 4.15: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 45°/-45°

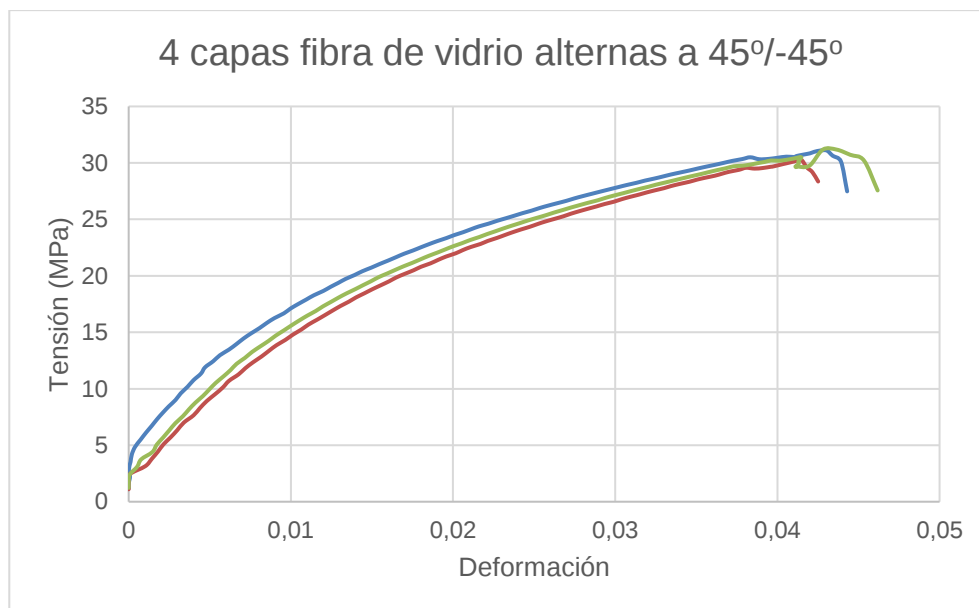


Gráfico 4.16: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 45°/-45°

Para calcular el módulo de elasticidad hay que relacionar el incremento de la tensión con el incremento de la deformación vertical.

Para el cálculo del módulo de elasticidad se selecciona el intervalo de datos que correspondan a la zona elástica, situados aproximadamente entre los valores de deformación 0,0005 y 0,0025. Se obtiene una gráfica como la que se muestra a continuación, con los datos de esfuerzo (eje Y) frente a deformación (eje X) en la zona elástica para cada probeta.

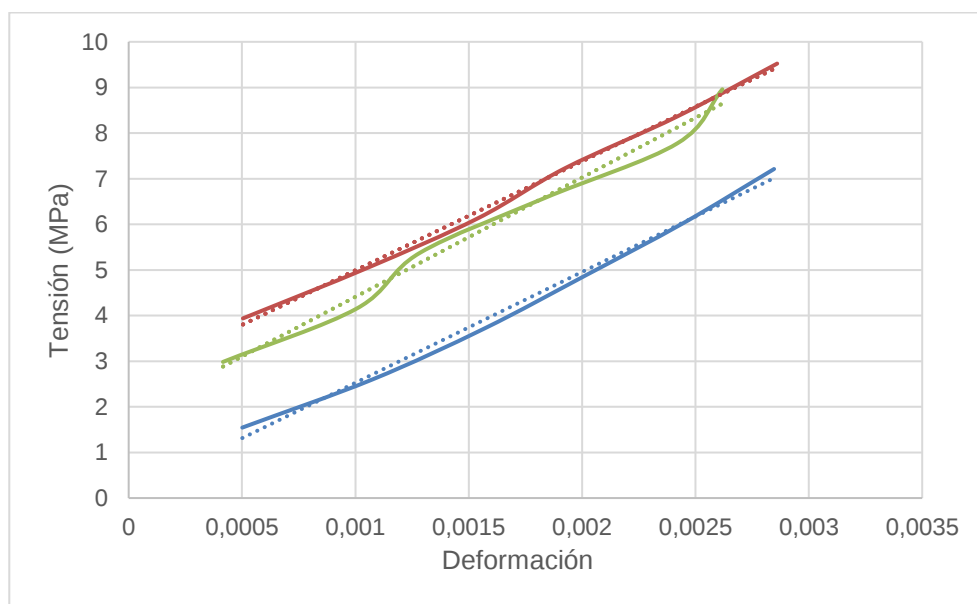


Gráfico 4.17: Gráfica tensión-deformación para cálculo del Módulo de Young configuración continua a 0°

Para obtener el módulo de elasticidad como se indica en la ecuación 4.3 se realiza una regresión lineal para cada probeta, obteniéndose una ecuación para cada serie de datos y un valor de R^2 . Cuanto más cercano a 1 sea este valor de R^2 mayor será la aproximación a la solución real.

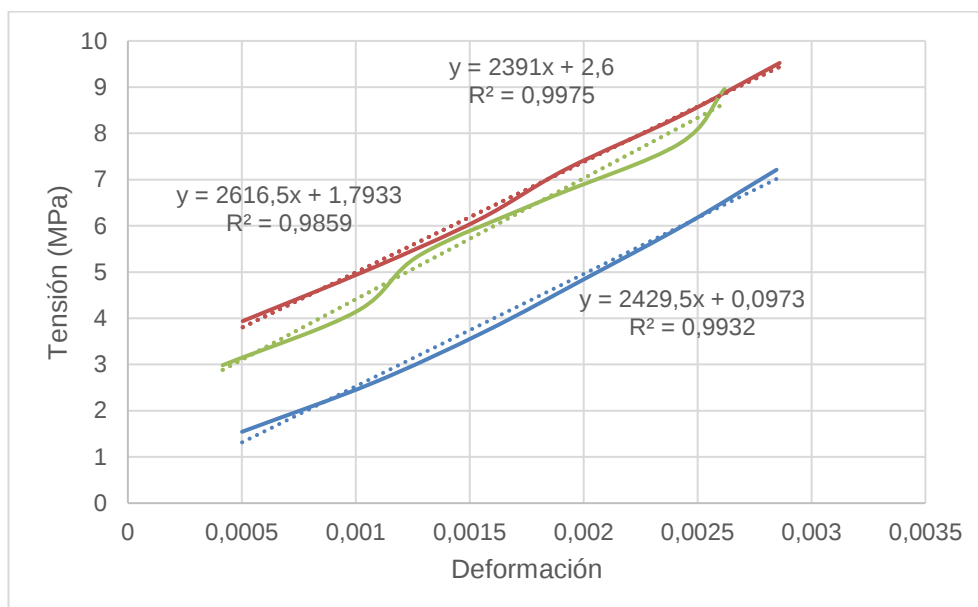


Gráfico 4.18: Gráfica tensión-deformación y pendientes configuración continua a 0°

La pendiente de cada recta (termino acompañado de x) corresponde con el módulo de elasticidad E.

Para cada configuración se realiza la media de los valores obtenidos para las tres probetas, además de la media para la tensión máxima antes de la rotura para de cada una de ellas y su valor de deformación correspondiente.

4.2. Ensayo a cortante

Los ensayos a cortante del presente proyecto se han llevado a cabo atendiendo a la norma ASTM D5379/D5379M-98.

Este método de prueba determina las propiedades de cortante de materiales compuestos reforzados con fibras. Los materiales compuestos se limitan a fibra continua o compuestos reforzados con fibras discontinuas.

El ensayo consiste en que una probeta con una entalla en la parte central se coloca entre las mordazas de una máquina de ensayos, con la entalla situada en la línea de acción de la carga, como se muestra en la imagen.

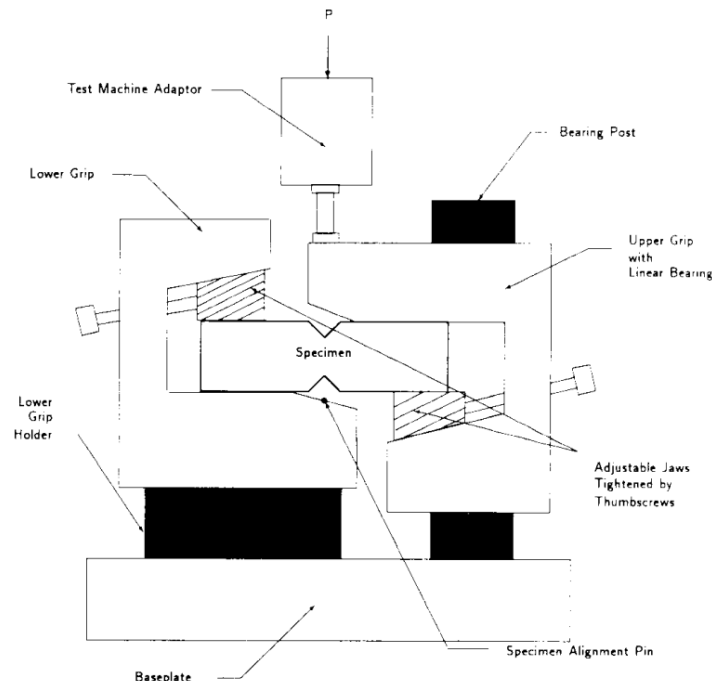


Ilustración 4.23: Elementos de ensayo a cortante. Fuente: ATM D 5379/D 5379M-98

La mordaza superior se desplaza hacia arriba a velocidad constante provocando un esfuerzo a cortante. Durante el ensayo la máquina monitoriza los valores de carga aplicada sobre la probeta y el desplazamiento de la mordaza.

Para calcular los valores de tensión se utiliza la ecuación:

$$\tau = \frac{P}{A}$$

(Fórmula 4.4)

Donde:

τ es el valor de la tensión de cortante, expresada en megapascuales (MPa).

P es la carga aplicada, expresada en newtons (N)

A es el área de la sección transversal inicial de la probeta, expresada en milímetros cuadrados (mm²).

Para el cálculo de las deformaciones se usará la correlación digital de imágenes mediante VIC 2D-6, mediante la aplicación de dos extensómetros virtuales colocados en ángulos de 45° y -45° como se indica en la *ilustración 4.24*.

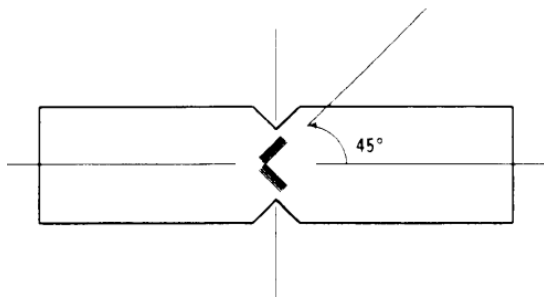


Ilustración 4.24: Colocación de los extensómetros para cálculo de deformaciones en cortante.

Fuente: Fuente: ATM D 5379/D 5379M-98

Para obtener la deformación a cortante real, los datos obtenidos por los extensómetros se suman en valor absoluto.

$$\varepsilon_i = |\varepsilon_{+45}| + |\varepsilon_{-45}|$$

(Fórmula 4.5)

Una vez calculados tanto los esfuerzos como la deformación, éstos se pueden representar gráficamente, obteniéndose una gráfica como la siguiente:

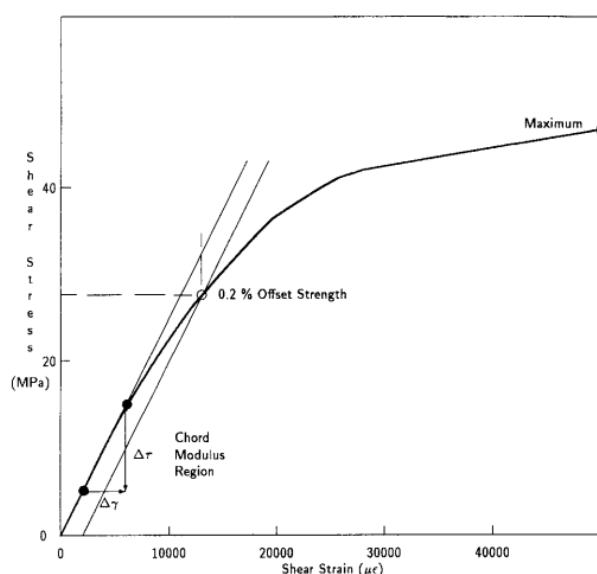


Ilustración 4.25: Gráfica tensión deformación para la determinación del módulo de elasticidad en cortante. Fuente: ATM D 5379/D 5379M-98

Se calcula el módulo de elasticidad en cortante mediante la pendiente de una recta de regresión.

Mediante un equipo asistido por ordenador se aplica un método de regresión lineal aplicado a la parte de la curva situada en la zona elástica.

$$G = \frac{d\tau}{d\varepsilon}$$

(Fórmula 4.6)

Donde $\frac{d\tau}{d\varepsilon}$ es la pendiente de una recta de regresión ajustada por mínimos cuadrados a la parte de la curva esfuerzo/deformación en un intervalo entre puntos de deformación de 0,004.

4.2.1. Diseño de probetas de cortante

Tal y como indica la norma, la probeta de ensayo deberá tener forma planta rectangular, con muescas en V simétricas ubicadas en el centro de la pieza. Las dimensiones especificadas se observan en la figura.

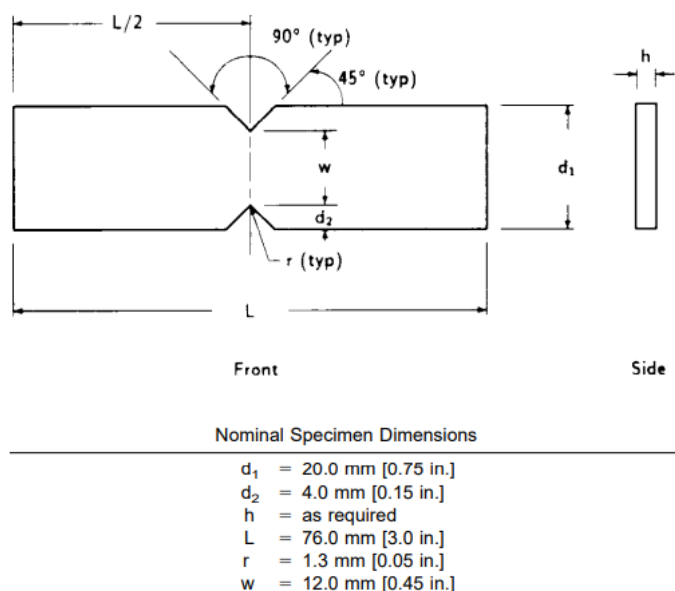


Ilustración 4.26: Dimensiones de diseño permitidas en probetas de ensayos a tracción. Fuente: ATM D 5379/D 5379M-98

Durante el ensayo a cortante puede ocurrir una torsión de la muestra, afectando los resultados obtenidos. La torsión puede ocurrir debido a una mala colocación de la muestra en la máquina de ensayos o por que los especímenes son demasiado delgados y, por tanto, inestables.

Para evitar la torsión, en este estudio, se ha modificado la geometría de la probeta para conseguir una mejor sujeción del espécimen en las mordazas.

En la zona de la probeta que no corresponde a la entalla en V de la parte central, se ha aumentado de forma significativa el grosor. Esto permite que la probeta tenga una mayor superficie de contacto con las mordazas, así es posible realizar el ensayo evitando el deslizamiento y la torsión con una mayor precisión de los resultados.

La parte central donde se encuentran las muescas, que será la zona donde se produzca la rotura, debe mantener el espesor recomendado por la norma. Esta parte central será la zona que determine las propiedades a cortante de la probeta, por tanto, la zona modificada no influirá en estas propiedades, solo permitirá que se pueda realizar un ensayo más preciso.

Al igual que en el caso de ensayo a tracción, en este estudio se pretende determinar las propiedades de resistencia a cortante para distintas distribuciones de la fibra de vidrio impresas como refuerzo de fibra continua sobre Onyx como material principal.

En primer lugar, se ha diseñado un modelo CAD de la probeta de cortante con las dimensiones que se especifican en el plano 2 y se han importado al software Eiger con formato *.stl.

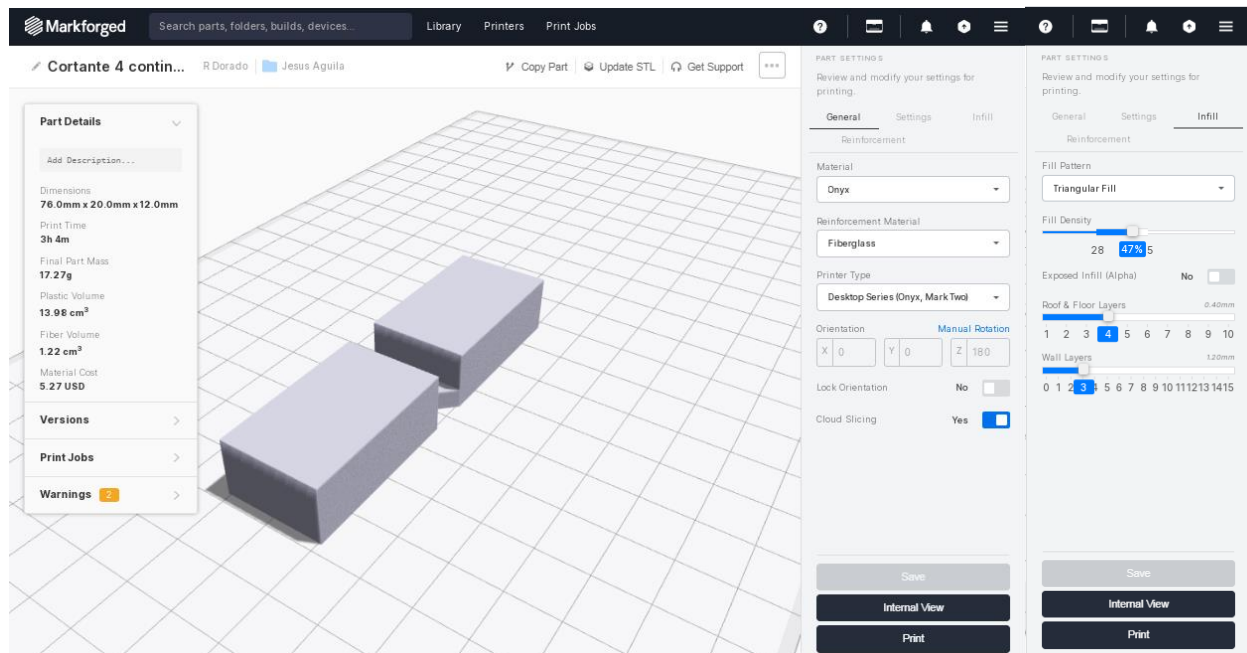


Ilustración 4.27: Pantalla previa a la impresión probeta cortante y de determinación de parámetros generales. Software Eiger

Del mismo modo que para las probetas a tracción se determinan los parámetros generales para todas las probetas de cortante, como son materiales, patrón de relleno y capas de techo suelo y muros laterales.

Los parámetros seleccionados se observan en la *ilustración 4.27*.

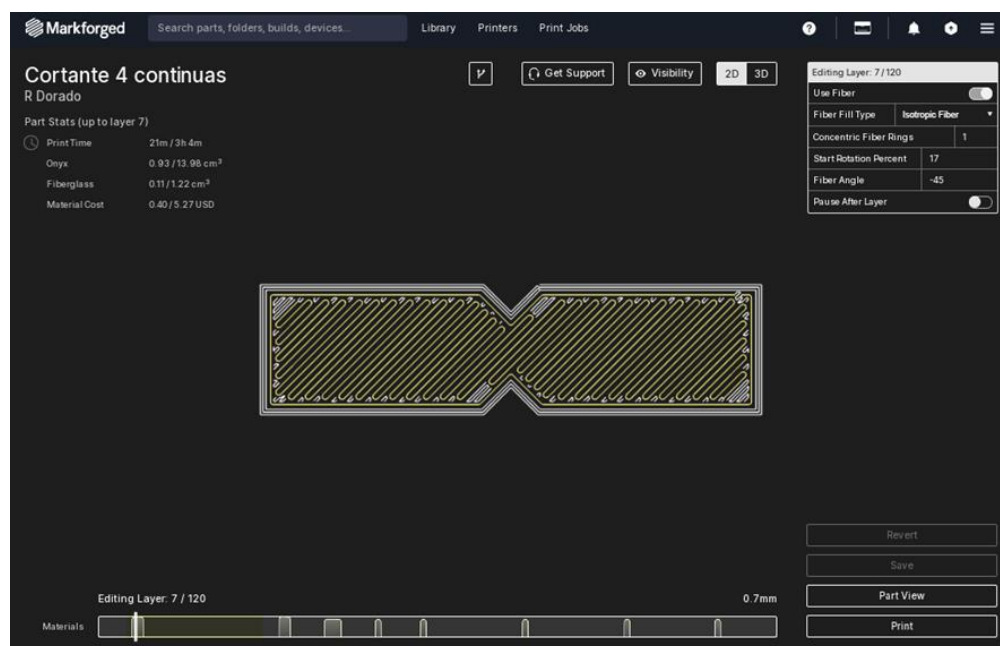


Ilustración 4.28: Disposición de las capas que contienen fibra de refuerzo en una probeta de cortante con distribución de capas continuas a 45°/-45°. Software Eiger

En la vista interna del modelo se seleccionan las capas que contienen fibra de vidrio y su disposición.

Se ha seleccionado para todas las probetas relleno de fibra de tipo isotrópico y un único anillo concéntrico.

La disposición de las capas de fibra para el caso de configuración continua o alterna es similar a la de las probetas usadas en tracción.

Se busca una distribución simétrica en las capas que conforman la entalla en V. En estas capas se coloca la fibra de forma simultánea o de forma alterna con una capa de Onyx entre cada una de ellas. Las capas que conforman la zona de la entalla son desde la primera hasta la número 40.

Para las capas que no corresponden a la sección en V se determina otra distribución de las capas. En primer lugar, se disponen tres capas de fibra de vidrio a 90° en las tres capas más cercanas a la entalla. Después, se insertan otras 5 capas de fibra a 90° que estarán más concentradas en la zona más cercana a la entalla, pero a medida que se alejan de ésta, se encontrarán más dispersas. Las capas que conforman la zona de refuerzo de la probeta comprenden desde la 41 hasta la 120.

Concretamente, las capas que contienen la fibra de vidrio a 90° como refuerzo son las capas 41, 42, 43, 50, 58, 76, 94, 110.

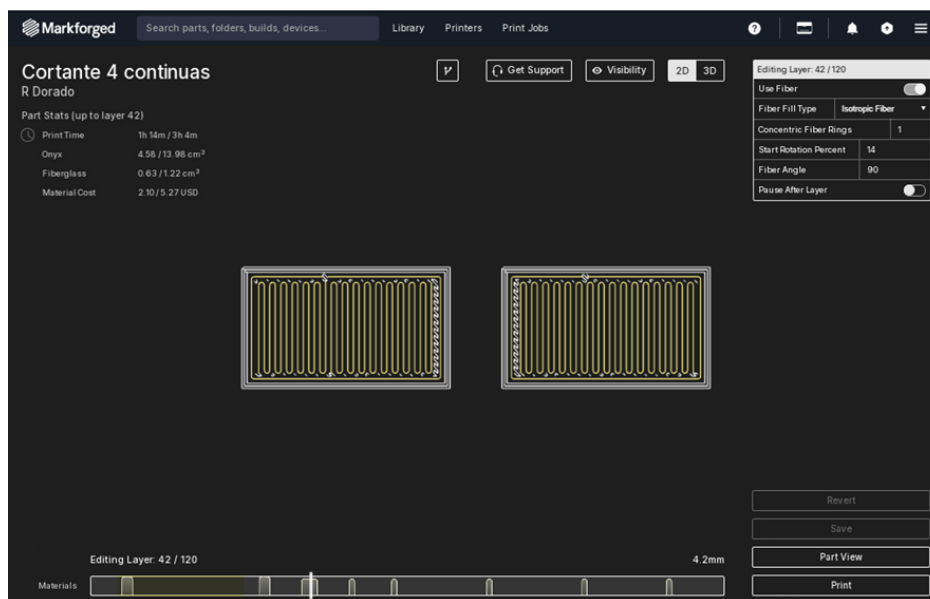


Ilustración 4.29: Disposición de las capas de fibra de vidrio de refuerzo en una probeta de cortante con distribución de capas continuas a 45°/-45° en zona no perteneciente a la entalla. Software Eiger

Estas capas que no corresponden a la zona de rotura se disponen para añadir rigidez a cortante a la sección de la probeta que estará apoyada en las mordazas evitando el fallo en esta zona, así se obtienen valores más realistas en la entalla, que será la zona en la que se distribuyen las capas de fibra con la configuración que se desea estudiar. Esta disposición de capas de refuerzo evitará, además, que la probeta pueda llegar a romper por pandeo o por torsión durante el ensayo.

En la siguiente tabla se muestra la distribución de la fibra de vidrio en las 120 capas que constituyen las probetas de cortante:

Capas fibra vidrio/ángulo	Configuración de capas fibra de vidrio	Capas con refuerzo de fibra	Ángulo de impresión de capas
4 capas 0°	Continua	7, 8, 33, 34	0, 0, 0, 0
	Alterna	6, 15, 25, 43	0, 0, 0, 0
4 capas 45/-45°	Continua	7, 8, 33, 34	45, -45, 45, -45
	Alterna	6, 15, 25, 43	45, -45, 45, -45
4 capas 0/90°	Continua	7, 8, 33, 34	0, 90, 0, 90
	Alterna	6, 15, 25, 43	0, 90, 0, 0
4 capas 90°	Continua	7, 8, 33, 34	90, 90, 90, 90
	Alterna	6, 15, 25, 43	90, 90, 90, 90

Tabla 4.2: Distribución de las capas de fibra de vidrio en las probetas de cortante y ángulo de impresión

4.2.2. Preparación del ensayo

El procedimiento para la preparación de los ensayos es prácticamente igual que el anteriormente descrito.

En primer lugar, se realiza el moteado sobre la superficie de la probeta para obtener el patrón de puntos necesario para la posterior correlación digital de imágenes.



Ilustración 4.30: Probeta de cortante antes del moteado



Ilustración 4.31: Probeta de cortante despues del moteado

A continuación, se sitúa la probeta entre las mordazas de cortante quedando la muesca central a lo largo de la línea de acción de la carga. Las dos mitades de la muestra serán comprimidas por la máquina de prueba que a la vez monitoriza los resultados de carga ejercida y desplazamiento.



Ilustración 4.32: Probeta de cortante en las mordazas

El montaje del equipo de grabación se realiza de la misma forma que para el ensayo a tracción, procurando una buena iluminación y grabando toda la sección de la probeta durante todo el ensayo.

En el software de grabación se ajustarán los parámetros de ganancia, saturación, brillo, etc. Que permitan una imagen nítida del espécimen. Se tomará también en este caso, un fotograma cada segundo de ensayo.

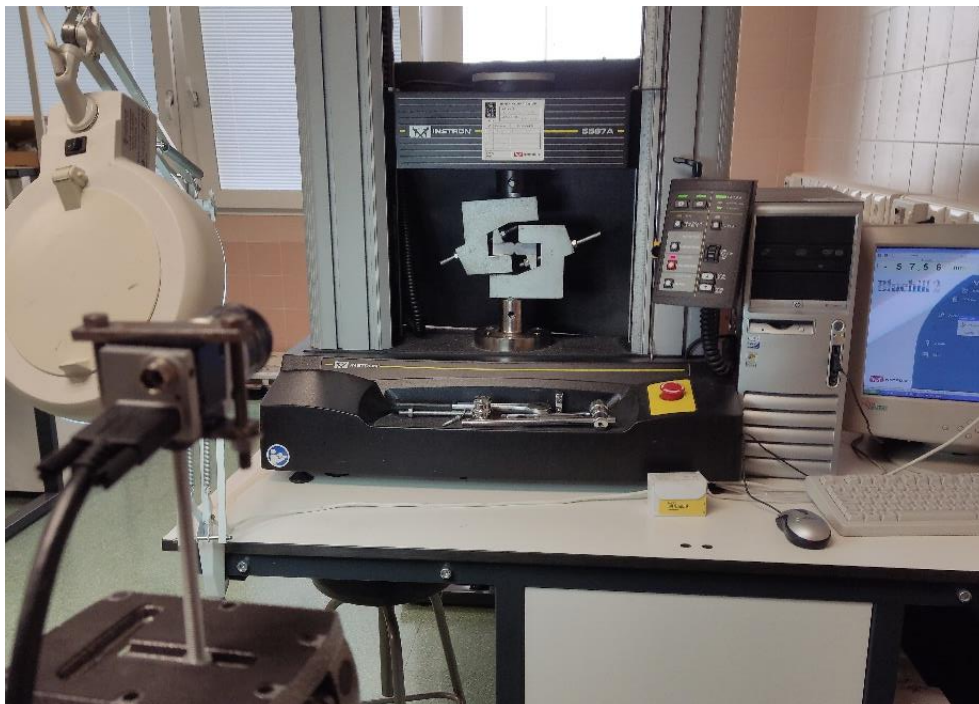


Ilustración 4.33: Montaje de equipo de toma de imágenes para ensayos de cortante

Una vez montado todo el equipo se prepara el ensayo en el software Instron Bluehill. Se determina el ensayo a cortante con una velocidad de alargamiento de 1 mm/min. La norma no indica una velocidad de ensayo específica, pero especifica que el ensayo no debe durar más de 10 minutos.

Se aplica en primer lugar una precarga, de aproximadamente unos 80 Newton, que elimina valores residuales hasta que el ensayo comienza a ajustarse.

Una vez realizados todos los preparativos anteriores, se da comienzo al ensayo.

El ensayo finalizará y será considerado válido una vez que aparezca una fractura en la zona central de la probeta.

En las *ilustraciones 4.34 y 4.35* se observa, respectivamente, la probeta en el instante que se da inicio al ensayo y la misma una vez se produce la rotura en la entalla y el ensayo es considerado válido.

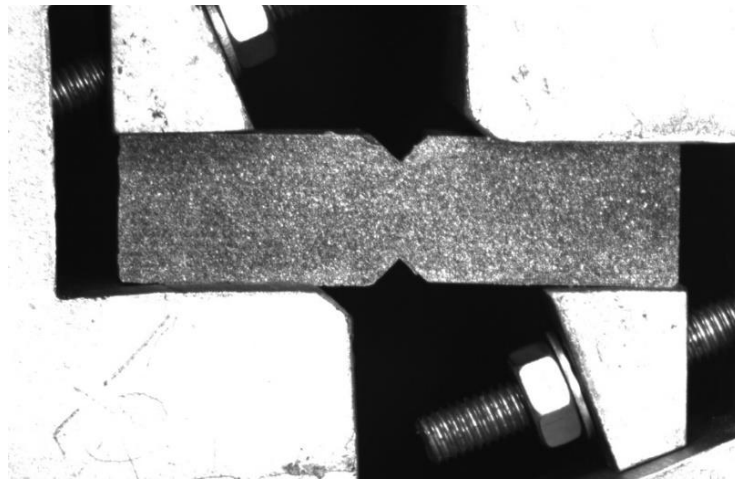


Ilustración 4.34: Probeta de cortante en las mordazas antes del ensayo



Ilustración 4.35: Probeta de cortante en las mordazas una vez finalizado el ensayo

En la *ilustración 4.36* se observa la rotura de la probeta para un ensayo considerado válido, donde la rotura se produce en la zona de la entalla central.



Ilustración 4.36: Rotura en una probeta de cortante para un ensayo válido

En la siguiente imagen, se puede apreciar una probeta en la que se produce una rotura no deseada. En este caso, las capas se separan en lugar de producirse la rotura en la entalla, esto se debe a una colocación incorrecta de la probeta sobre las mordazas o a una mala sujeción, por lo cual, ocurre deslizamiento y un esfuerzo de torsión en lugar de un esfuerzo a cortante.



Ilustración 4.37: Rotura en una probeta de cortante para un ensayo no válido

4.2.3. Obtención y tratamiento de resultados

Para cada configuración de fibra de vidrio mediante el programa Instron Bluehill se obtienen los datos de carga aplicada (eje Y en newtons) y de extensión (eje X en milímetros), representados en las siguientes gráficas.

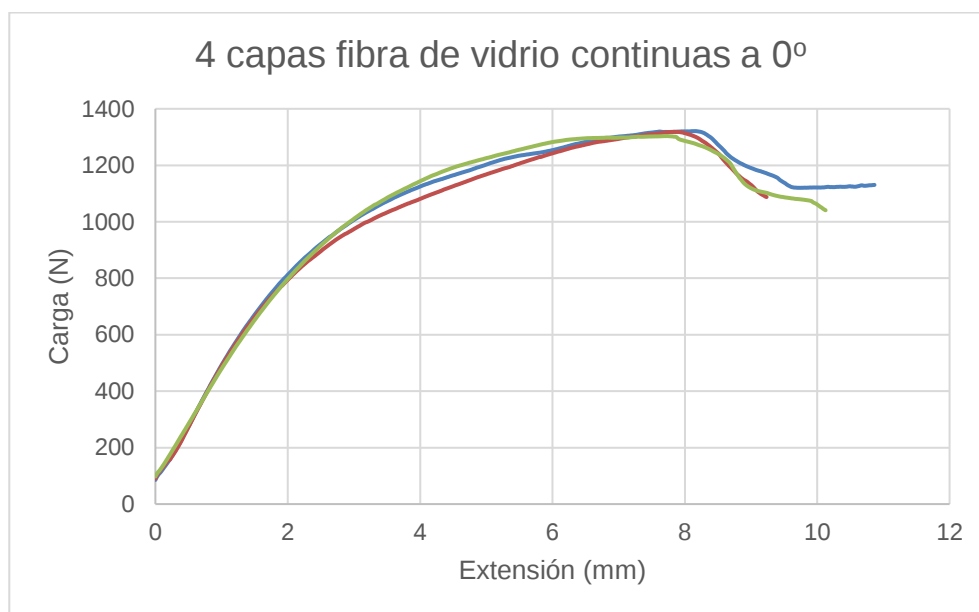


Gráfico 4.19: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°

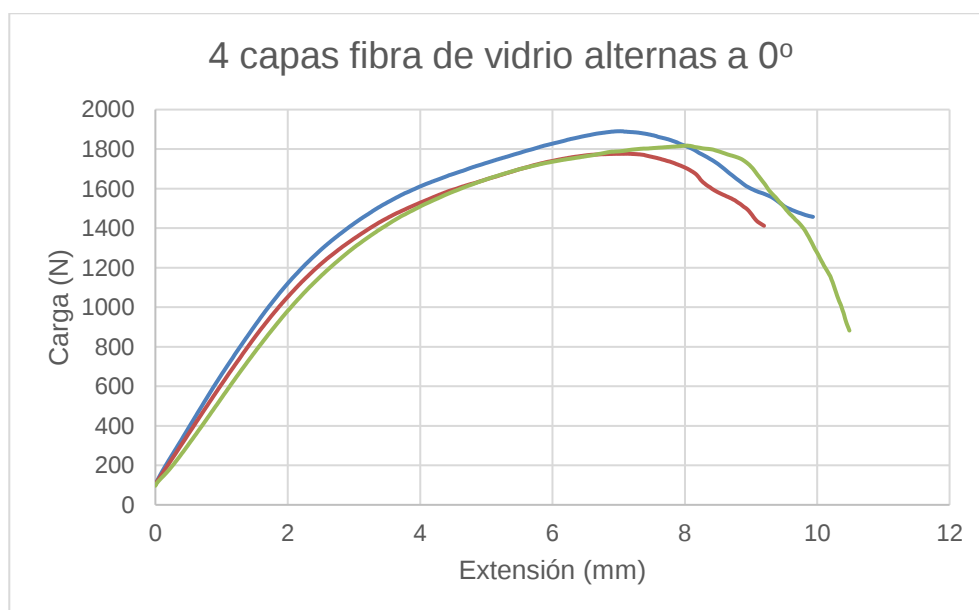


Gráfico 4.20: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 0°

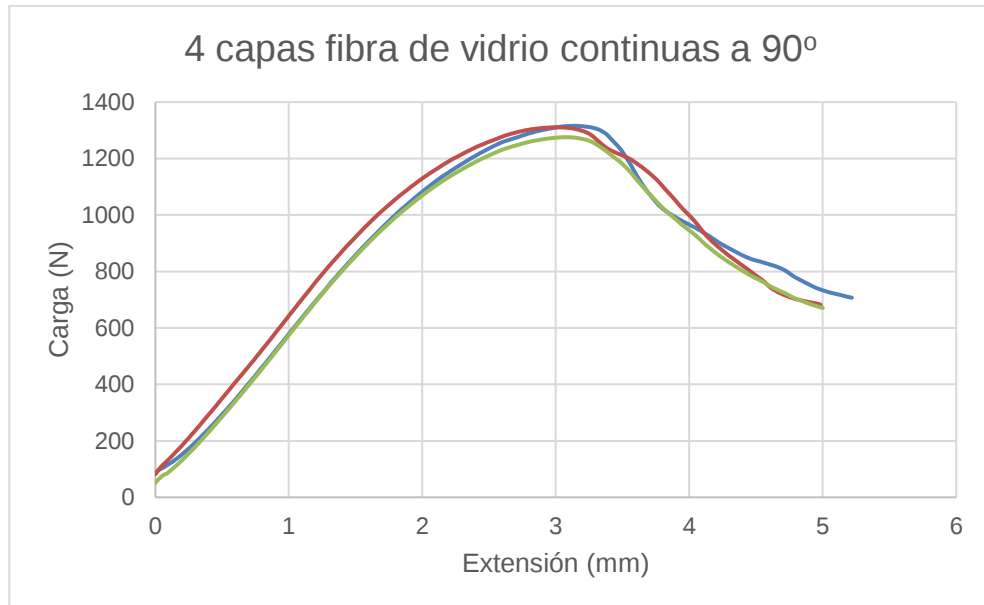


Gráfico 4.21: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 90°

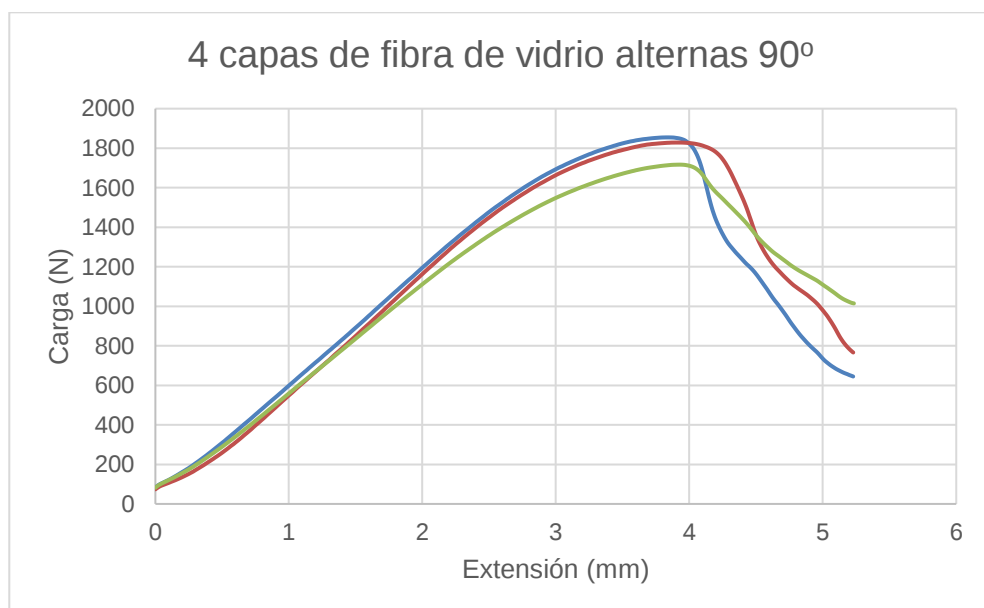


Gráfico 4.22: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 90°

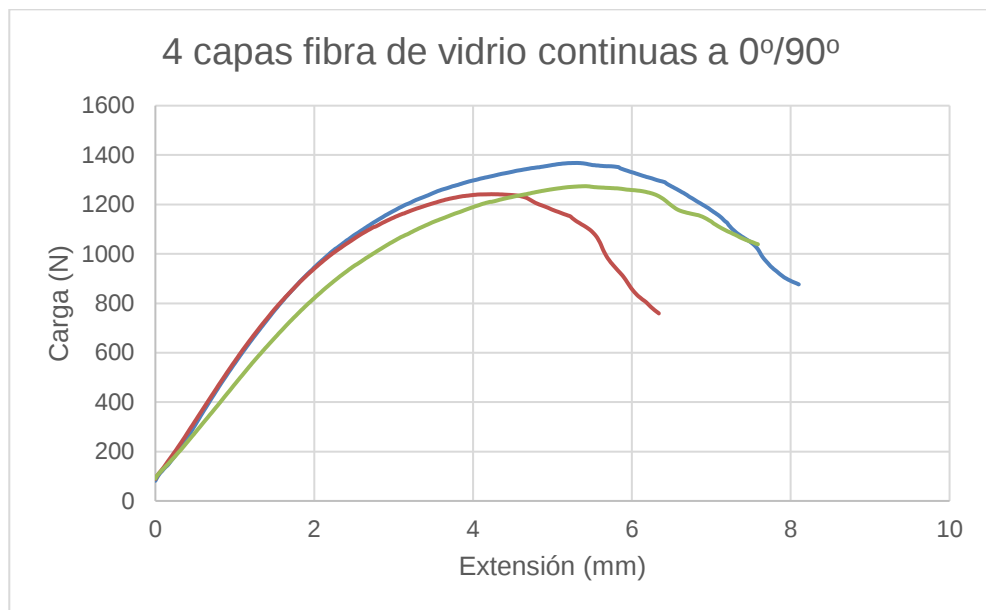


Gráfico 4.23: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°/90°

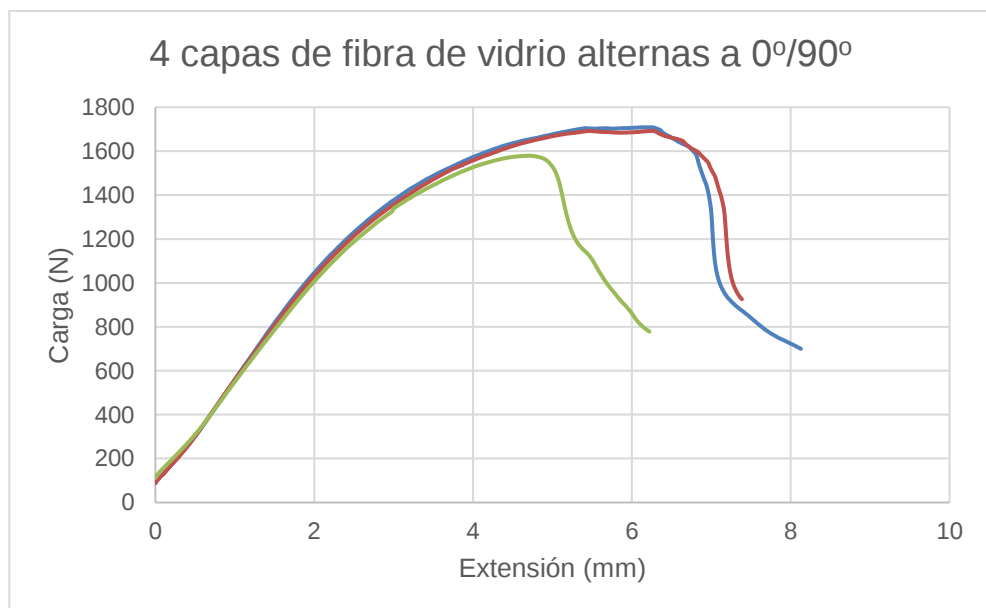


Gráfico 4.24: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 0°/90°

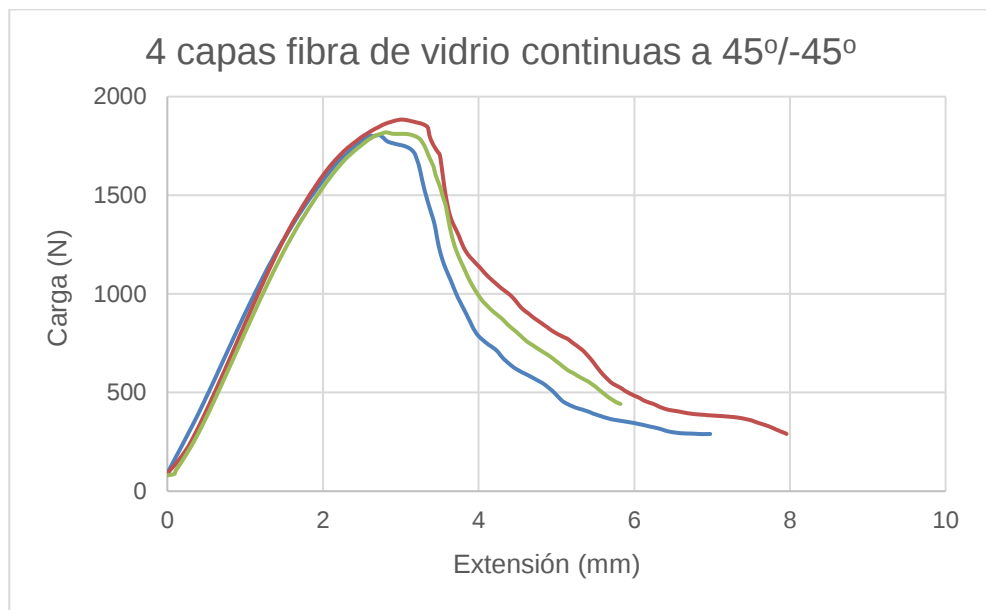


Gráfico 4.25: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 45°/-45°

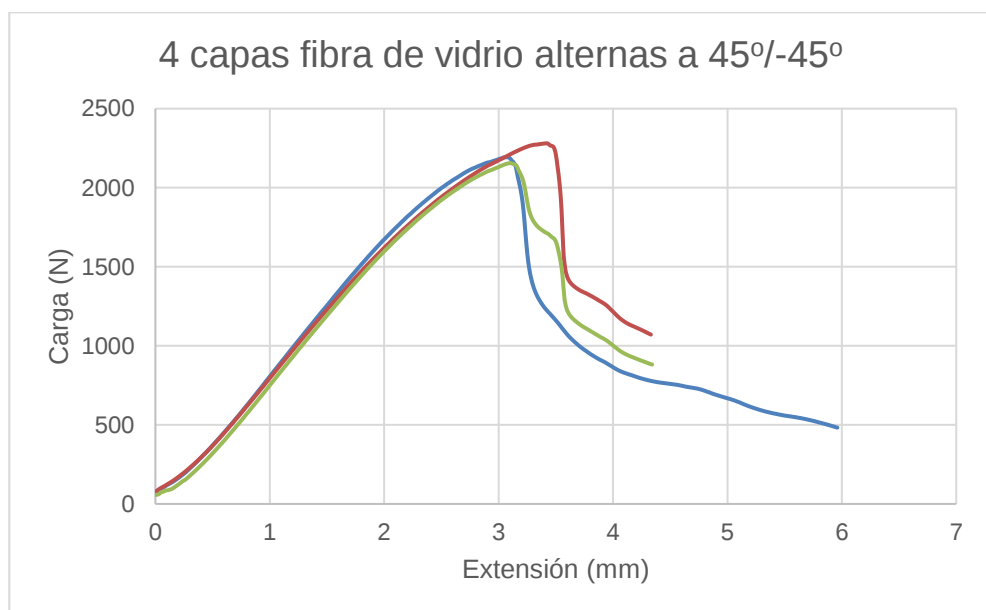


Gráfico 4.26: Gráfica carga-extensión probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 45°/-45°

Los datos de deformación de los ensayos se obtienen mediante el software Vic 2D-6, haciendo un proceso de correlación de imágenes de forma similar al realizado para los ensayos a tracción.

En primer lugar, se selecciona la secuencia de imágenes desde que se inicia cada ensayo hasta que finaliza y se calibra la primera imagen como referencia.

Después, se marca el área de interés, que será un polígono que contenga la zona central de la probeta, bordeando la entalla.

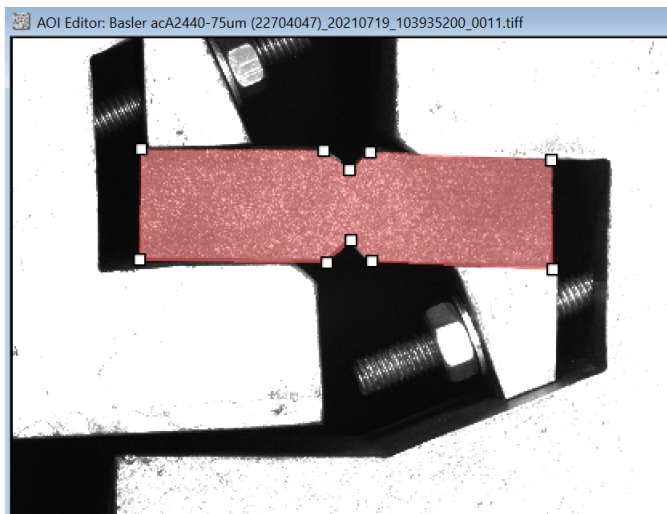


Ilustración 4.30: Selección de área de análisis probeta de cortante. Software Vic-2D 6

Posteriormente se selecciona el punto inicial del análisis y, por último, el número de subsets o divisiones del área de estudio y los steps.

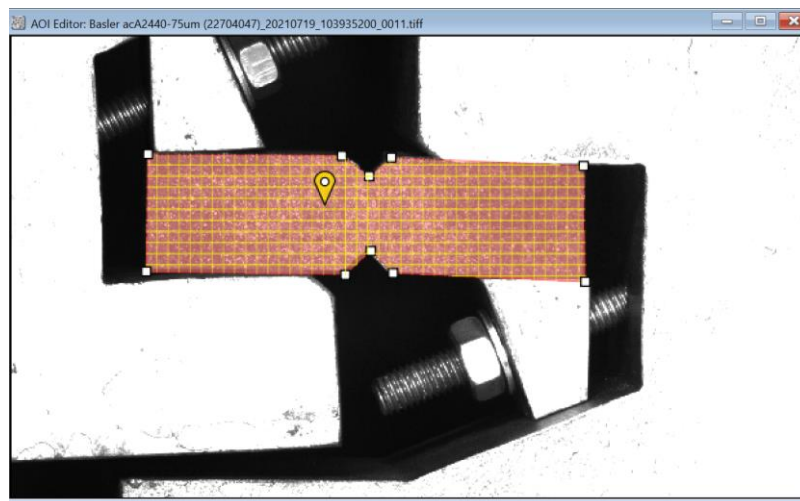


Ilustración 4.31: Selección de subset, step y punto inicial probeta de cortante. Software Vic-2D 6

A continuación, se da comienzo al análisis y, una vez finalizado, se seleccionan las opciones “Remove rigid motion” y “Smooth” para eliminar los datos erróneos.

Para obtener los resultados de deformación se coloca los dos extensómetros virtuales en ángulos de 45° y -45° tal como indica la norma. Se obtienen así dos datos de deformaciones, una para cada ángulo.

Para calcular el módulo de elasticidad hay que relacionar el incremento de la tensión con el incremento de deformación, de forma similar que en el ensayo de tracción.

Primero se calcula la tensión (MPa) con la *fórmula 4.4*.

La sección transversal inicial de la probeta se calcula en la entalla central. El ancho de la entalla es de 12 mm y el espesor de 5 mm. Esto da una sección de 60 mm².

Con la carga en cada instante dividida por la sección se obtiene la tensión.

La deformación e_{xy} se calcula mediante la *fórmula 4.5*, sumando los datos medidos por los extensómetros a 45° y -45° en valor absoluto.

A continuación, se muestran para cada patrón de impresión las gráficas de tensión (eje Y en MPa) frente a deformación (eje X).

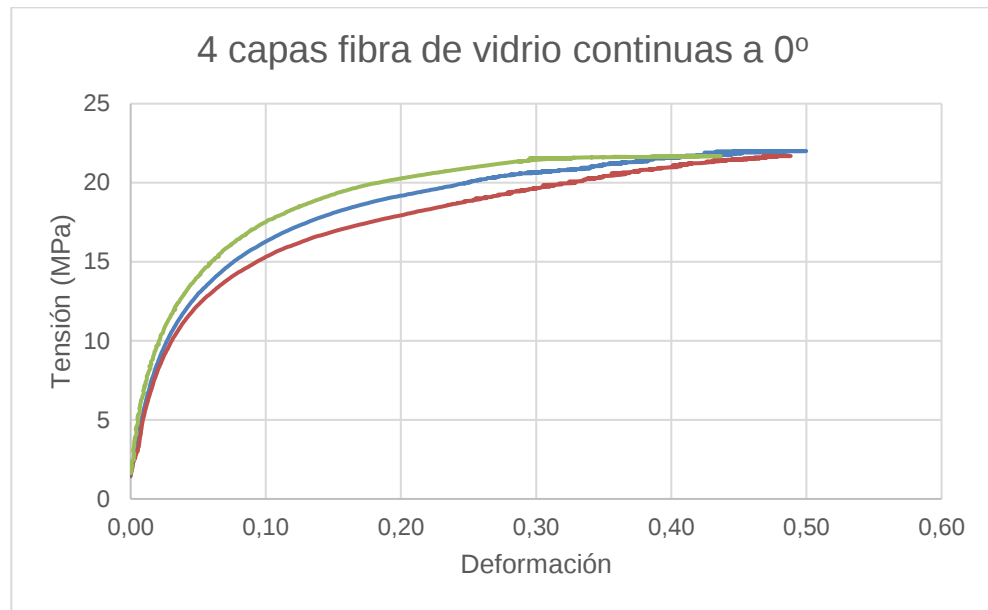


Gráfico 4.27: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°

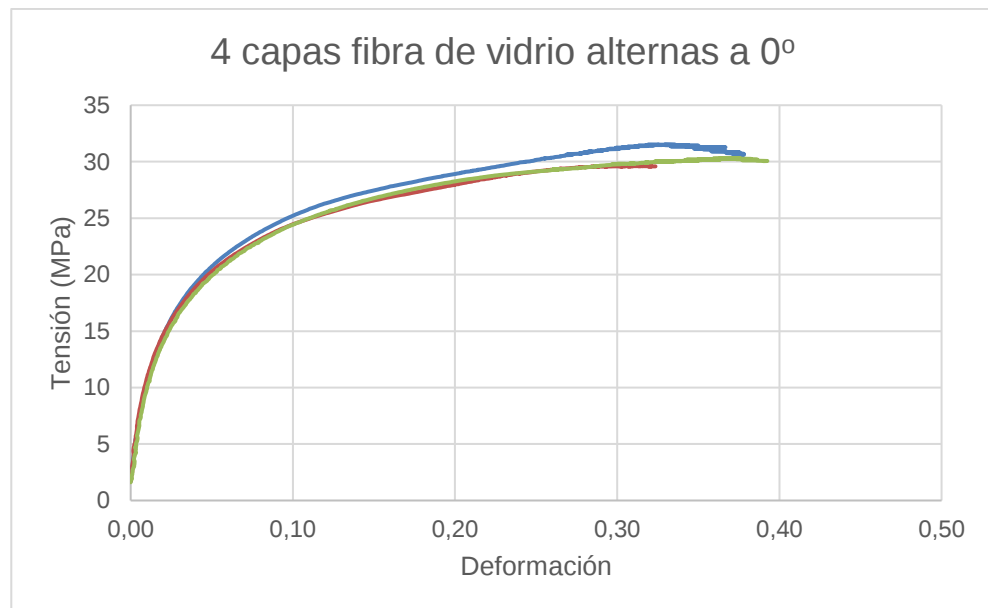


Gráfico 4.28: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alaterna a 0°

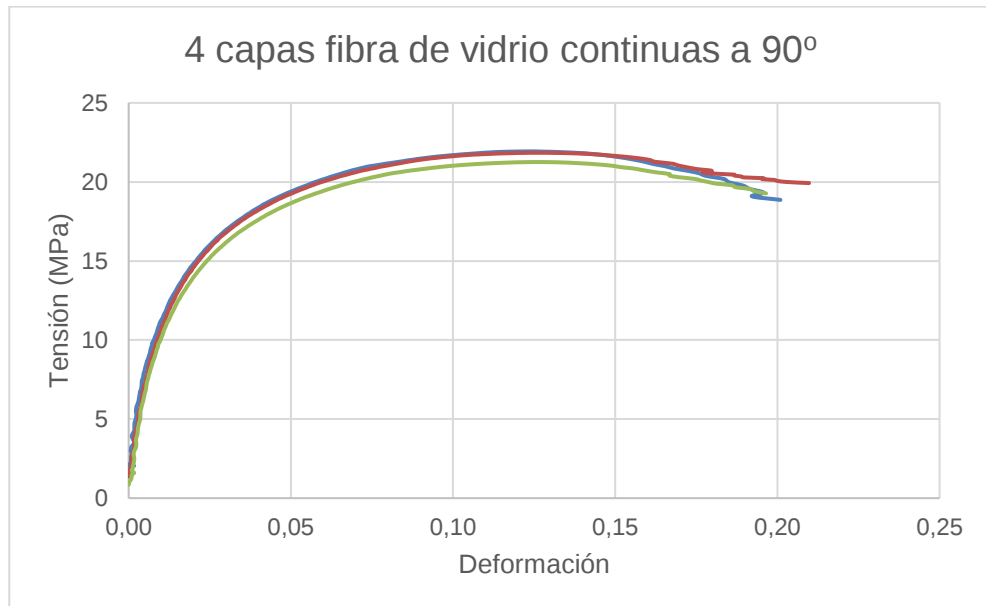


Gráfico 4.29: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 90°

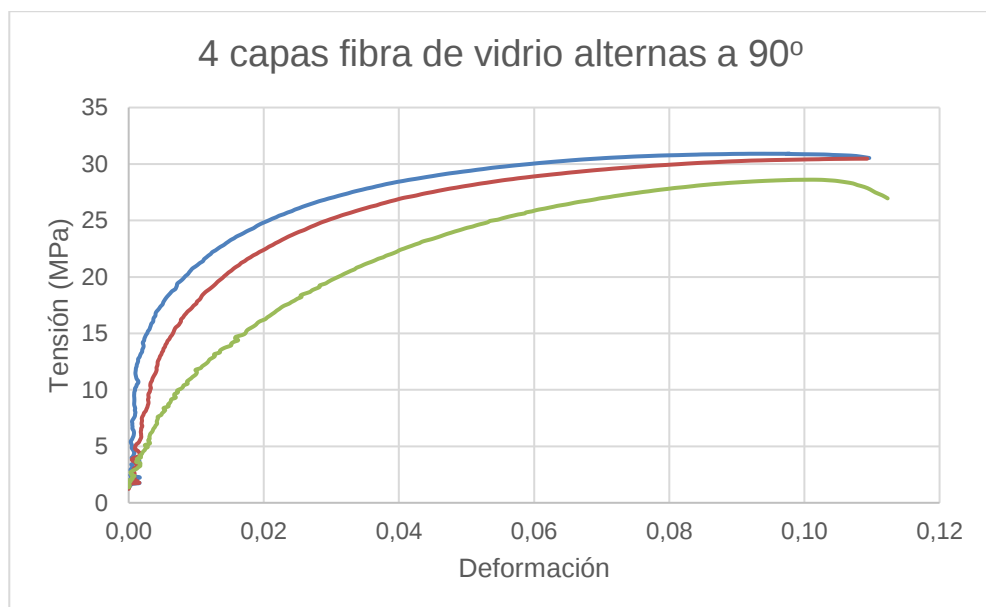


Gráfico 4.30: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 90°

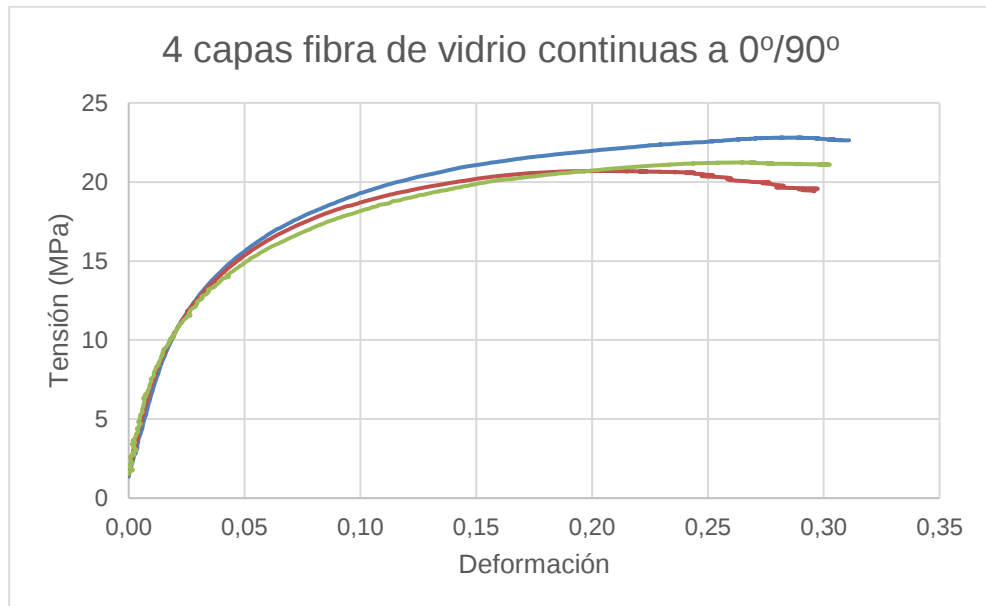


Gráfico 4.31: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 0°/90°

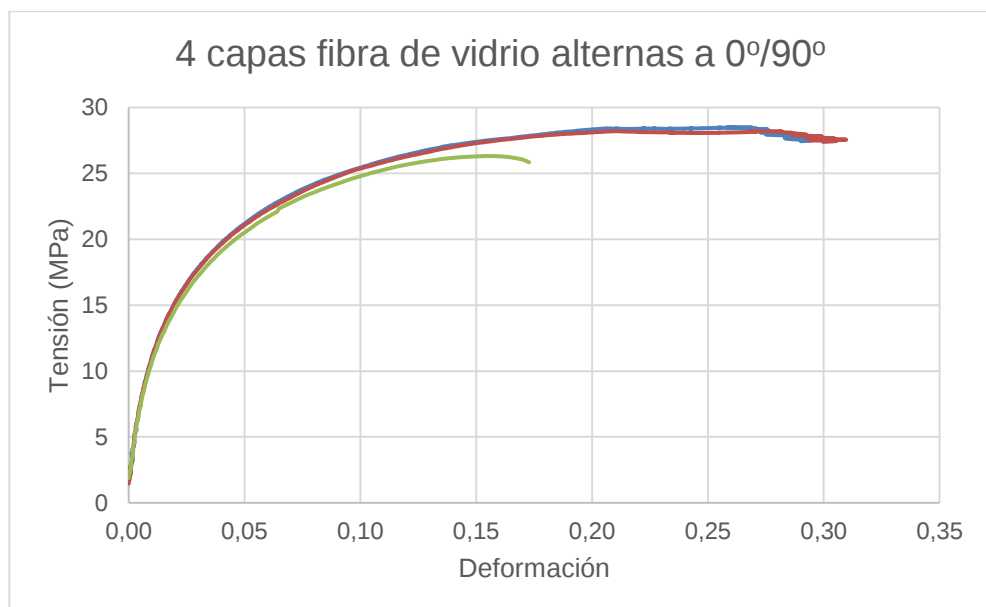


Gráfico 4.32: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 0°/90°

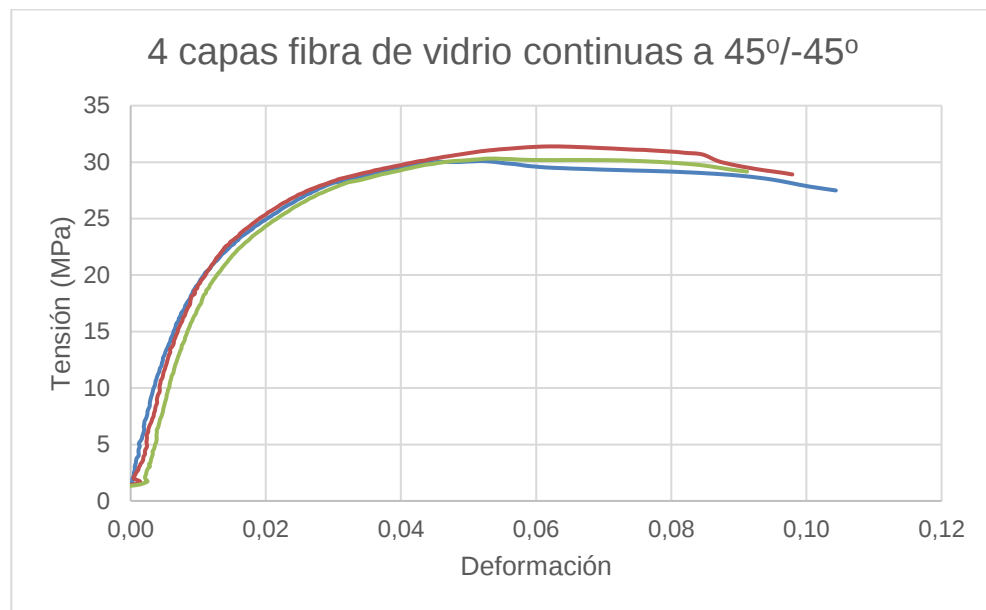


Gráfico 4.33: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración continua a 45°/-45°

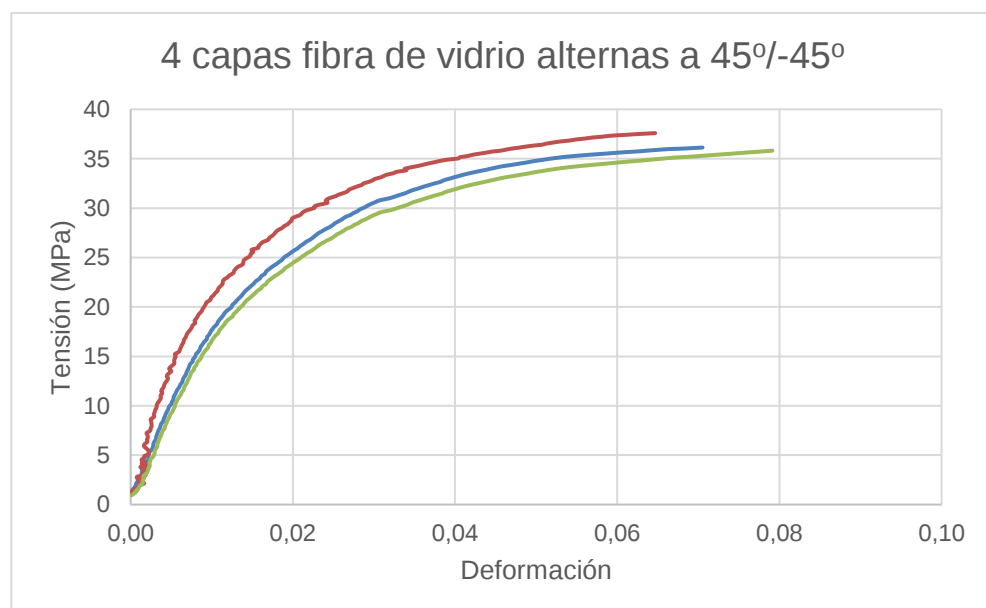


Gráfico 4.34: Gráfica tensión-deformación probetas con 4 capas de fibra de vidrio configuración alterna a 45°/-45°

Para el cálculo del módulo de elasticidad de compresión se selecciona el intervalo de datos que correspondan a la zona elástica, situados aproximadamente entre los valores de deformación 0,002 y 0,006. Se obtiene una gráfica como en el

caso de tracción, con los datos de esfuerzo (eje Y) frente a deformación (eje X) en la zona elástica para cada probeta.

Para obtener el módulo de elasticidad como se indica en la *fórmula 4.6* se realiza una regresión lineal para cada probeta, obteniéndose una ecuación para cada serie de datos y un valor de R^2 .

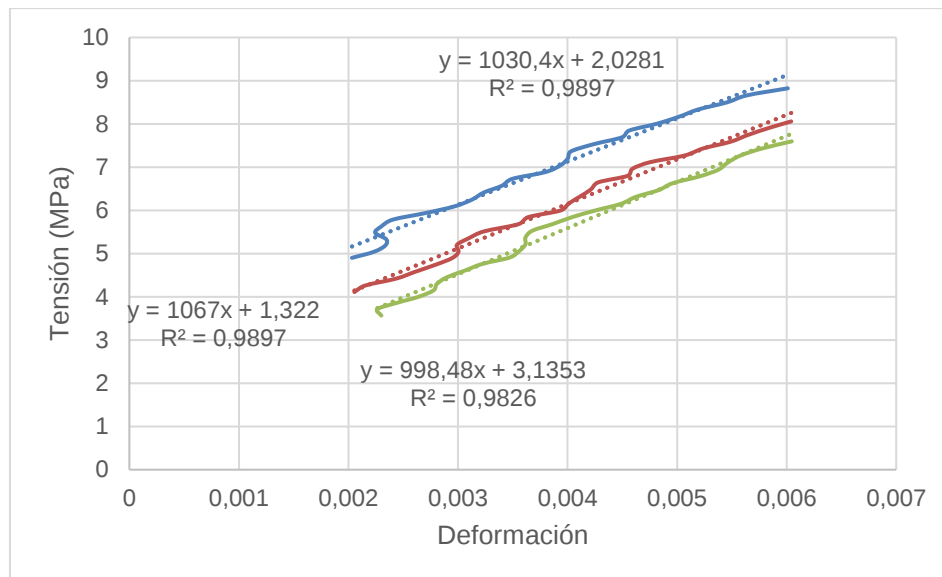


Gráfico 4.35: Gráfica tensión-deformación y pendientes configuración continua a 90°

La pendiente de cada recta (termino acompañado de x) corresponde con el módulo de elasticidad de cortante G.

Para cada configuración se realiza la media de los valores obtenidos para las tres probetas.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el siguiente apartado se analizan los resultados obtenidos para los ensayos de tracción y de cortante. Para cada uno de ellos se evalúa la tensión máxima soportada por cada configuración junto con su deformación correspondiente y el módulo de elasticidad tanto de tracción como de cortante.

Las tablas que se muestran a continuación para cada ensayo muestran, para cada grupo de probetas con los distintos ángulos de impresión y número de capas de fibra de vidrio con configuración continua o alterna, el módulo de elasticidad de cada probeta y la media de éstas, y la tensión máxima soportada junto con su deformación en ese instante.

5.1. Ensayos de tracción

Configuración capas de fibra de vidrio	Módulo de Young (MPa)	Young promedio (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Tensión máxima promedio (MPa)	Deformación de tensión máxima	Deformación de tensión máxima promedio
0° continuas	2616,5 2391 2429,5	2479	67,08 66,38 67,66	67,04	0,0467 0,0399 0,0384	0,0417
0° alternas	2610,5 2907 2436,4	2651,3	61,41 64,66 63,21	63,09	0,0360 0,0380 0,0367	0,0369
45°/-45° continuas	1710,1 1777,2 1696,3	1727,9	33,81 34,56 34,27	34,21	0,0521 0,0417 0,0487	0,0475
45°/-45° alternas	1697,4 1762,9 1665,6	1708,3	31,10 31,18 30,30	30,86	0,0427 0,0428 0,0415	0,0423
0°/90° continuas	2265 2381,2 2337,6	2327,9	50,53 51,30 50,73	50,85	0,0397 0,0432 0,0409	0,0413
0°/90° alternas	2371,5 2162,7 2231,2	2255,1	49,75 48,45 48,91	49,37	0,0460 0,0405 0,0473	0,0446
90° continuas	1345,6 1277,1 1243,8	1288,8	31,21 30,59 30,51	30,77	0,0469 0,0449 0,0455	0,0458
90° alternas	1428,8 1390,4 1507,7	1442,3	30,52 29,70 30,78	30,33	0,0424 0,0426 0,0444	0,0432

Tabla 5.1: Propiedades mecánicas de las probetas de tracción para las diferentes configuraciones

Gráficamente resulta más sencillo observar la diferencia de los resultados para las distintas configuraciones de impresión.

El siguiente diagrama de barras representa el módulo de Young de tracción para cada configuración ensayada:

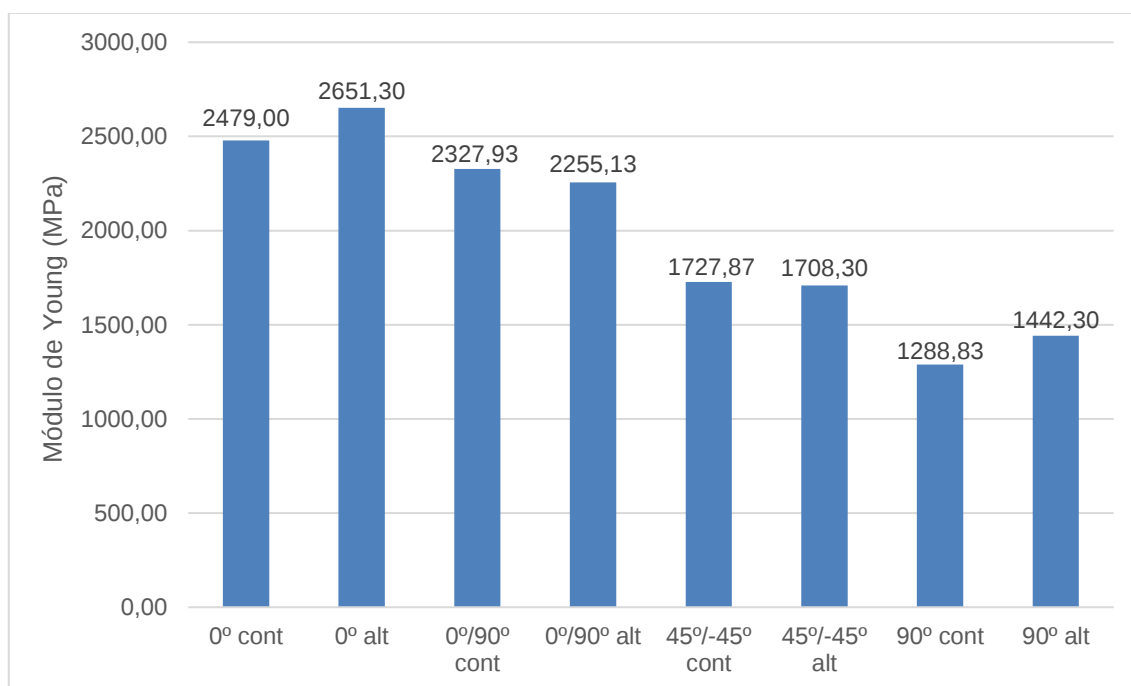


Gráfico 5.1: Diagrama de barras Módulo de Young para las distintas configuraciones de fibra en tracción

Lo primero que se observa en el diagrama es la configuración de capas que mejores resultados de módulo de Young presentan.

El ángulo de impresión de capas de refuerzo a 0° presenta un módulo de Young más alto que las demás, y aunque no se observa gran diferencia entre una configuración de capas continuas o alterna, si es cierto que la configuración alterna aumenta este valor.

Un ángulo de 90° presenta los valores más bajos de módulo de Young, pero al combinar capas de 0° y 90° de forma alterna aumenta el valor del módulo en aproximadamente un 60%.

Por último, se advierte que la configuración de 45°/-45° no presenta grandes valores de módulo de Young.

La máxima tensión soportada también se representa en un diagrama de barras:

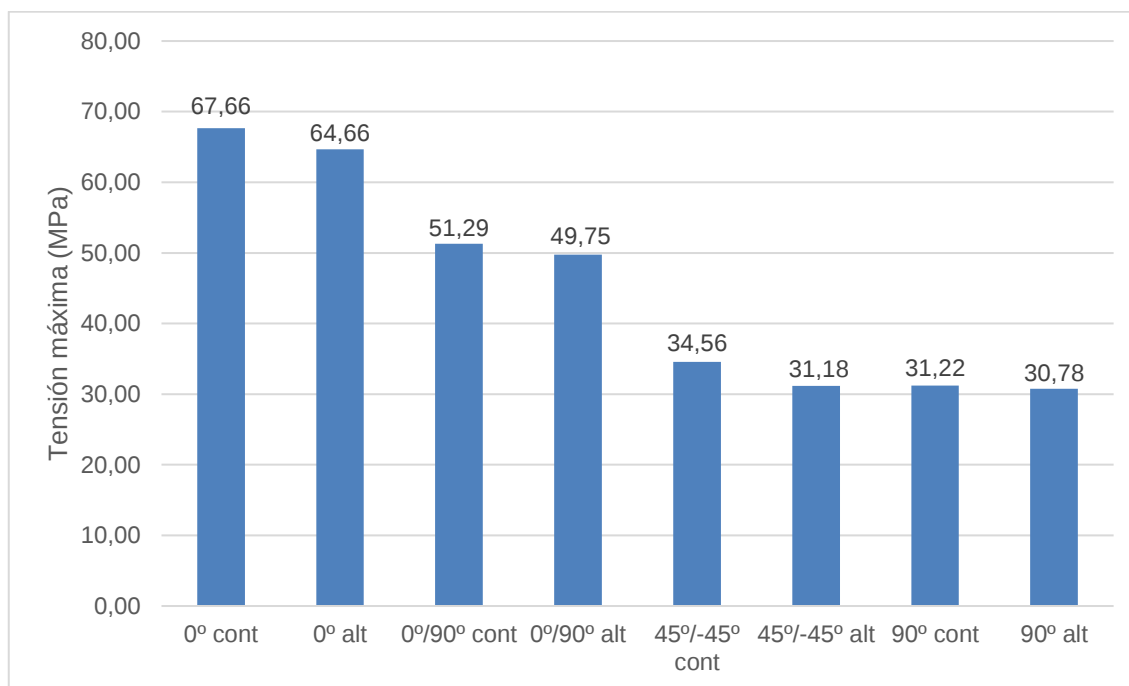


Gráfico 5.2: Diagrama de barras tensión máxima para las distintas configuraciones de fibra en tracción

Respecto a la tensión máxima soportada en tracción, se encuentran unos resultados similares a los de módulo de Young. La configuración de 0° prevalece sobre las demás siendo la más baja la configuración de 90°, y nuevamente una combinación de estas dos aumenta el valor de la tensión respecto a los 90°.

La configuración de 45°/-45° en este caso presenta valores muy bajo acercándose a los del ángulo de 90°.

Se observa un ligero aumento de la tensión soportada en la configuración continua frente a la alterna, aunque esta diferencia no es muy alta.

Por último, se representan las deformaciones que sufren las probetas en el instante en que la tensión alcanza su máximo:

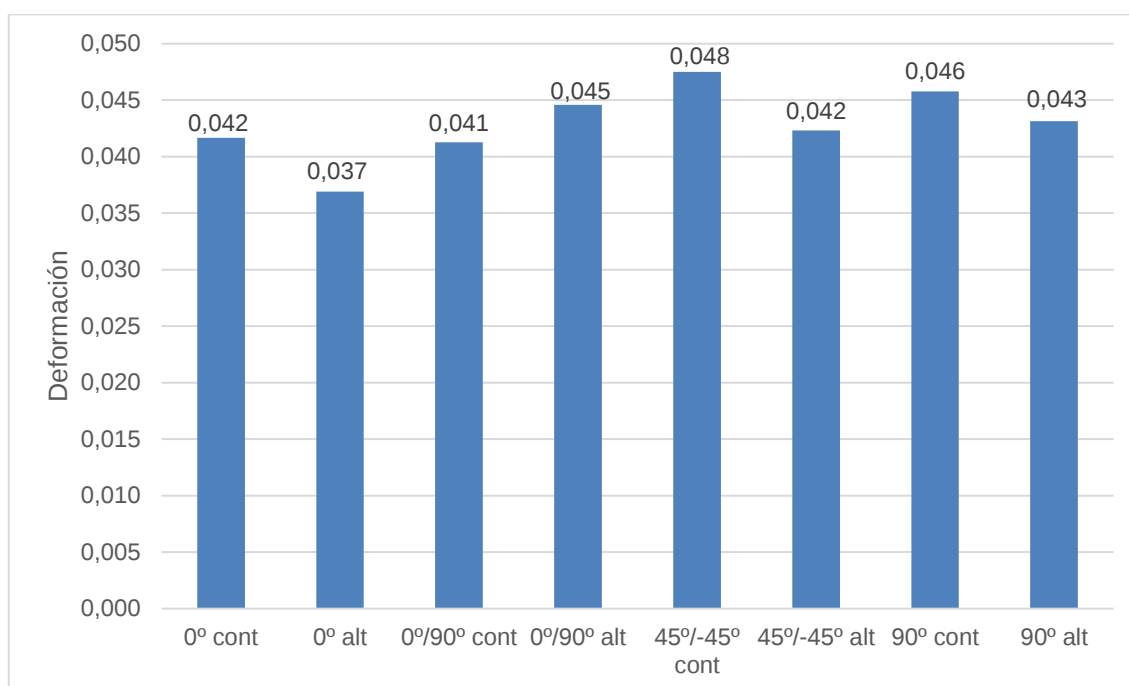


Gráfico 5.3: Diagrama de barras deformación para las distintas configuraciones de fibra en tracción

Respecto a las deformaciones que se presentan en el momento de tensión máxima, no se observa una diferencia significativa entre las distintas configuraciones, ya que todos estos valores oscilan entre 0,037 y 0,048 aproximadamente.

Por tanto, estos valores no permiten realizar un estudio claro entre la relación de configuración de capas/deformaciones, pero servirán más adelante para compararse con los valores de deformación en el caso de los ensayos de cortante.

Lo que se puede deducir de estos valores de deformación de rotura es que encontramos un material de comportamiento frágil en tracción, ya que la rotura ocurre con unas deformaciones de entre el 4% y el 5%. En las gráficas de tensión-deformación mostradas en el *apartado 4.1.3* ya se observaba que al contrario que en la mayoría de los plásticos, que presentan una zona elástica y otra plástica, el material se comporta de forma elástica, por lo que al alcanzar la tensión máxima éste rompe al instante.

En general, en los ensayos de tracción se muestra una buena precisión de los resultados, con poca dispersión de valores entre los diferentes especímenes ensayados de una misma configuración.

5.2. Ensayos de cortante

Configuración capas de fibra de vidrio	Módulo de Young (MPa)	Young promedio (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Tensión máxima promedio (MPa)	Deformación de tensión máxima	Deformación de tensión máxima promedio
0° continuas	425,8 566,4 343,4	445,2	21,70 22,00 21,70	21,80	0,4684 0,4797 0,4108	0,4530
0° alternas	949,9 981,7 1026,9	986,1	29,51 30,29 31,51	30,47	0,3159 0,3667 0,3271	0,3366
45°/-45° continuas	1907,7 1830 1909	1882,23	30,31 30,10 31,39	30,60	0,0532 0,0518 0,0619	0,0556
45°/-45° alternas	2281,2 2130 2030,1	2147,1	37,59 36,54 35,81	36,65	0,0804 0,0791 0,0647	0,0747
0°/90° continuas	525,9 524,8 586,8	545,8	21,23 20,69 22,80	21,58	0,2651 0,2052 0,2886	0,2530
0°/90° alternas	1020,3 1018,2 945,2	994,6	28,47 28,20 26,32	27,67	0,2691 0,2112 0,1560	0,2121
90° continuas	1067 1030,4 998,5	1032	21,93 21,84 21,26	21,68	0,1245 0,1239 0,1249	0,1244
90° alternas	1275,2 1174,3 1125,2	1191,7	30,91 30,47 28,61	29,99	0,0941 0,1076 0,1012	0,1010

Tabla 5.2: Propiedades mecánicas de las probetas de cortante para las diferentes configuraciones

Al igual que para los datos de tracción, se representan los valores de módulo de Young, tensión máxima soportada y deformación para tensión máxima para las distintas configuraciones de fibra de vidrio mediante diagramas de barras para observar mejor las diferencias.

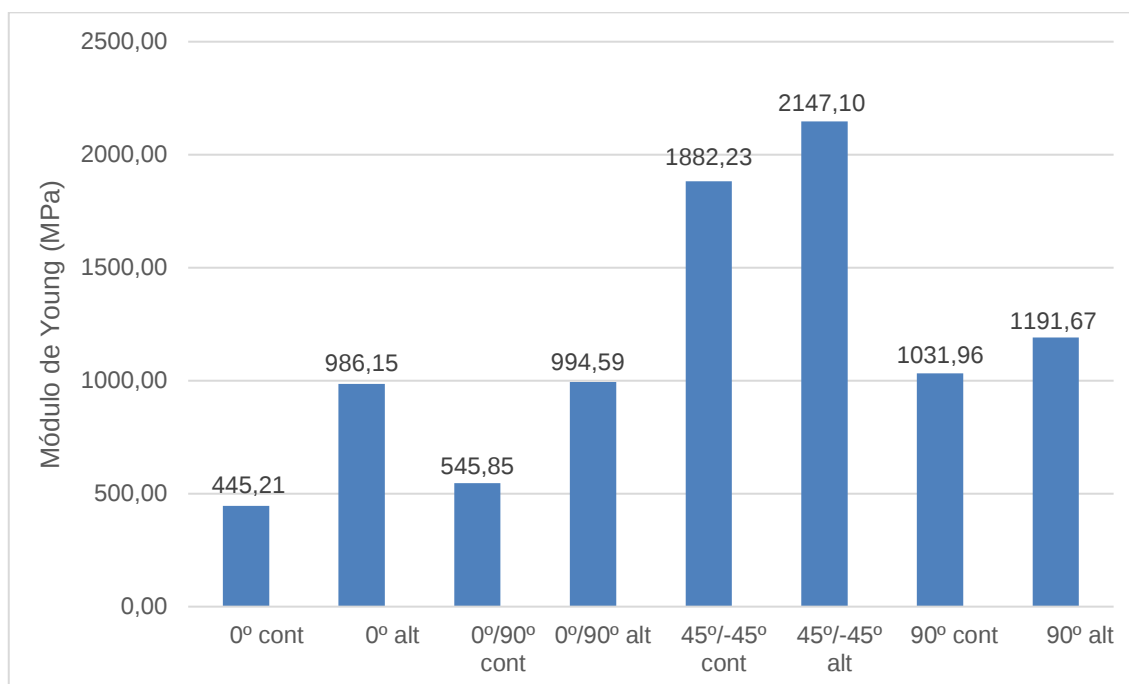


Gráfico 5.4: Diagrama de barras Módulo de Young para las distintas configuraciones de fibra en cortante

Respecto al módulo de Young en cortante se observa un claro dominio del ángulo de impresión de 45°/-45° sobre los demás, donde la configuración alterna alcanza un módulo de 2147,1 MPa, mientras que el segundo ángulo de impresión con mejores resultados, que es el de 90°, presenta un valor de módulo para su configuración alterna de 1191,7 MPa, una reducción muy significativa de aproximadamente un 45%.

Los peores resultados se presentan para el ángulo de 0° y para la combinación de 0°/90° aumentan estos valores, aunque ínfimamente.

Otra diferencia que se aprecia es que la configuración de capas alterna aumenta los valores de módulo de Young en cortante frente a la configuración continua de forma más significativa que en el caso de los ensayos a tracción.

La tensión máxima soportada también queda representada en el siguiente diagrama:

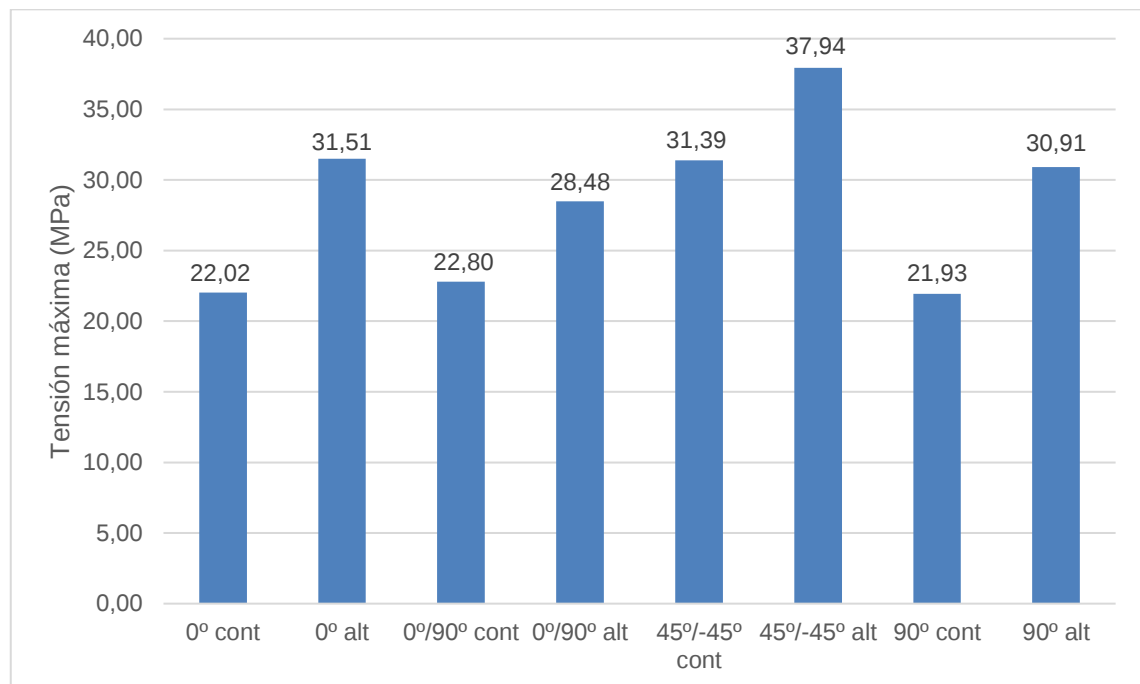


Gráfico 5.5: Diagrama de barras tensión máxima para las distintas configuraciones de fibra en cortante

Al igual que en el caso de los ensayos a tracción, la configuración con mejores resultados de módulo de Young en cortante, que es el ángulo de impresión de 45°/-45° presenta también los mejores resultados de tensión máxima soportada.

La configuración alterna sigue presentando mejores resultados frente a la continua de forma significativa, aunque en este caso, los ángulos de 0°, 90° o la combinación de ambos no presenta una gran diferencia de valores de tensión.

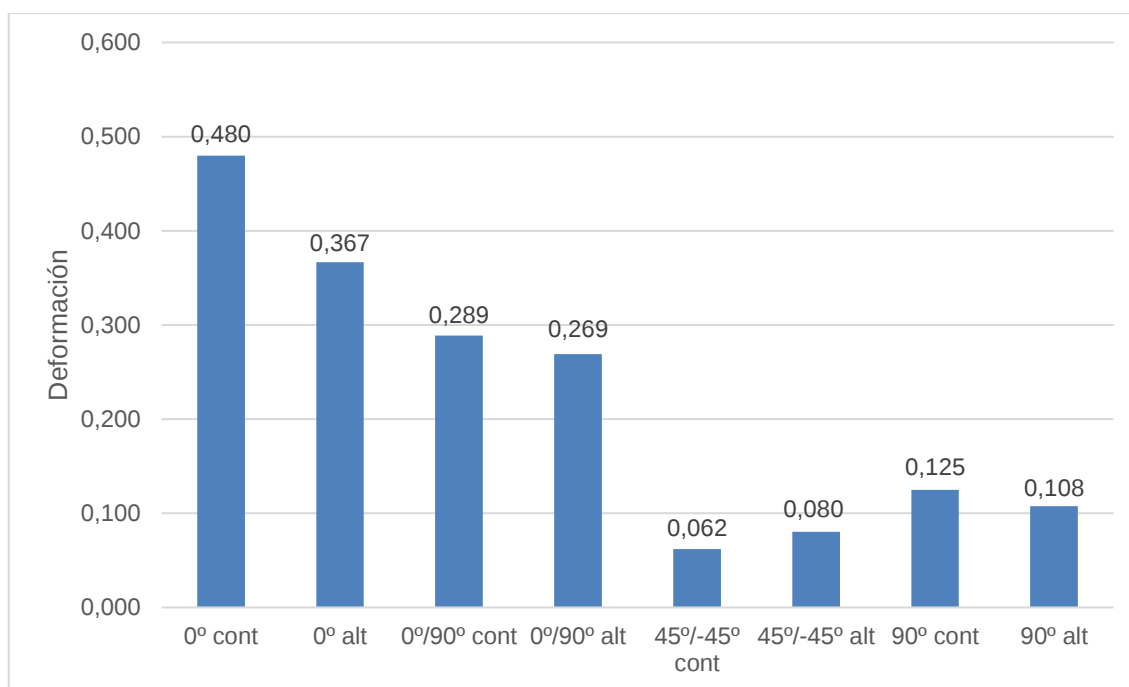


Gráfico 5.6: Diagrama de barras de deformación para las distintas configuraciones de fibra en tracción

En cuanto a deformaciones se puede observar, al contrario que las deformaciones en tracción, que existe una gran diferencia entre configuraciones en cortante.

En este caso, se puede apreciar que, a mayor módulo de Young de cortante, menor será la deformación que experimente la probeta en el momento de alcanzar la tensión máxima. Este suceso ya se apreciaba en las gráficas de tensión-deformación, en el que las probetas de 45°/-45° tenían una zona elástica mas pequeña que las demás configuraciones, alcanzando antes el comportamiento plástico.

En comparación con los ensayos de tracción, en cortante las probetas se comportan de forma más parecida a los plásticos, con una clara zona elástica y otra plástica, mostrándose más resistentes alcanzando la rotura en el menor de los casos con una deformación del 6,2%, llegando a valores del 48%.

Al contrario que en los resultados de tracción, los valores obtenidos en los ensayos de cortante presentan, en algunos casos, una mayor dispersión entre especímenes de una misma configuración de impresión.

6. CONCLUSIONES

En primer lugar, resaltar que se han cumplido los objetivos iniciales de este Trabajo de Fin de Grado de caracterización mecánica de probetas de onyx impresas en 3D y la comparación de los efectos referentes a la disposición del refuerzo de fibra continua de vidrio. Gracias a la realización del mismo se han adquirido los conocimientos necesarios para diseñar y fabricar piezas con composites mediante FDM, lo que pone de manifiesto el potencial de la impresión 3D como una técnica innovadora de fabricación para materiales complejos con cada vez mejores propiedades para su aplicación en la industria, permitiendo una fabricación rápida y de geometrías complejas a menor coste. Además, en este estudio se ha adquirido la habilidad de realizar correctamente ensayos de tracción y cortante como método de obtención de propiedades mecánicas de los materiales.

También destacar la gran utilidad que presenta la técnica de Correlación Digital de Imágenes como método de medir deformaciones y desplazamientos para caracterización mecánica de materiales durante la realización de ensayos. Al ser una técnica no invasiva ofrece una gran ventaja en el estudio de nuevos materiales y de nuevas técnicas de fabricación.

De los resultados obtenidos se puede afirmar que la disposición de la fibra de vidrio y su ángulo de impresión afecta a las propiedades de la pieza impresa final.

Atendiendo a las probetas de tracción, los ensayos demostraron que las mejores propiedades mecánicas se obtienen con un ángulo de impresión de la fibra de 0°, ya que presenta los valores más altos de Módulo de Young y de esfuerzo máximo soportado. Asimismo, la distribución de las capas de fibra de vidrio en configuración continua o alterna no influye significativamente en las propiedades mecánicas, o al menos no lo hace para un número pequeño de capas de refuerzo.

En el caso de las probetas de cortante, al analizar los resultados se observa un claro aumento de las propiedades mecánicas en ángulos de impresión de 45°/-45°, siendo en este caso más importante la distribución de las capas de refuerzo, donde la configuración alterna aumenta significativamente el módulo de elasticidad de cortante y la tensión máxima soportada.

Mencionar también para los ensayos realizados la dificultad y la dispersión de datos para cada uno de ellos. En el caso de los ensayos de tracción se obtienen unos resultados más precisos, con valores muy parecidos entre todos los especímenes de una misma configuración de impresión, y con un bajo porcentaje de ensayos con roturas en zonas de la probeta no deseada, mientras que, en el caso de los ensayos de cortante, fue necesario una mayor cantidad de intentos para obtener ensayos con una rotura válida y una vez conseguido, los valores presentan una mayor dispersión de datos. Esta diferencia se atribuye, a parte de la inexperiencia del alumno en la realización de los ensayos, al equipamiento disponible. Mientras que el ensayo a tracción se realizó con las mordazas originales de la máquina de ensayos, los ensayos a cortante necesitaron unas mordazas no originales construidas mecánicamente, presentando menor estabilidad durante el proceso, lo que provocaba desalineamiento de las probetas. Como resultado se aumentó el número de ensayos y se descartaron los que presentaban valores poco realistas y se seleccionaron los más adecuados para el estudio.

A partir de las conclusiones anteriores, queda de manifiesto que el diseño de las piezas fabricadas con estos materiales estará ligado a su aplicación. La elección del ángulo de impresión y la distribución de las capas de fibra de vidrio debe ser la adecuada atendiendo a la finalidad que se le va a dar a la pieza final para aprovechar al máximo la resistencia que va a aportar la fibra de refuerzo.

Por último, como conclusiones personales, destacar el conocimiento obtenido sobre impresión 3D y la curiosidad por indagar en las ventajas que puede llegar a ofrecer en el mundo de la ingeniería y en los nuevos materiales que pueden surgir para su impresión mediante FDM. Añadir también el descubrimiento de la herramienta DIC desconocida hasta la realización del proyecto y que ha resultado de gran utilidad. Para finalizar, resaltar el desarrollo personal y profesional que ha supuesto la realización de este trabajo de fin de grado y la resolución de errores y dificultades que han ido surgiendo en el camino.

7. TRABAJOS FUTUROS

Para futuros estudios sería interesante seguir estudiando como influyen las diferentes configuraciones de impresión en las propiedades finales de las probetas.

En este proyecto se ha estudiado la influencia del ángulo de impresión de la fibra y su distribución. En futuros trabajos se podría continuar estudiando cómo influye la distribución de las capas de fibra, pudiendo colocarse el refuerzo en la parte central de la probeta, por ejemplo.

Otras variables interesantes a estudiar serían el número de capas de refuerzo, aumentando progresivamente el número de capas de fibra de vidrio intercaladas en la probeta para observar cómo varían las propiedades de tracción y cortante, o también el número de anillos concéntricos impresos, variable que en este estudio no ha cobrado importancia.

Para obtener una caracterización completa de los materiales se podrían realizar distintos ensayos de dureza y fractura para conocer el comportamiento completo del onyx y la influencia del refuerzo de fibra de vidrio para cada aplicación.

Referencias

L.G.Blok, M.L.Longana, H.Yu, B.K.S.Woods. (2018). "*An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites*". ScienceDirect (Web).

Jorge Guillermo Díaz-Rodríguez, Alberto David Pertúz-Comas, Octavio Andrés González-Estrada. (2021). "*Mechanical properties for long fibre reinforced fused deposition manufactured composites*". ScienceDirect (Web).

Khalid Saeed, Alistair McIlhagger, Eileen Harkin-Jones, John Kelly, Edward Archer. (2020). "*Predication of the in-plane mechanical properties of continuous carbon fibre reinforced 3D printed polymer composites using classical laminated-plate theory*". ScienceDirect (Web).

Yiwei Hu, Raj B.Ladani, Milan Brandt, Yazhi Li, Adrian P.Mouritz. (2021). "*Carbon fibre damage during 3D printing of polymer matrix laminates using the FDM process*". ScienceDirect (Web).

Alicia Marchante. (2020). "*Guía completa: La impresión 3D de composites*". 3DNatives (Web).

INESEM Business School. (2019). "*Diseño e impresión 3D*". Editorial Euroinnova.

Universidad Politécnica de Valencia. "*Curso de Fundamentos de Ciencia de los Materiales: Materiales Poliméricos y Compuestos*". UPV (Web).

Hermenegildo Rodríguez Galbarro. "*Estudio de los Materiales Compuestos*". Ingemecanica (Web).

Álvaro Pardo Borrero. (2014). "*Aplicación de la correlación de imágenes digitales a diversos ensayos mecánicos*". Universidad de Sevilla.

E.López Alba, R. López-García, R.Dorado, F.A.Díaz. "*Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto*". Asociación Española de Ingeniería Mecánica.

Baltasar García Galiano. (2020). "*Análisis de probetas de tracción y cortante fabricadas en FDM y reforzadas mediante fibra de vidrio continua*". Universidad de Jaén.

Antonio González Ruiz. (2020). "*Análisis mecánico de probetas fabricadas en FDM mediante fibra de vidrio continua*". Universidad de Jaén.

Markforged. "*Material Datasheet: Composites*". Markforged (Web).

Markforged. "*Especificaciones del Producto: Mark Two*". Markforged (Web).

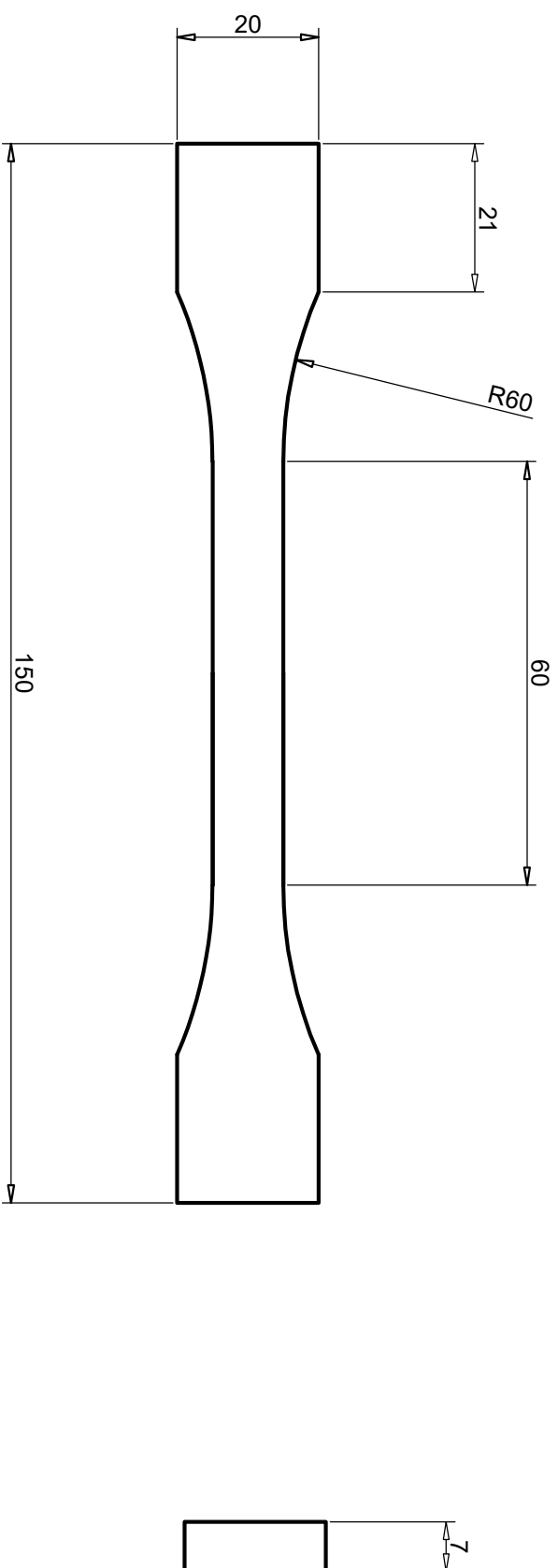
Instron. "*Instron Series 5500 Load Frames Reference Manual – Equipment*". Instron (Web).

UNE-EN ISO 527-1:2019. "*Plastics. Determination of tensile properties. Part 1: General principles*".

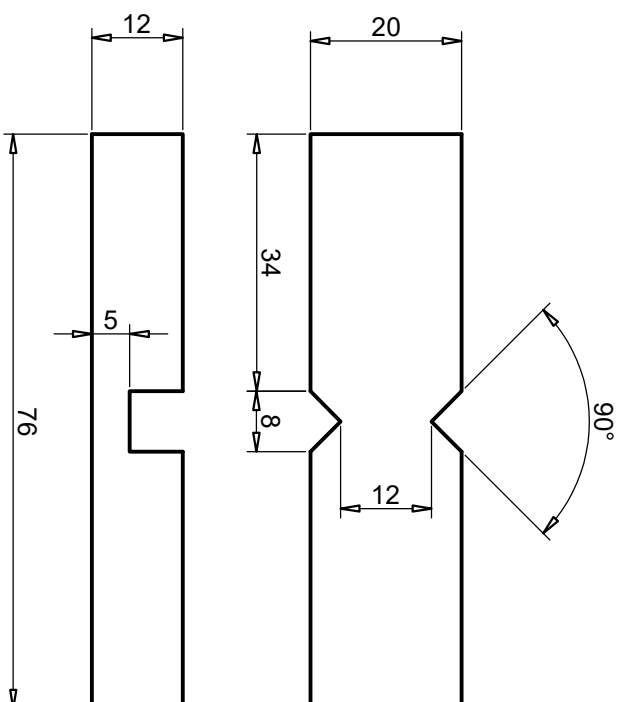
UNE-EN ISO 527-4:1997. "*Plastics. Determination of tensile properties. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre reinforced plastic composites*".

UNE-EN ISO 527-5:2009. *“Plastics. Determination of tensile properties. Part 5: Test conditions for unidirectional fibre reinforces plastic composites”*.

ATM D 5379/D 5379M-98. *“Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method”*.



PROYECTO: Estudio mecánico de la resistencia de probetas fabricadas mediante impresión 3D con fibra de vidrio y nylon reforzado con fibra de carbono			
 Escuela Politécnica Superior de Jaén		REALIZADO: Jesús Águila Perea	
Universidad de Jaén		Fecha: 03/2022	
PLANO 1		Escala: 1:1	
PROBETA DE ENSAYO A TRACCIÓN		Nº identif:	



PROYECTO:
Estudio mecánico de la resistencia de probetas fabricadas mediante impresión 3D con fibra de vidrio y nylon reforzado con fibra de carbono



**Escuela Politécnica
Superior de Jaén**

REALIZADO:
Jesús Águila Perea

Fecha:
03/2022

Firma:

Universidad de Jaén

PLANO 2

PROBETA DE ENSAYO A CORTANTE

Escala:
1:1

Nº identif: