



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS MECÁNICO DE PROBETAS FABRICADAS EN FDM MEDIANTE FIBRA DE VIDRIO CONTINUA

Alumno: Antonio González Ruiz

Tutor: Prof. D. Alberto García Collado
Dpto: Ingeniería de los Procesos de Fabricación

Septiembre, 2020



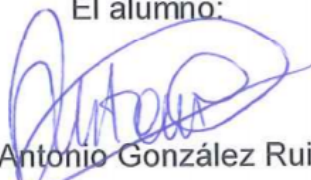
Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Mecánica

Don Alberto García Collado , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Análisis mecánico de probetas fabricadas en FDM mediante fibra de vidrio continua, que presenta Antonio González Ruiz, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, septiembre de 2020

El alumno:


Antonio González Ruiz

Los tutores:


Alberto García Collado
Daniel Carazo Álvarez

ÍNDICE

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS:.....	15
2.1. MANUFACTURACIÓN ADITIVA:	15
2.2. MATERIALES:.....	18
2.2.1. Fibras de refuerzo:	18
2.2.2. Fibra de vidrio:	19
2.2.3. Composites poliméricos reforzados con fibra de carbono.....	21
3. OBJETIVOS Y MOTIVACIONES:	23
4. ESTUDIOS PREVIOS:	23
5. EQUIPAMIENTO:	25
5.1. IMPRESORA MARKFORGED ONYX SERIES:.....	25
5.2. EQUIPO DE ENSAYOS:	38
5.3. SOFTWARE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES: VIC 2D-6:	41
6. PROGRAMA EXPERIMENTAL I: ENSAYO A TRACCIÓN:.....	43
6.1. NORMA ASTM 3039/D3039M:.....	43
6.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PROBETAS:	47
6.3. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:.....	49
6.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS:	52
6.5. CONCLUSIONES:.....	57
7. PROGRAMA EXPERIMENTAL II: ENSAYO A CORTANTE:	59
7.1. NORMA: ASTM D5379/D5379M-98:.....	59
7.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PROBETAS:	64
7.3. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:.....	67
7.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS:	69
7.5. CONCLUSIONES:.....	74
8. COEFICIENTE DE POISSON:.....	75
9. MODOS DE FALLO:	80
10. CONCLUSIONES:	84

11. TRABAJOS FUTUROS:.....85

12. Bibliografía87

ANEXOS.....89

ANEXO I: CARGA DE BOBINAS EN MARKFORGED ONYX SERIES.90

ANEXO II: NIVELACIÓN DE LA BANDEJA DE IMPRESIÓN: MARKFORGED ONYX
SERIES93

ANEXO III: TEST DE PILARES DE ONYX: MARKFORGED ONYX SERIES101

ANEXO IV: MANUAL VIC-2D 6:.....104

PLANO I: PROBETA TRACCIÓN

PLANO II: PROBETA A CORTANTE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Proceso de deposición de filamento fundido.	11
Ilustración 2: Bobina de filamento ABS.	12
Ilustración 3: Bobinas de filamento PLA.	12
Ilustración 4: Bobina de PC.	13
Ilustración 5: Proceso de eliminación de PVA de una pieza final.	13
Ilustración 6: Bobina de nylon.	13
Ilustración 7: Montaje experimental para procesamiento DIC.	14
Ilustración 8: Pieza impresa mediante la técnica SLA.	16
Ilustración 9: Proceso de impresión mediante SLS.	17
Ilustración 10: Proceso de impresión FFF.	18
Ilustración 11: Representación del efecto tamaño en la fibra de carbono.	19
Ilustración 12: Composiciones químicas más comunes para la fibra de vidrio.	19
Ilustración 13: Proceso de fabricación de la fibra de vidrio.	20
Ilustración 14: Forma final de la fibra de vidrio.	20
Ilustración 15: Propiedades físicas para fibras de vidrio tipo E.	21
Ilustración 16: Gráfica tensión-deformación comparativa entre ABS y Onyx.	22
Ilustración 17: Patrón concéntrico a la izquierda, patrón isotrópico a la derecha.	23
Ilustración 18: Dimensiones de la impresora.	25
Ilustración 19: Proceso de deposición de material fundido.	26
Ilustración 20: Principales sistemas electromecánicos de una impresora.	27
Ilustración 21: Principales elementos del sistema de deposición de una impresora.	28
Ilustración 22: Vista frontal de la impresora.	28
Ilustración 23: Embalaje bobina de Onyx.	29
Ilustración 24: Caja hermética para bobina de Onyx.	29
Ilustración 25: Vista superior del extrusor.	30
Ilustración 26: Vista inferior del extrusor.	30
Ilustración 27: Pantalla de inicio.	31
Ilustración 28: Menú de la impresora.	31
Ilustración 29: Pantalla de inicio del software Eiger.	32
Ilustración 30: Menú de ayuda. Software Eiger.	32
Ilustración 31: Pantalla previa a la impresión. Software Eiger.	33
Ilustración 32: Patrón de relleno triangular. Software Eiger.	33
Ilustración 33: Patrón de relleno hexagonal. Software Eiger.	34
Ilustración 34: Patrón de relleno rectangular. Software Eiger.	34
Ilustración 35: Mínima densidad de relleno. Software Eiger.	34
Ilustración 36: Valor por defecto de la densidad de relleno. Software Eiger.	34
Ilustración 37: Máxima densidad de relleno. Software Eiger.	35
Ilustración 38: 10 capas, 5 capas en la cara superior y 5 capas en la cara inferior. Software Eiger.	35
Ilustración 39: 4 capas de pared. Software Eiger.	35
Ilustración 40: El contorno amarillo indica las capas de fibra. Software Eiger.	36
Ilustración 41: Patrón concéntrico. Software Eiger.	36
Ilustración 42: Patrón isotrópico. Software Eiger.	36
Ilustración 43: Menú Internal View. Software Eiger.	37
Ilustración 44: Menú para la personalización de la impresión de la fibra. Software Eiger.	37
Ilustración 45: Máquina de ensayos.	38
Ilustración 46: Principales elementos de la máquina de ensayos.	39
Ilustración 47: Mordazas para ensayos de tracción.	40
Ilustración 48: Mordazas para ensayo de cortante.	40
Ilustración 49: Cámara del laboratorio con la que se grabaron todos los ensayos.	41
Ilustración 50: Esquema del funcionamiento de DIC.	42
Ilustración 51: Requerimientos geométricos de las probetas, según ASTM D3039.	44
Ilustración 52: Recomendaciones geométricas para probetas, según ASTM D3039.	44
Ilustración 53: Catálogo de los modos de fallo.	45
Ilustración 54: Posibles respuestas tensión-deformación.	46
Ilustración 55: Patrón concéntrico, capas de fibra de vidrio conriguas, 6 anillos.	47
Ilustración 56: Patrón isotrópico, capas de fibra de vidrio contiguas, capa a 0°.	48
Ilustración 57: Patrón isotrópico, fibra contigua, capa con fibra a 45°.	48

Ilustración 58: Patrón concéntrico, fibra alternada, 6 anillos.....	48
Ilustración 59: Patrón isotrópico, fibra alternada, capa a 0°.....	48
Ilustración 60: Patrón isotrópico, fibra alternada, capa con fibra a 45°.....	49
Ilustración 61: Montaje completo del ensayo a tracción.....	50
Ilustración 62: Probeta instalada en las mordazas en posición de reposo.....	51
Ilustración 63: Probeta en el instante de rotura.....	51
Ilustración 64: Extensómetro virtual en DIC.....	52
Ilustración 65: Deformación frente al tiempo en DIC.....	52
Ilustración 66: Gráfica tensión-deformación del grupo TCON.....	53
Ilustración 67: Gráfica tensión-deformación del grupo TIC.....	54
Ilustración 68: Gráfica tensión-deformación para el grupo TI.....	55
Ilustración 69: Gráfica tensión-deformación para el grupo TII.....	56
Ilustración 70: Comparación del módulo elástico para los diferentes grupos.....	57
Ilustración 71: Comparación de la tensión de rotura para los diferentes grupos.....	58
Ilustración 72: Comparación de la deformación de rotura para los diferentes grupos.....	58
Ilustración 73: Especificaciones geométricas de las probetas de cortante.....	59
Ilustración 74: Situación de los extensómetros.....	60
Ilustración 75: Geometría y tolerancia de las probetas.....	60
Ilustración 76: Sistema de coordenadas del material.....	61
Ilustración 77: Posibles orientaciones de los planos del material.....	61
Ilustración 78: Colocación de las probetas en las mordazas.....	62
Ilustración 79: Formas comunes de fallo.....	63
Ilustración 80: Respuesta tensión-deformación para ensayos a cortante.....	64
Ilustración 81: Patrón concéntrico, capas de fibra contiguas, 6 anillos.....	65
Ilustración 82: Patrón isotrópico, capas de fibra contiguas, fibra a 0°.....	65
Ilustración 83: Patrón isotrópico, capas de fibra contiguas, fibra a 45°.....	66
Ilustración 84: Patrón concéntrico, capas de fibra intercaladas.....	66
Ilustración 85: Patrón isotrópico, capas de fibra intercaladas, fibra a 0°.....	66
Ilustración 86: Patrón isotrópico, capas de fibra intercaladas, fibra a 45°.....	66
Ilustración 87: Patrón concéntrico en probeta real.....	67
Ilustración 88: Probeta instalada en las mordazas en posición de reposo.....	67
Ilustración 89: Probeta en su posición de máxima deformación.....	68
Ilustración 90: Extensómetros virtuales en DIC.....	68
Ilustración 91: Deformaciones de ambos extensómetros mostrados en la imagen 90.....	69
Ilustración 92: Gráfica tensión-deformación para el grupo CCON.....	70
Ilustración 93: Gráfica tensión-deformación para el grupo CIC.....	71
Ilustración 94: Gráfica tensión-deformación del grupo CI.....	72
Ilustración 95: Gráfica tensión-deformación para el grupo CII.....	73
Ilustración 96: Comparación del módulo de elasticidad transversal.....	74
Ilustración 97: Comparación de la tensión máxima.....	74
Ilustración 98: Comparación de la deformación máxima.....	75
Ilustración 99: Coeficiente de Poisson del grupo TCON.....	76
Ilustración 100: Coeficiente de Poisson del grupo TI.....	77
Ilustración 101: Coeficiente de Poisson del grupo TIC.....	78
Ilustración 102: Coeficiente de Poisson del grupo TII.....	79
Ilustración 103: Rotura AGM.....	81
Ilustración 104: Rotura AGM1.....	81
Ilustración 105: Rotura AGM2.....	82
Ilustración 106: Rotura SGM.....	82
Ilustración 107: Probeta de ensayo a cortante deformada por la pestaña.....	83
Ilustración 108: Probeta de ensayo a cortante deformada.....	83
Ilustración 109: Separación de las capas en la zona de agarre.....	84
Ilustración 110: Envoltorio de la bobina de onyx.....	90
Ilustración 111: Caja hermética para onyx.....	91
Ilustración 112: A la izquierda se muestran los materiales necesarios, a la derecha se muestra una vista inferior del sistema de extrusión.....	93
Ilustración 113: Menú inicial de la pantalla de la impresora.....	94
Ilustración 114: Paso 2 detallado.....	94
Ilustración 115: Vista inferior de la bandeja de impresión.....	95

Ilustración 116: A la izquierda se muestra la acción en la pantalla de la impresora y a la derecha se muestra el cabezal de impresión en la posición indicada.	95
Ilustración 117: Colocación de la cuña bajo el extrusor de plástico.	96
Ilustración 118: Siguiente acción en el proceso de nivelado.	96
Ilustración 119: Siguiente acción en el proceso de nivelado.	97
Ilustración 120: En la imagen superior se muestra la descripción de la acción y en la imagen inferior se resalta en amarillo el tornillo que debemos tocar.	98
Ilustración 121: Últimas acciones del proceso.	98
Ilustración 122: Carcasa impresa sobre la bandeja de impresión.	99
Ilustración 123: Descripción que se muestra en la pantalla de un buen calibrado.	99
Ilustración 124: Niveles que conforman la carcasa y las marcas que debe dejar.	100
Ilustración 125: Pasos iniciales.	101
Ilustración 126: Siguientes pasos.	101
Ilustración 127: Pilares impresos en el laboratorio.	102
Ilustración 128: Pilares impresos con una bobina húmeda.	102
Ilustración 129: Problemas de subextrusión.	102
Ilustración 130: Pilares propios de un extrusor en mal estado.	103
Ilustración 131: Pilares propios de una correa desajustada.	103
Ilustración 132: Pantalla de trabajo VIC-2D 6.	104
Ilustración 133: Menú superior.	104
Ilustración 134: Menú inicial.	106
Ilustración 135: Comando Speckle Image.	106
Ilustración 136: Menú edición de imágenes (AOi).	107
Ilustración 137: Pantalla del comando 'Calibration Scale'.	108
Ilustración 138: Menú de edición AOi.	108
Ilustración 139: Sección de la imagen que se va a analizar en rojo.	109
Ilustración 140: Pantalla de análisis.	110
Ilustración 141: Selección del comando 'Data'.	110
Ilustración 142: Remove Rigid Motion.	111
Ilustración 143: Smooth.	111
Ilustración 144: Menú 'Data' dentro de la sección AOi.	111
Ilustración 145: Extensómetros virtuales.	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Grupo de probetas para ensayo a tracción.....	47
Tabla 2: Tabla de resultados para el grupo TCON.....	53
Tabla 3: Tabla de resultados para el grupo TIC.....	54
Tabla 4: Tabla de resultados para el grupo TI.....	55
Tabla 5: Tabla de resultados para el grupo TII.....	56
Tabla 6: Grupo de probetas para el ensayo a cortante.....	65
Tabla 7: Tabla de resultados para el grupo CCON.....	70
Tabla 8: Tabla de resultados para el grupo CIC.....	71
Tabla 9: Tabla de resultados para el grupo CI.....	72
Tabla 10: Tabla de resultados para el grupo CII.....	73
Tabla 11: Valores del coeficiente de Poisson del grupo TCON.....	76
Tabla 12: Valores del coeficiente de Poisson del grupo TI.....	77
Tabla 13: Valores del coeficiente de Poisson del grupo TIC.....	78
Tabla 14: Valores del coeficiente de Poisson del grupo TII.....	79
Tabla 15: Asignación del código de fractura del ensayo a tracción.....	80

RESUMEN

Aunque tiempo atrás la impresión 3D se ha utilizado para realizar prototipos rápidos, actualmente el interés en este campo está creciendo para poder fabricar piezas que puedan emplearse en aplicaciones más exigentes. Para una amplia difusión de la impresión 3D, tanto técnicas como materias primas necesitan de mejoras y desarrollo para alcanzar los requerimientos de elementos estructurales reales.

En el proceso de deposición de material fundido, FDM o FFF en castellano, se utiliza un filamento polimérico continuo como material de alimentación. El filamento es llevado hasta un extrusor y es calentado hasta un estado casi fundido, permitiendo de esta manera que el filamento pase a través de un orificio extrusor precalentado, donde se depositará en una superficie de impresión.

Los grandes inconvenientes de la técnica FDM son: la formación de estructuras con grandes porosidades interiores en el componente fabricado, lo que conlleva a malas propiedades mecánicas, y el acabado superficial de las piezas es pobre debido al 'escalonamiento' que se forma al apilar capa sobre capa. Estas limitaciones son las que han obstaculizado la adopción del uso de piezas impresas en 3D para usos finales, limitándolas a la realización de prototipos.

Son muchos los estudios que se han dedicado a investigar y mejorar los procesos de impresión y, sobre todo, los materiales empleados. La incorporación de fibras de refuerzo ha supuesto un gran avance para esta técnica pues nos permite incrementar las propiedades mecánicas de los termoplásticos tradicionalmente usados.

En este estudio se evaluará el comportamiento de probetas impresas en FDM con matriz de nylon con fibra de carbono (onyx) reforzadas con fibra de vidrio continua. Las probetas se someterán a esfuerzos de tracción y cortante mientras los ensayos se graban, para realizar posteriormente análisis DIC, lo que nos dará una caracterización mecánica completa del comportamiento del material.

ABSTRACT

Although 3D printing has long been used for rapid prototyping, today the interest in this field is growing to be able to manufacture parts that can be used in more demanding applications.

For a wide diffusion of 3D printing, both techniques and raw materials need to be improved and developed to meet the requirements of real structural elements.

In the process of deposition of molten material, FDM, a continuous polymeric filament is used as feed material. The filament is brought into an extruder and heated to a near molten state, thus allowing the filament to pass through a preheated extruder hole, where it will be deposited on a printing surface.

The major drawbacks of the FDM technique are: the formation of structures with large internal porosities in the manufactured component, which leads to poor mechanical properties, and the surface finish of the pieces is poor due to the 'stepping' that is formed when stacking layer over layer.

These limitations are what have hampered the adoption of the use of 3D printed parts for end uses, limiting them to prototyping.

Many studies have been devoted to researching and improving printing processes and materials used. The incorporation of reinforcing fibers has been a great advance for this technique as it allows us to increase the mechanical properties of traditionally used thermoplastics.

This study seeks to explore the mechanical behaviour of specimens printed in FDM with a nylon matrix with carbon fiber (onyx) reinforced with continuous glass fiber. The specimens will be subjected to tensile and shear stresses while the tests are recorded, to later perform DIC analysis, which will give us a complete mechanical characterization of the material.

1. INTRODUCCIÓN

Aunque tiempo atrás la fabricación aditiva se ha enfocado en la realización de prototipados rápidos, actualmente el interés en esta innovadora tecnología de fabricación está creciendo gracias al desarrollo de nuevas técnicas y de nuevos materiales que permiten obtener piezas para aplicaciones más exigentes sin necesidad de un mecanizado posterior, necesitando por lo tanto menor tiempo de fabricación y abaratando los costes de producción.

La fabricación aditiva abarca tres diferentes métodos: SLS (sinterización selectiva por láser) este método consiste en la fusión de materiales en polvo gracias a un láser que avanza capa a capa, SLA (estereolitografía) consiste en la solidificación de una resina gracias a una luz ultravioleta, y finalmente, FFF (fabricación con filamento fundido) en el que un filamento polimérico se calienta y se extrude.

Éste último método es la técnica de fabricación aditiva más extendida y versátil, de fácil uso para usuarios particulares y con gran proyección y flexibilidad para empresas, permite la fabricación rápida y barata de prácticamente cualquier geometría.

En el proceso de fabricación de filamento fundido, FFF, se emplea un filamento polimérico continuo como material de alimentación. El filamento es llevado hasta un extrusor y es calentado hasta un punto cercano a la fusión, permitiendo de esta manera que el filamento pase a través de un orificio extrusor precalentado, donde se depositará sobre una bandeja o cama de impresión. Una vez que una capa ha sido impresa siguiendo un patrón previamente diseñando, la superficie de impresión baja, o el extrusor de plástico se eleva sobre el espesor de capa impresa para depositar la siguiente capa de material.

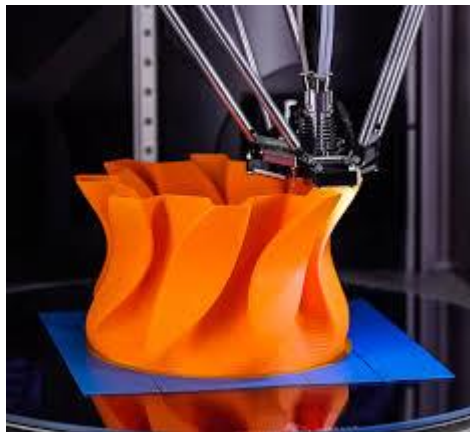


Ilustración 1: Proceso de deposición de filamento fundido.

Para este método de impresión se emplean filamentos de polímeros, cuya principal característica es que son polímeros termoplásticos, lo que permite que el material sea maleable a temperaturas elevadas, facilitando su extrusión. Los filamentos más empleados son:

- ABS: tiene una base de petróleo. Experimenta una disminución de sus propiedades mecánicas si se expone mucho tiempo a la luz solar, por lo que debe ser almacenado en un recipiente sellado. Necesita que la bandeja de impresión se encuentre precalentada para evitar defectos de impresión. Las piezas resultantes son ligeras, fuertes y presentan una buena resistencia a los impactos.



Ilustración 2: Bobina de filamento ABS.

- PLA: se caracteriza por ser biodegradable ya que su materia prima es rica en almidón. A diferencia del ABS éste requiere una temperatura de impresión menor y no requiere que la bandeja esté precalentada. Propiedades mecánicas muy similares al ABS aunque algo peor la resistencia a impactos.

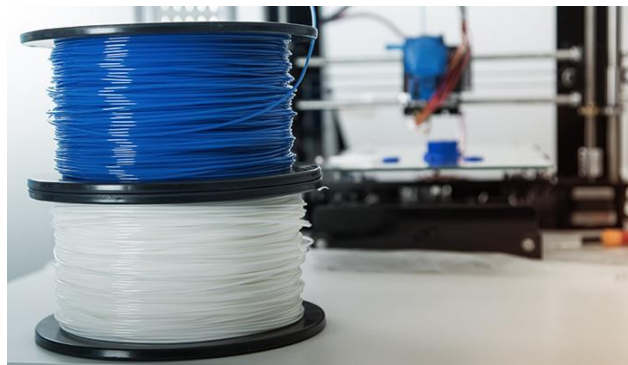


Ilustración 3: Bobinas de filamento PLA.

- PC: posee gran resistencia a altas temperaturas a diferencia del ABS y PLA, por lo que requiere también una elevada temperatura de impresión y una bandeja calefactable, aunque no posee una buena resistencia a impactos.



Ilustración 4: Bobina de PC.

- PVA: la ventaja de este material es que es soluble en agua, por lo que lo convierte en el material ideal para la fabricación de apoyos en las piezas que requieran una geometría más exigente, bastaría con sumergir la pieza impresa en agua y obtendríamos la pieza totalmente limpia de residuos, sin embargo, su gran inconveniente es la degradación que sufre al absorber humedad, por lo que debe conservarse en recipientes herméticos.

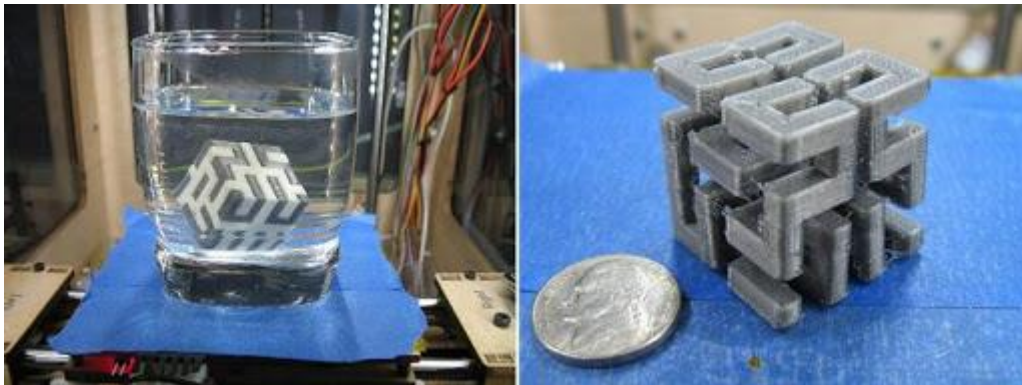


Ilustración 5: Proceso de eliminación de PVA de una pieza final.

- NYLON: del grupo de las poliamidas, se caracteriza por ser flexible, resistente a impactos y más duradero que el ABS o PLA.



Ilustración 6: Bobina de nylon.

Cabe mencionar que dos grandes inconvenientes de la técnica FFF es la formación de estructuras con porosidades internas, lo que conduce a peores

propiedades mecánicas. El acabado superficial es pobre debido al 'escalón' que se forma entre capa y capa.

Estas limitaciones son las que han obstaculizado la adopción de piezas impresas en 3D para aplicaciones más exigentes. Actualmente, muchos son los estudios que se dedican a investigar y a desarrollar nuevos procesos de impresión y nuevos materiales compuestos para explotar todo el potencial de esta técnica.

Como resultados de estos estudios se están obteniendo materiales con mejores respuestas frente a aplicaciones más exigentes.

Una herramienta muy útil para medir en qué medida se está avanzando en las propiedades mecánicas de piezas impresas con materiales o técnicas FFF más innovadoras es la correlación digital de imágenes, que se empleará en este estudio para analizar el comportamiento mecánico de partes impresas en 3D.

La correlación digital de imágenes, DIC, es una técnica óptica empleada para medir las coordenadas en dos o tres dimensiones del campo completo de evolución en la superficie de un elemento de prueba sometido a un test mecánico. Los campos de coordenadas medidos se pueden emplear para calcular desplazamientos, deformaciones, tasas de deformación, velocidad y curvas de interés. Dado que es una técnica no invasiva se puede emplear en una gran variedad de aplicaciones de investigación y de caracterización mecánica de sólidos.

Esta técnica es una herramienta muy versátil ya que nos permite estudiar todo tipo de materiales, que van desde metales hasta explosivos, pasando por muestras geológicas o biológicas. El ámbito de estudio es tan amplio con esta técnica que nos permite estudiar desde elementos con geometría sencilla sometido a esfuerzo puntual hasta realizar caracterizaciones mecánicas completas de ensamblajes de aviones.

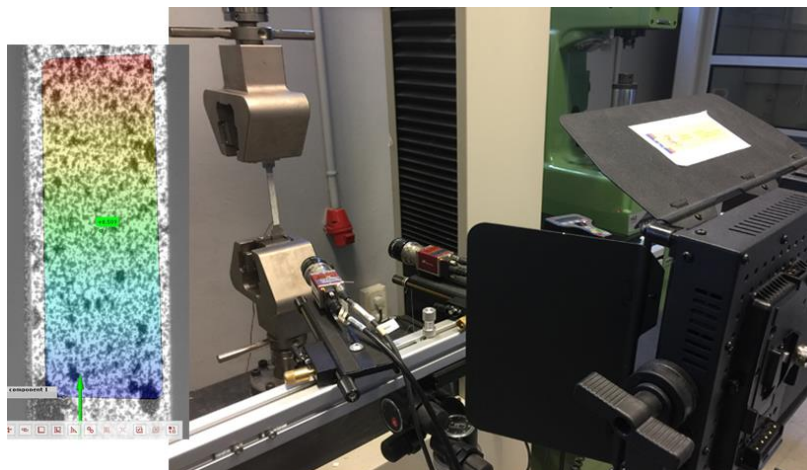


Ilustración 7: Montaje experimental para procesamiento DIC.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS:

2.1. MANUFACTURACIÓN ADITIVA:

La ASTM Internacional (2012) definió Fabricación Aditiva como: 'Proceso de unión de materiales capa a capa para hacer objetos modelados en tres dimensiones, en oposición a las metodologías de fabricación sustractivas, tales como el mecanizado convencional'.

Los procesos de fabricación por aporte de material se caracterizan por solidificar el material, originalmente en estado líquido, sólido o polvo, por sucesión de capas con procedimientos electrónicos.

Sin duda, los procesos de fabricación aditiva poseen grandes características que le otorga ventajas y competitividad en el mercado:

- Gran flexibilidad a la hora de diseñar geometrías complejas.
- Personalización del diseño.
- Reducción del 'time-to-market' de nuevos diseños.
- Permite realizar series cortas de producción.
- Reducción de errores de montaje y sus costes asociados.
- Reducción de costes de inversión en utillaje.
- Es posible combinar distintos procesos de fabricación.
- Organización en la utilización de material.
- Fabricación más sostenible: no se desperdicia material.

Aunque son grandes las ventajas que posee, es importante mencionar algunos inconvenientes a la hora de la elección del proceso de fabricación:

- La fabricación aditiva produce lo que se conoce como *escalonamiento* entre capa y capa, dificultando el trazado de geometrías curvas.
- Algunos procesos pueden llegar a ser muy lentos.
- Los materiales son aún más limitados para cada proceso, por lo que puede que el proceso adecuado no abarque el material que necesitamos.
- La acumulación de capas produce materiales anisótropos.
- Tolerancias muy grandes.

Muchas son las técnicas de manufacturación aditiva que se han desarrollado, las más relevantes son:

→ ESTEREOLITOGRAFÍA, SLA:

Es considerada como el origen de los procesos de impresión en 3D.

Esta técnica emplea el principio de fotopolimerización (endurecimiento) para obtener partes en tres dimensiones partiendo de resinas sensibles a los rayos ultravioletas. La resina solidifica mediante el paso de un láser capa por capa.

El rayo láser barre la superficie de la resina líquida de acuerdo con el modelo 3D digital. Una vez que la primera capa de material ha solidificado, la plataforma desciende un nivel, que corresponde al grosor de una capa de impresión, y una nueva sección se solidifica. Hay tantos ciclos de impresión como capas hay para obtener el volumen completo de la pieza.

En algunos modelos de máquinas SLA, la producción de la pieza se realiza al revés. La plataforma se sumerge en el recipiente de resina después de cada capa solidificada mientras que el láser actúa de abajo hacia arriba.

Una vez que se ha realizado la impresión, hay que limpiar las partes con disolvente para eliminar el exceso de resina no solidificada, por lo que podemos identificar aquí una de los principales inconvenientes de este proceso, ya que en otras técnicas de impresión en 3D no es necesario un post-procesamiento una vez finalizado el proceso.

La tecnología SLA se emplea, además de en prototipado rápido, en la producción de moldes de inyección con fines médicos y orfebres.

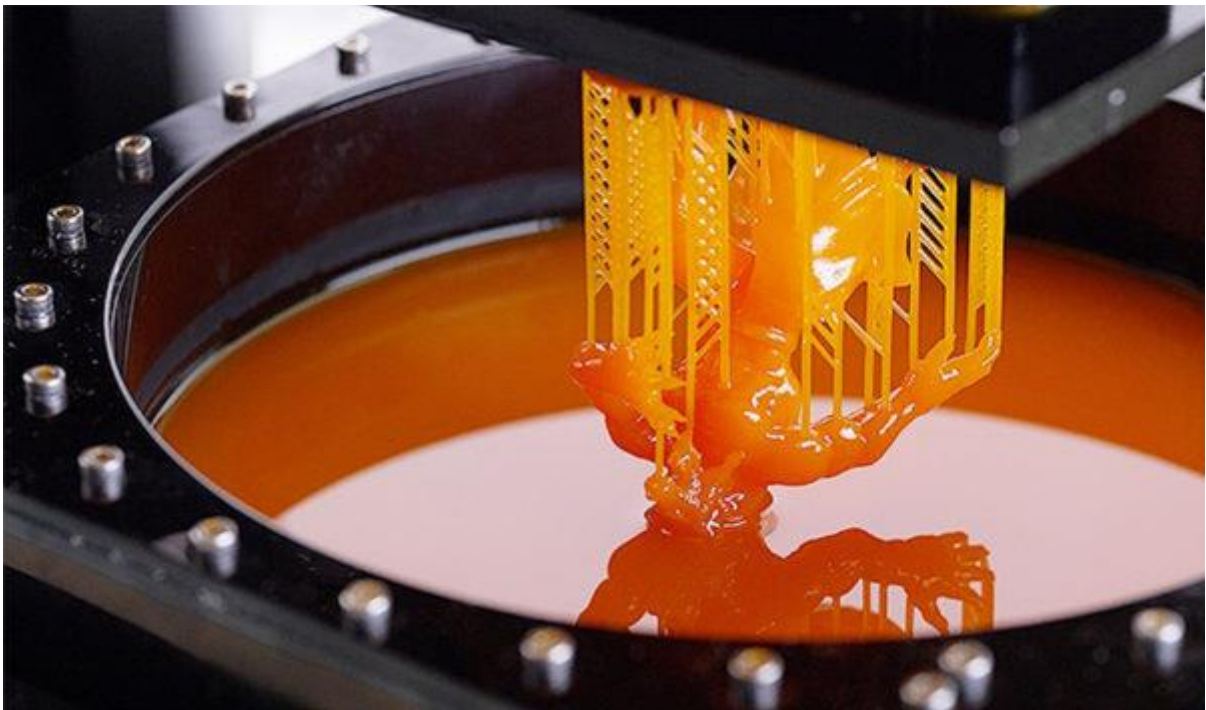


Ilustración 8: Pieza impresa mediante la técnica SLA.

→ SINTERIZACIÓN SELECTIVA POR LÁSER, SLS:

La sinterización selectiva por láser emplea un láser como fuente de energía para sinterizar material en polvo, apuntando el láser automáticamente a los puntos en el espacio definidos por un modelo 3D, uniendo el material para crear una estructura sólida.

La sinterización por láser es un proceso generativo de estratificación, la pieza se construye capa a capa. Por la acción de los rayos láser, se pueden generar geometrías complejas que no se podrían fabricar mediante procedimientos convencionales.

Normalmente se emplea un láser de CO₂ o un láser de fibra.

El material en polvo suele ser un plástico, arena moldeada recubierta de plástico, metal en polvo o polvo cerámico.

El polvo se aplica a una plataforma de construcción con la ayuda de una cuchilla o rodillo en toda su superficie con un espesor de hasta 200 micras. Las capas se sinterizan o funden sucesivamente en el lecho de polvo activando el rayo láser de acuerdo con el contorno de la capa del componente. A medida que se van creando las capas, la plataforma de construcción baja un nivel, de tal forma, la pieza se va creando de abajo hacia arriba. El procesamiento se realiza capa por capa en dirección vertical, por lo que es posible crear contornos recortados.

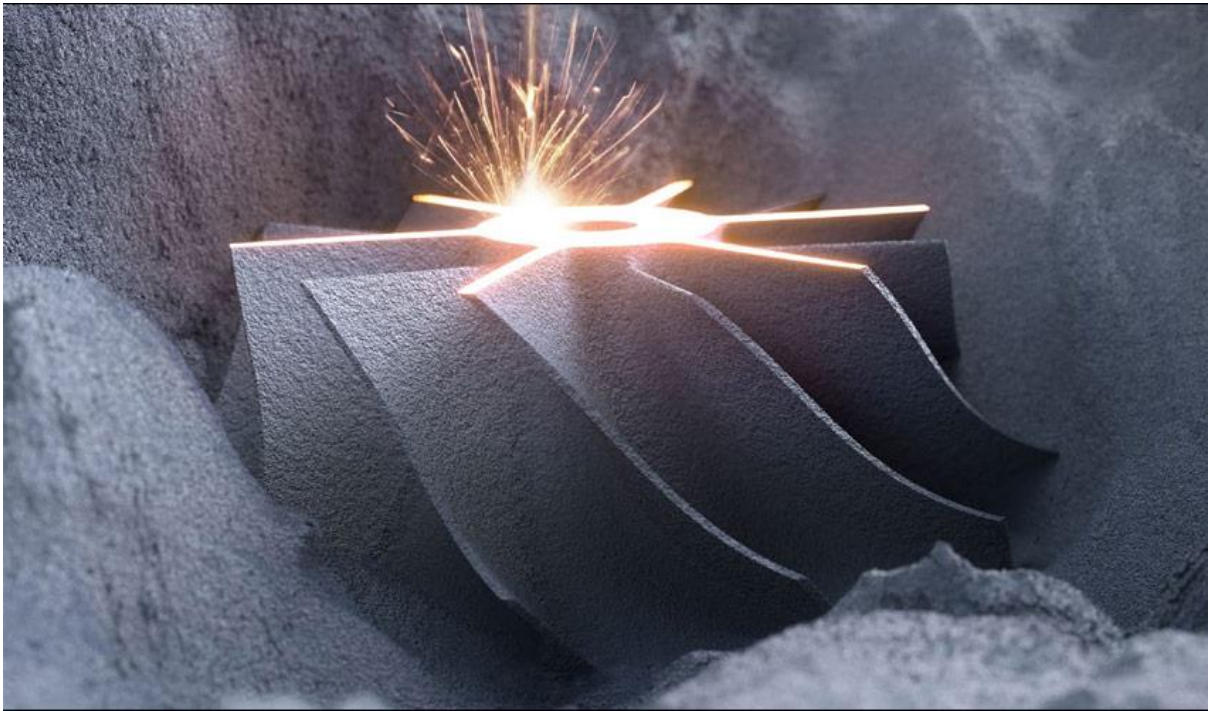


Ilustración 9: Proceso de impresión mediante SLS.

→ FABRICACIÓN POR FILAMENTO FUNDIDO, FFF o FDM:

Más conocida como impresión 3D es la tecnología más ampliamente utilizada para la manufacturación aditiva debido a su coste relativamente bajo, poco desperdicio de material y facilidad de uso.

El proceso FDM emplea normalmente un filamento continuo de polímero como material de alimentación en la impresora. El filamento continuo alimenta un

extrusor donde es calentado hasta una temperatura cercana a la de fusión, permitiéndole pasar a través del orificio extrusor que lo colocará sobre una superficie de impresión.

Una vez que la primera capa del patrón se ha impreso, la plataforma de impresión disminuye un nivel, o el extrusor se eleva un nivel, correspondiente al espesor de capa que se esté imprimiendo, para depositar la siguiente capa de material. Con la sucesiva colocación de capas conseguimos una estructura sólida en tres dimensiones.

Actualmente los termoplásticos son los más utilizados como material de alimentación en la técnica FDM debido a su bajo coste y por su baja temperatura de fusión.

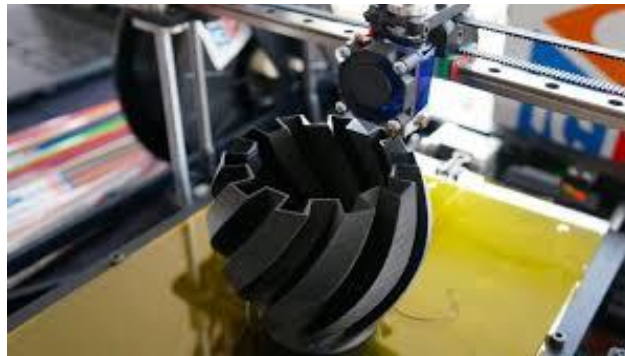


Ilustración 10: Proceso de impresión FFF.

2.2. MATERIALES:

2.2.1. *Fibras de refuerzo:*

El uso de fibras como materiales en ingeniería de alto rendimiento se basa en tres características importantes.

La primera de ellas, un diámetro de fibra pequeño en relación a su tamaño de grano u otra unidad microestructural. Esto permite una mayor fracción de la fuerza teórica que se puede alcanzar de lo que es posible de forma masiva. Esto es consecuencia directa de lo que se denomina el efecto del tamaño: cuanto más pequeño sea el grano, menor será la probabilidad de encontrar imperfecciones en el material. En la figura que se muestra a continuación se representa la disminución de la resistencia de la fibra de carbono frente al aumento del diámetro.

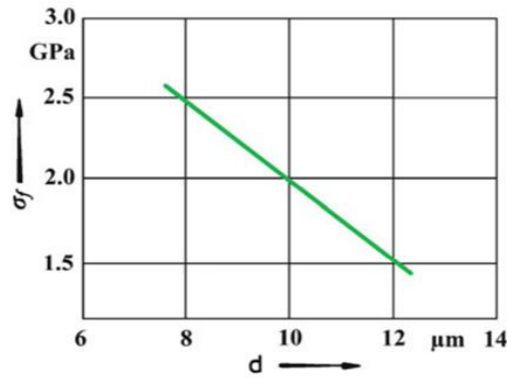


Ilustración 11: Representación del efecto tamaño en la fibra de carbono

En segundo lugar, un alto ratio longitud/diámetro permite que una fracción más grande de la carga aplicada se transfiera a través de la matriz a la fibra rígida y fuerte.

Y por último, un alto grado de flexibilidad, que es realmente una característica de materiales con bajo módulo o rigidez y diámetro pequeño. Esta flexibilidad permite el uso de gran variedad de técnicas para crear composites con estas fibras. Entendiendo por flexibilidad como función de su rigidez elástica y dimensiones de su sección transversal. Concibiendo la flexibilidad de una fibra como el radio que ésta se puede doblar antes de que rompa.

2.2.2. Fibra de vidrio:

Para esta fibra de refuerzo encontramos gran variedad de composiciones químicas disponibles todas en el mercado. La fibra de vidrio más común es la que tiene base de sílice (~50-60% SiO_2) y con gran contenido de otros óxidos de calcio, boro, sodio, aluminio o hierro. En la siguiente tabla se muestra una lista de las composiciones más comunes para la fibra de vidrio.

Table 2.1 Approximate chemical compositions of some glass fibers (wt.%)

Composition	E glass	C glass	S glass
SiO_2	55.2	65.0	65.0
Al_2O_3	8.0	4.0	25.0
CaO	18.7	14.0	–
MgO	4.6	3.0	10.0
Na_2O	0.3	8.5	0.3
K_2O	0.2	–	–
B_2O_3	7.3	5.0	–

Ilustración 12: Composiciones químicas más comunes para la fibra de vidrio.

Podemos hacer hasta 3 clasificaciones diferentes según el comportamiento que presente la fibra de vidrio frente a agentes externos:

- La letra E designa fibras con un módulo de Young razonable y con buen aislamiento eléctrico.

- Con la letra C encontramos la variedad de fibra de vidrio que resiste mejor frente a corrosión química.
- Con la letra S, las fibras de vidrio con un más alto contenido en sílice, lo que les confiere una mayor resistencia a altas temperaturas.

El proceso de fabricación es sencillo: la materia prima se funde en una tolva, una vez fundido se alimenta a bujes o crisoles de platino calentados eléctricamente. Cada crisol consta de alrededor 200 orificios en la base, por los que fluirá el vidrio fundido por gravedad, formando finalmente filamentos finos y continuos. El diámetro final de la fibra es función de los orificios de los crisoles; la viscosidad, será función de la composición y de la temperatura.

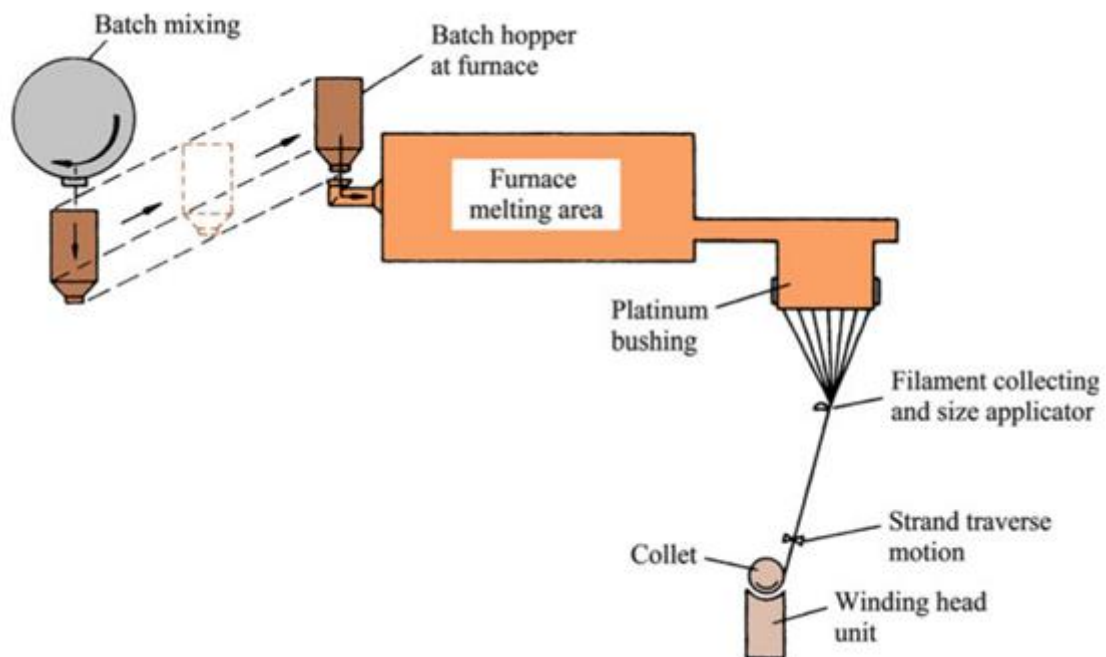


Ilustración 13: Proceso de fabricación de la fibra de vidrio.



Ilustración 14: Forma final de la fibra de vidrio.

Las propiedades mecánicas más típicas se muestran en la siguiente tabla:

Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Coefficient of thermal expansion (K ⁻¹)
2.55	1,750	70	4.7×10^{-6}

Ilustración 15: Propiedades físicas para fibras de vidrio tipo E.

Hay que tener en cuenta que la densidad tiene un valor relativamente pequeño, mientras que la resistencia presenta un valor más elevado; el módulo de Young sin embargo no es tan alto. De esta forma, la relación resistencia-peso de la fibra de vidrio es muy alta, mientras que la relación módulo-peso es sólo moderada. Es esta última característica la que ha llevado a la industria aeroespacial a desarrollar lo que se conoce como fibras avanzadas, combinando ésta con: boro, carbón, Al₂O₃, SiC.

No es sólo su gran variedad de formas disponibles, sino también su bajo coste, lo que hacen de esta fibra una de las más empleadas en el ámbito industrial.

En contraposición, hay que mencionar que la humedad disminuye la resistencia de las fibras. La resistencia de la fibra de vidrio es también susceptible a la llamada fatiga estática; esto es, cuando sometemos a una carga elevada por un tiempo prolongado las fibras de vidrio pueden sufrir grietas subcríticas, llevando a fallos prematuros incluso con cargas consideradas seguras.

2.2.3. Composites poliméricos reforzados con fibra de carbono

Se puede decir que tuvo sus inicios en la década de los cincuenta, aunque no fue hasta la década de los ochenta cuando el material se consolidó como material estructural.

Usada con antelación en la industria de defensa aeroespacial, que destacó su gran resistencia, y posteriormente empleada en la industria de artículos deportivos, fueron las fuerzas impulsoras de la gran eficacia de este material. La disponibilidad de una gran cantidad de fibras de carbono, acompañada de una constante bajada de precio a lo largo de los años, y una variedad igualmente amplia de matrices poliméricas hicieron para este composite muy fácil asumir el importante papel que desempeña en la industria hoy en día, desde aplicaciones en aeronaves civiles, automoción, infraestructuras...

El epoxi es la matriz polimérica más utilizada, aunque destacan también: poliéster, viniléster, poliamida y resinas termoplásticas.

Las fibras de carbono son los componentes encargados de soportar la mayor parte de la carga en estos composites, aunque su uso no se limita a componentes estructurales; es común encontrarlos como aislantes eléctricos, o recubiertos de algún metal, como níquel, para aislantes electromagnéticos, e incluso en sistemas térmicos gracias a su alta conductividad térmica.

Como un caso particular de los composites de fibras de carbono encontramos el llamado 'Onyx', desarrollado por la empresa 'Markforged' y con el que se ha realizado este estudio. Esta empresa americana es conocida mundialmente por ser innovadora tanto en materiales como en técnicas de impresión 3D. Especializada en el método FFF, a día de hoy Markforged representa un fuerte motor en la innovación de materiales y procesos de impresión siendo de los pocos fabricantes a nivel mundial capaces de combinar buenos acabados superficiales, rapidez en la impresión y excelentes propiedades mecánicas para su amplio catálogo de materiales, que van desde termoplásticos hasta metales.

El material Onyx, que combina nylon con fibras de carbono picadas, ofrece un termoplástico con alta resistencia, una excelente resistencia térmica, acabados superficiales y resistencia contra agentes químicos. Puede ser impreso él sólo o reforzado con fibra de vidrio o kevlar, alcanzando resistencias comparables con las del aluminio.

En la siguiente gráfica adjunta se representa la tensión por flexión frente a la deformación comparando al Onyx frente al ABS y al nylon crudo.

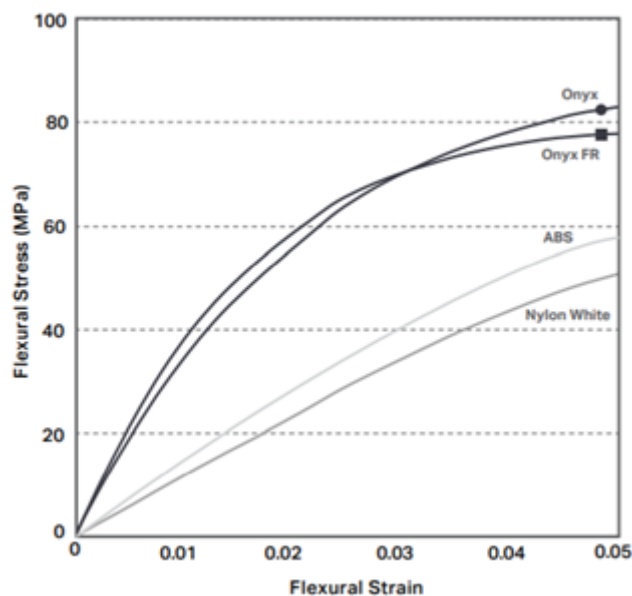


Ilustración 16: Gráfica tensión-deformación comparativa entre ABS y Onyx.

3. OBJETIVOS Y MOTIVACIONES:

Como objetivo principal de este estudio encontramos la caracterización mecánica del material impreso en 3D. No sólo se estudiarán las propiedades mecánicas, sino también la actuación de la impresora en la fabricación de las probetas.

Por otro lado, las motivaciones personales que promueven este estudio son: diseñar y llevar a cabo el diseño de programas experimentales para la caracterización mecánica, explotar la impresión 3D como forma innovadora y con gran proyección de fabricación, estudiar estos materiales presentes en nuestro día a día y que ofrecen gran versatilidad en la industria, y poner en práctica conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera.

4. ESTUDIOS PREVIOS:

Es interesante mencionar estudios similares a éste como lo es, por ejemplo, el estudio realizado por *School of Mechanical and Materials Engineering, University College Dublin*.

El estudio llamado: '*Fabricación de compuestos poliméricos con refuerzo de fibra continua de fibra de carbono, fibra de vidrio y kevlar*', busca estudiar la actuación de la impresora *Markforged Mark One* en la fabricación de composites de fibra continua y la caracterización mecánica de compuestos de nylon con fibra de carbono, fibra de vidrio y kevlar.

Según se indica en este estudio, los materiales de *Markforged* han sido estudiados individualmente y bajo determinadas condiciones y normas de ensayo. En este estudio buscaron analizar la actuación mecánica de estos materiales distribuidos por *Markforged* mediante ensayos a tracción y flexión.

Las probetas del ensayo a tracción cumplen con la norma ASTM D3039 con dimensiones de 170 x 12,7 x 3,2 mm (que serán las que emplee en mi estudio) y las probetas del ensayo a flexión cumplen con la norma ASTM D7079-10.

PATRÓN DE FIBRA:

Los patrones de fibra investigados fueron: concéntrico e isotrópico.



Ilustración 17: Patrón concéntrico a la izquierda, patrón isotrópico a la derecha.

El patrón concéntrico consiste en una espiral, los hilos de fibra empiezan en la parte más externa de la pieza y se envuelve hacia el interior respecto del centro, formando anillos anulares. Para este estudio se eligieron 6 anillos.

El patrón isotrópico consiste en líneas paralelas en zig-zag, con huecos entre ellas que se rellenan con las fibras de refuerzo antes de que la siguiente capa se imprima o con las líneas paralelas juntas formando una capa sólida.

NOTA: las etiquetas de concéntrico e isotrópico son nombres proporcionados por la empresa Markforged, estos nombres no hacen alusión al comportamiento mecánico de las probetas.

RESULTADOS:

Aunque se realizó también ensayos a flexión, me centraré exclusivamente en el ensayo a tracción que será similar al que se describirá en esta memoria.

Se documentaron problemas con discontinuidades en los puntos iniciales y finales de impresión de la fibra de refuerzo provocando el fallo prematuro en la probeta. Una solución propuesta por este estudio fue la de modificar los puntos iniciales y finales de impresión de la fibra, colocando estos puntos fuera de la probeta para que a lo largo de la longitud de toda la probeta la disposición de la fibra de refuerzo fuese uniforme.

El ensayo se realizó con 8 probetas, y los datos se obtuvieron de la media aritmética de 5 de ellas.

Como cabía esperar, los resultados del ensayo a tracción demostraron un aumento sustancial en la resistencia mecánica, lograda gracias al empleo de fibras de refuerzo en la matriz de nylon.

En consecuencia, se produjo fallo frágil en todos los experimentos realizados sobre estas probetas. Éstas rompían según la norma ASTM D3039, presentando algunas de ellas delaminación entre las capas. De igual forma, todas las formas de fallo se consideran válidas, por lo que se usará esta información en el cálculo de las propiedades mecánicas.

La probeta impresa siguiendo un patrón concéntrico con fibra de carbono aumentó en 3.5 veces la resistencia a tracción.

El patrón isotrópico plastificó a una tensión mayor que el patrón concéntrico, aunque esto sólo se pudo observar con los refuerzos de fibra de vidrio y kevlar, con un aumento del 6% y 9% en la resistencia a tracción respectivamente.

Comparando los tres tipos de fibra para el patrón concéntrico, la resistencia a tracción es: fibra de carbono > fibra de vidrio > kevlar.

El patrón isotrópico plastificó a un módulo elástico mayor que el concéntrico. Mostrando un aumento del 20% y 21% del módulo elástico para las fibras de vidrio y kevlar respectivamente. El análisis a tracción de las probetas fabricadas según FFF demostró resistencias de hasta 444 MPa con una fracción de volumen del 33%.

5. EQUIPAMIENTO:

5.1. IMPRESORA MARKFORGED ONYX SERIES:

Markforged, con base en Watertown, Massachusetts, es conocida por ser una de las empresas dedicadas a la impresión 3D más innovadoras. Su catálogo abarca desde piezas impresas con ABS hasta impresiones realizadas en metal, obteniendo piezas funcionales capaces de trabajar incluso como herramientas de mecanizado.

La impresora de la que consta el laboratorio es una *Markforged Onyx One - Desktop Series*. En primer lugar cabe destacar las características técnicas más importantes de la impresora.

- Volumen de impresión: 320 x 132 x 154 mm
- Peso: 15 kg.
- Huella de la máquina: 584 x 330 x 355 mm
- Sistema de extrusión: extrusor de segunda generación, 'out-of-plastic-detection'.
- Altura de capa: 100 μm por defecto, 200 μm como máximo.
- Patrón de relleno: múltiples geometrías disponibles.

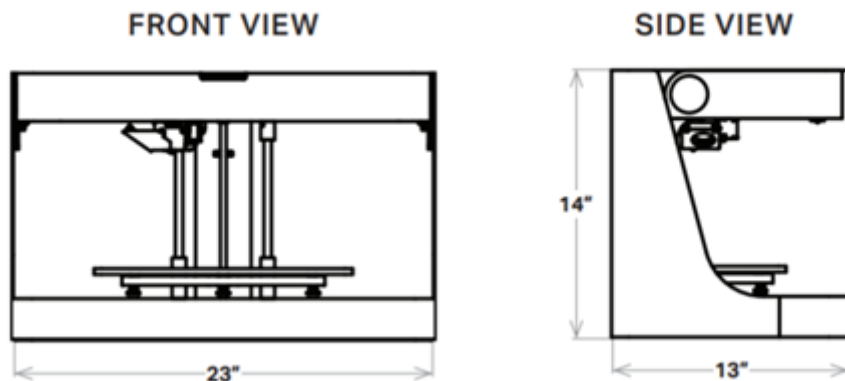


Ilustración 18: Dimensiones de la impresora.

Una impresora 3D construye cada pieza apilando capas de material fundido. La impresora parte de un archivo *.stl creado por el usuario (lo que no es más que el diseño CAD de la pieza), lo divide en capas y finalmente calcula y crea una ruta que seguirá el cabezal de impresión para cada capa. Al inicio, la bandeja de impresión se sitúa a una cierta altura y es el sistema de movimiento de la impresora el que acciona el cabezal para que siga esta ruta a la vez que el sistema de extrusión deposita el material sobre la bandeja.



Ilustración 19: Proceso de deposición de material fundido.

Debido a que la impresora no puede extrudir material al aire sin que se produzca colapso, todas las capas que se vayan a imprimir tienen que estar conectadas con las anteriores. Mientras que esto es verdad para casi todos los casos, existen piezas con geometrías más complejas que poseen salientes que requieren soportes. Estos soportes son generados automáticamente por el software de impresión y se pueden presentar en diferentes formas: soportes fácilmente eliminables que han sido impresos con el mismo material que la pieza, o soportes solubles que se disuelven en un baño al finalizar la impresión. Es importante señalar que las impresoras que trabajan con un material soluble para la formación de soportes necesitan tener una segunda boquilla extrusora específicamente para este material, lo que puede ser contraproducente si estamos utilizando una impresora con una sola boquilla o ya se está empleando algún material de refuerzo.

El que las piezas impresas estén construidas capa a capa conlleva que éstas presenten propiedades isotrópicas transversales. Mientras que los materiales isotrópicos tienen un comportamiento uniforme en todas direcciones, estas piezas presentan las mismas propiedades a lo largo del plano de impresión y diferente comportamiento en el plano perpendicular a éste. Es por esto por lo que es crucial determinar la orientación no sólo de la pieza que se vaya a imprimir sino también de la orientación de las fibras de refuerzo y la localización de éstas.

Otro parámetro importante a la hora de diseñar cualquier pieza es el relleno y el patrón que seguirá éste. Mientras que la 'carcasa' de la pieza es la que define la forma y la que muestra al público el acabado y la precisión en los detalles, el relleno determinará la actuación mecánica de la pieza. El relleno se diseña para obtener un buen acabado superficial al final de la impresión y siempre se hace siguiendo una forma de teselado distribuida sobre el área de una capa. El software de impresión nos da varias opciones de patrón para el relleno, abarcando desde el patrón triangular hasta el relleno sólido, pasando por relleno rectangular o hexagonal. Asimismo, no sólo podremos elegir el patrón del relleno, sino también la densidad, lo que afectará directamente a la masa y a la resistencia en menor medida. Si queremos imprimir nuestra pieza con un cierto patrón de relleno, éste se verá afectado por la orientación de la pieza. La

orientación no sólo modifica el comportamiento del material entre capas sino también modifica el relleno y la orientación de éste.

Independientemente del tamaño de nuestra impresora, materiales que emplee o función, todas constan de tres sistemas electromecánicos, que influyen la calidad de la impresión. Éstos son:

- Cabezal de impresión y sistema de extrusión: es el sistema responsable de calentar el termoplástico hasta una temperatura cercana a la de fusión y extrudirlo a través de una boquilla que depositará el material sobre la bandeja de impresión o sobre una capa previa de material.
- Bandeja de impresión y eje z de movimiento: a medida que se va imprimiendo nuestra pieza el eje z disminuye el nivel equivalente a una altura de capa, para que la siguiente capa que se imprima se adhiera a la anterior. La potencia y precisión del eje z de nuestra impresora va a condicionar directamente la calidad de nuestra pieza final ya que es el eje z sobre el que se construye la pieza.
- Guías xy: controlan el movimiento del cabezal de impresión en estos ejes. Son las responsables de ‘dibujar’ el contorno de la pieza sobre la bandeja que creará cada capa. Al igual que el motor que rige el movimiento del eje z, la calidad y precisión de los motores que controlan el movimiento en los ejes x e y tienen un gran impacto en la calidad final de la pieza y en las tolerancias que ésta tenga.

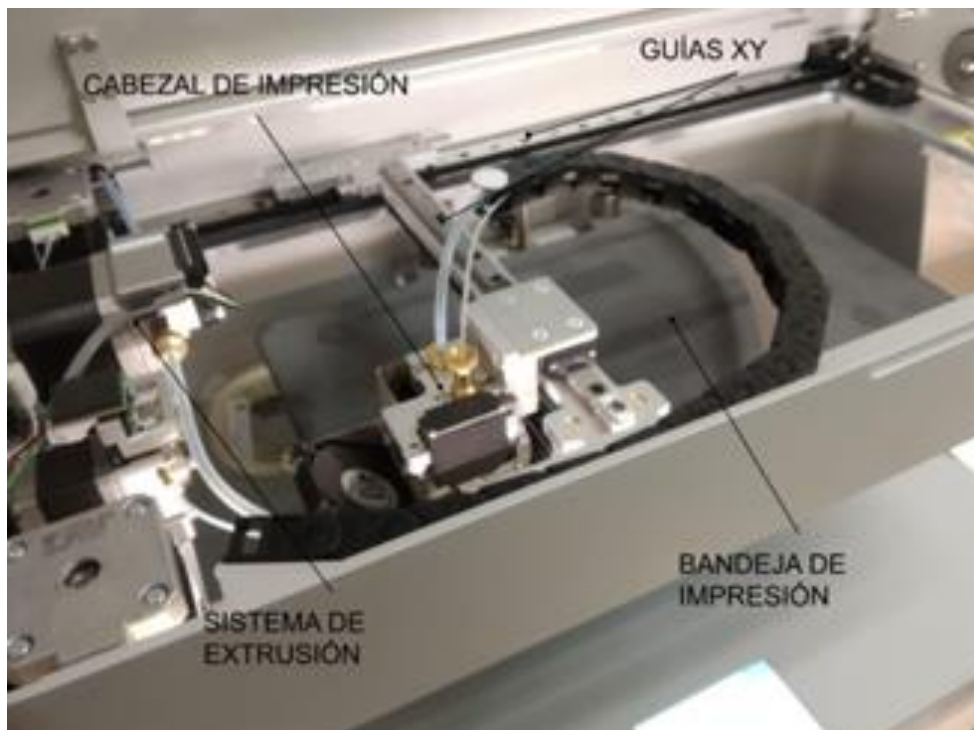


Ilustración 20: Principales sistemas electromecánicos de una impresora.

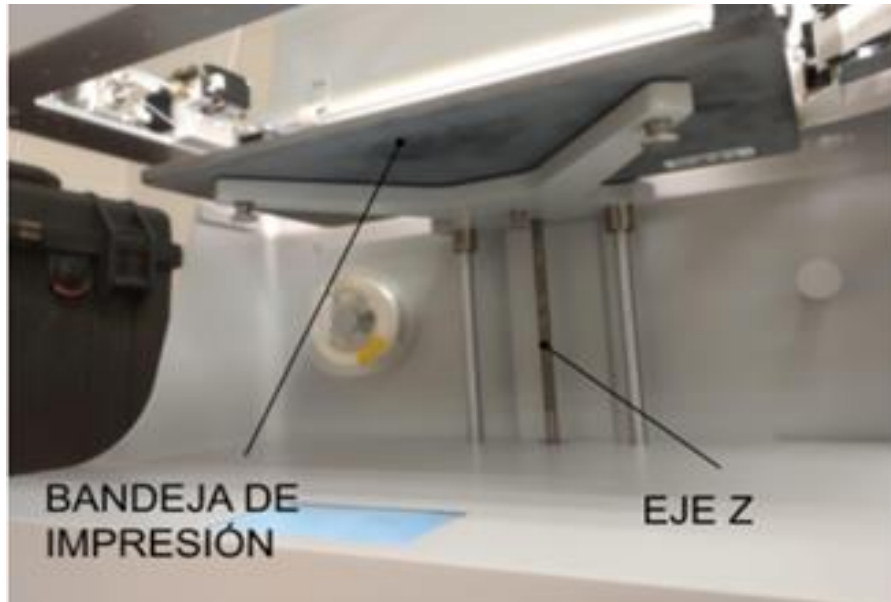


Ilustración 21: Principales elementos del sistema de deposición de una impresora.

A continuación describo los componentes más importantes que conforman la impresora Markforged Onyx Series.

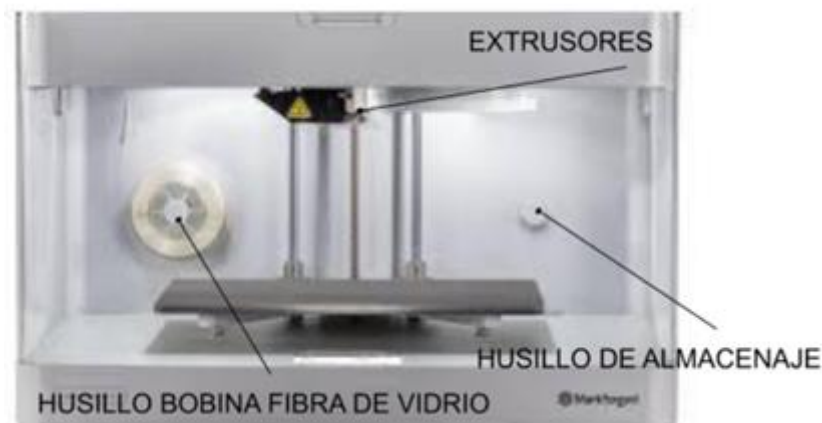


Ilustración 22: Vista frontal de la impresora.

En la imagen 22 se ve la impresora de frente; en la parte trasera, a nuestra izquierda encontramos el husillo donde se acopla la bobina de fibra de refuerzo. Justo en la parte superior de este husillo encontramos el tubo de alimentación que conecta la bobina de refuerzo con el sistema de extrusión.

La bobina de plástico (onyx), a diferencia de la mayoría de las impresoras 3D, no se encuentra acoplada en la impresora, si no que el tubo de alimentación de plástico va desde el extrusor de plástico hasta el exterior de la impresora, donde el usuario tendrá que conectar este tubo con la caja hermética en la que viene instalada la bobina de plástico, protegida de la humedad y de todos los agentes que puedan dañar la bobina.

En las siguientes imágenes podremos ver el embalaje de la bobina antes de ser usada y la caja hermética.



Ilustración 23: Embalaje bobina de Onyx.



Ilustración 24: Caja hermética para bobina de Onyx.

En la parte superior de la impresora encontramos los extrusores, mostrados con mayor detalle en la imagen a continuación:



Ilustración 25: Vista superior del extrusor.

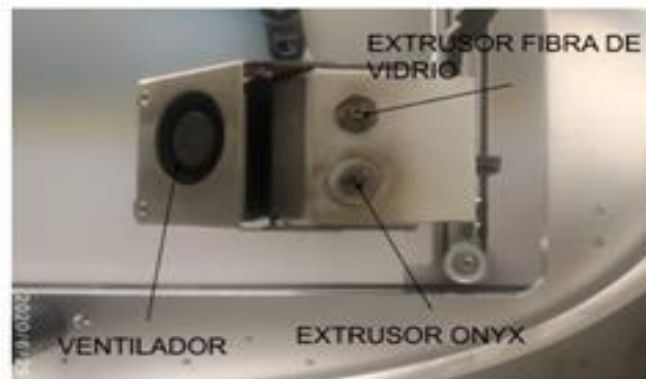


Ilustración 26: Vista inferior del extrusor.

A continuación, encontramos la pantalla táctil que gobierna la impresora en la parte frontal. En la pantalla inicial se muestra si tenemos cargadas las bobinas de plástico y/o de fibra de refuerzo o ninguna, nos indica también la temperatura de ambos extrusores, si se encuentran calentándose o enfriándose, si hay algún trabajo en ejecución o si está lista para imprimir. En la esquina superior derecha de la pantalla encontramos el menú desde el cual podremos realizar todas las funciones de carga y descarga de material, funciones de calibración y de mantenimiento. Las funciones más importantes están desarrolladas en los ANEXOS I, II y III.



Ilustración 27: Pantalla de inicio.



Ilustración 28: Menú de la impresora.

Por último, es importante mencionar el software con el que trabaja la impresora y las funciones que éste nos da. *Eiger* trabaja en la nube, lo que nos permite diseñar cada impresión, modificar cualquier pieza o incluso lanzar algún trabajo sin tener que estar delante de la impresora. Desde esta aplicación podremos importar los archivos *.stl, agrupar los archivos en carpetas, ver los trabajos ya realizados o que se estén realizando.

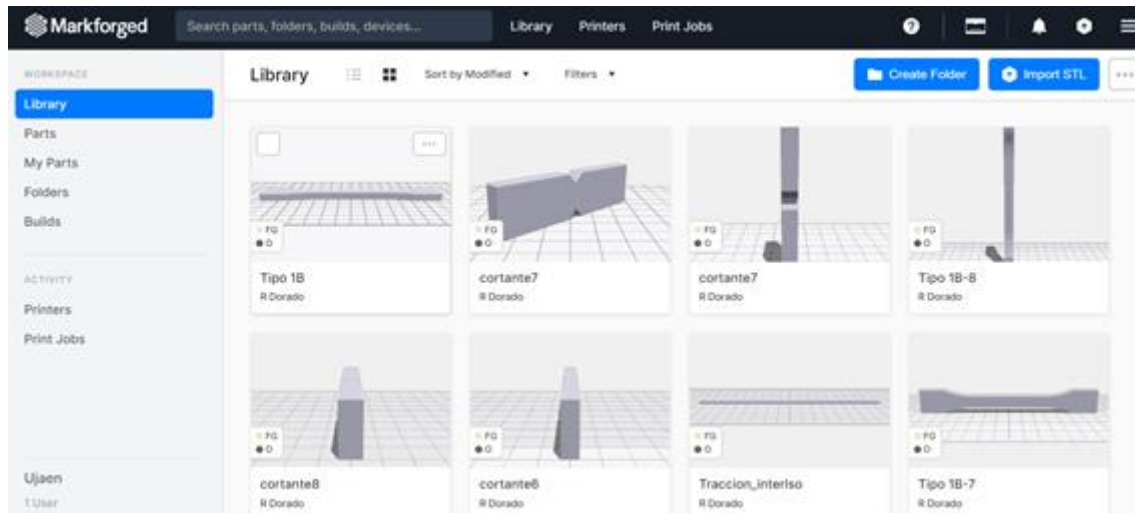


Ilustración 29: Pantalla de inicio del software Eiger.

En el software podemos encontrar varios módulos de ayuda y soporte ante cualquier problema o duda.

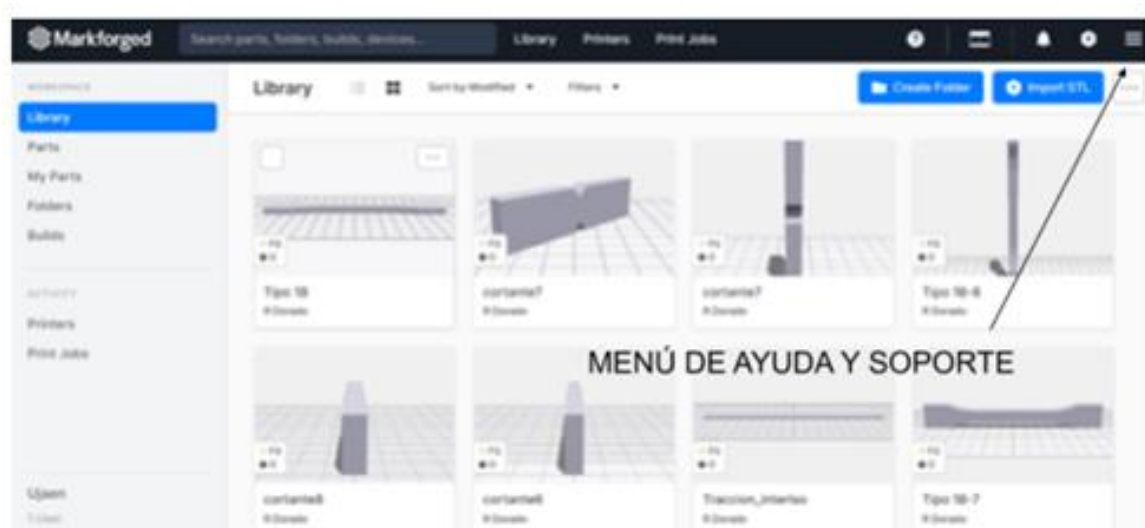


Ilustración 30: Menú de ayuda. Software Eiger.

Antes de comenzar una impresión es interesante fijarnos en los parámetros de impresión más comunes.

Una vez que entramos en el software y seleccionamos la pieza que vayamos a imprimir se abre una ventana con todos los parámetros de impresión y detalles de interés.



Ilustración 31: Pantalla previa a la impresión. Software Eiger.

En el margen izquierdo, donde aparecen los detalles sobre la pieza, se muestra información sobre tiempo de impresión, peso final, precio... Debajo de los detalles de impresión aparece un apartado llamado *Warnings*, en el caso de que el software detecte algún problema aparecerá un aviso en esta sección.

Lo más interesante del software se encuentra a la derecha de la pantalla, en el menú *Part Settings*. Los parámetros más importantes que debemos tener en cuenta para imprimir, ya sea en esta impresora o en otra son:

- Altura de capa: determina el espesor de cada capa cuando se convierte la pieza en una serie de capas imprimibles. Viene dada por el diámetro de la boquilla y no es recomendable que la altura de capa sea superior al 80% del diámetro de la boquilla. En este estudio se usará el valor por defecto de 100 μm .
- Soportes: si imprimimos piezas con voladizos o zonas de difícil deposición de material tendremos que usar los soportes. Este software nos permite seleccionar si queremos o no usar soportes. Éstos se generan automáticamente. En este estudio al ser las probetas planas esta opción está desactivada.
- Patrón de relleno:

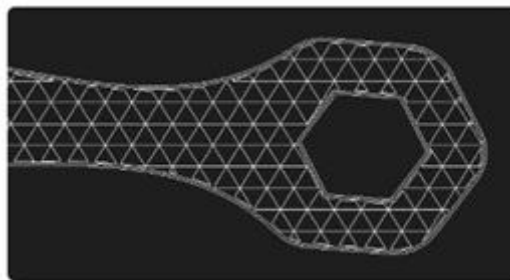


Ilustración 32: Patrón de relleno triangular. Software Eiger.

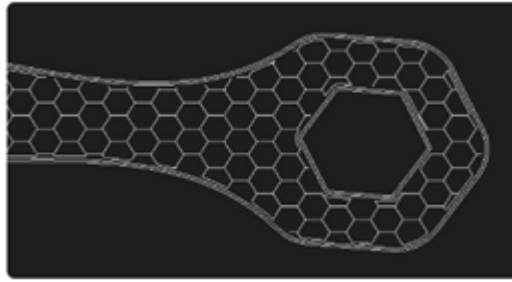


Ilustración 33: Patrón de relleno hexagonal. Software Eiger.

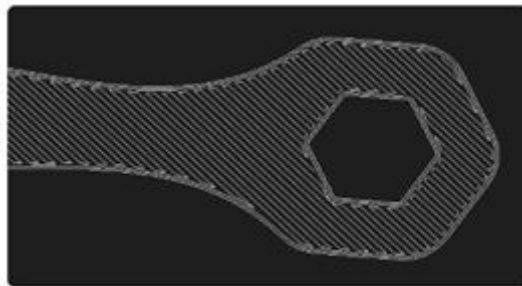


Ilustración 34: Patrón de relleno rectangular. Software Eiger.

- Densidad de relleno: marca la verdadera densidad de la pieza. 37% es el valor por defecto del fabricante, variar este parámetro influirá directamente en el tiempo de impresión y en la masa final de la pieza. Para la impresión de las probetas de este ensayo dejaré este parámetro según la recomendación del fabricante.

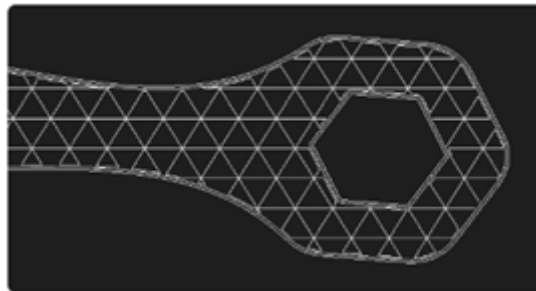


Ilustración 35: Mínima densidad de relleno. Software Eiger.

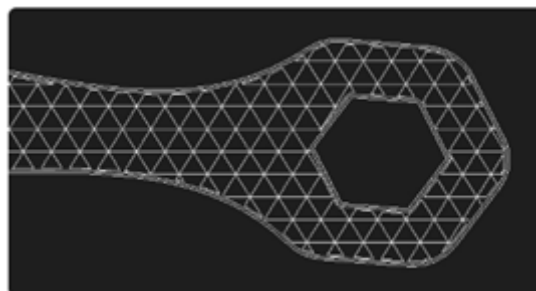


Ilustración 36: Valor por defecto de la densidad de relleno. Software Eiger.

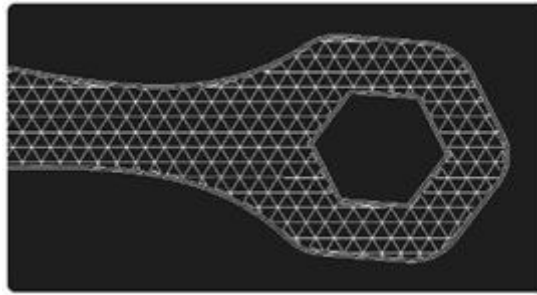


Ilustración 37: Máxima densidad de relleno. Software Eiger.

- Capas superiores e inferiores: hace referencia al número de capas sólidas, no llevarán patrón, de plástico que se colocarán en las respectivas caras.

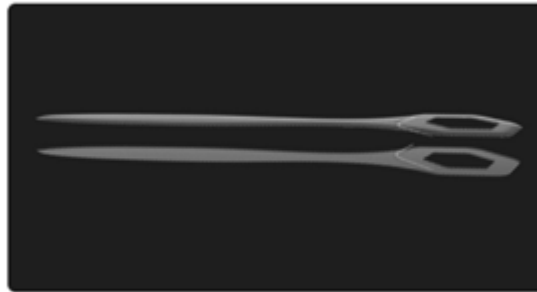


Ilustración 38: 10 capas, 5 capas en la cara superior y 5 capas en la cara inferior. Software Eiger.

- Capas de pared: define cuál va a ser el espesor de las paredes laterales de la pieza. Mayor número de paredes, más fuerte será nuestra pieza, aunque habrá menos espacio libre en el que se pueda insertar la fibra de refuerzo ya que se reduce la sección.

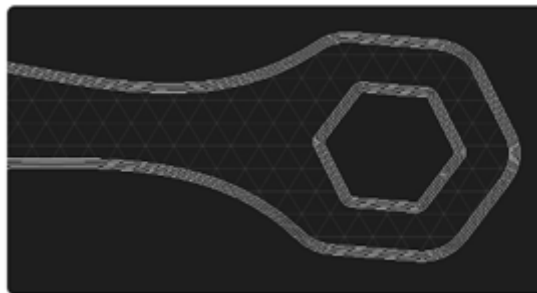


Ilustración 39: 4 capas de pared. Software Eiger.

- Refuerzo: en el caso de que sólo fuésemos a imprimir con un material tendríamos que desactivar esta opción.
- Capas totales de fibra: indica el número total de capas que se insertarán en el interior de la pieza.

NOTA: las capas se situarán de forma simétrica respecto a ambas superficies superior e inferior, por lo que si seleccionamos 6 capas de refuerzo, el software colocará 3 capas en la superficie superior y 3 capas en la superficie inferior.

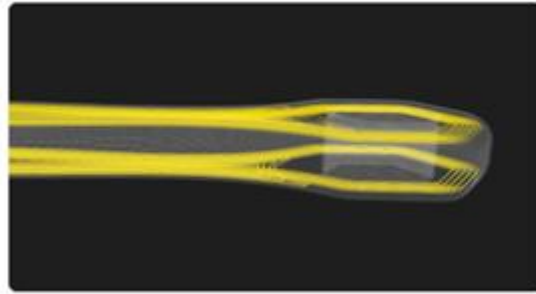


Ilustración 40: El contorno amarillo indica las capas de fibra. Software Eiger.

- Patrón de fibra: podremos elegir entre concéntrico e isotrópico. El patrón concéntrico consiste en anillos concéntricos por toda la superficie en la que se vaya a insertar la fibra, mientras que el patrón isotrópico realizará líneas paralelas en zig-zag.

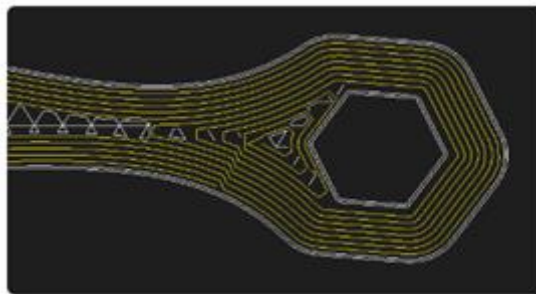


Ilustración 41: Patrón concéntrico. Software Eiger.

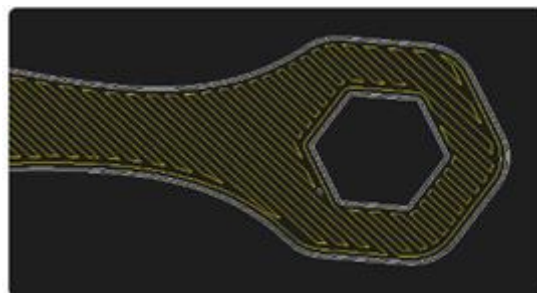


Ilustración 42: Patrón isotrópico. Software Eiger.

El patrón concéntrico hará más fuertes las paredes de la pieza mientras que el patrón isotrópico hará la pieza más rígida en la dirección de impresión.

Si se quiere hacer un diseño más exacto del patrón, distribución y orientación de la fibra, en el menú *Internal View* podremos modificar capa a capa.



Ilustración 43: Menú Internal View. Software Eiger.

En este menú es recomendable trabajar en vista 2D.

En la parte inferior de esta pantalla aparece una barra de progreso que indica las capas totales de la pieza y, pinchando en cualquier punto de la barra, nos situará en la capa correspondiente.

Bastará con localizar la capa en la que queramos hacer el diseño personalizado de fibra y modificar todos los parámetros para la impresión de ésta en las pestañas de la parte superior derecha.

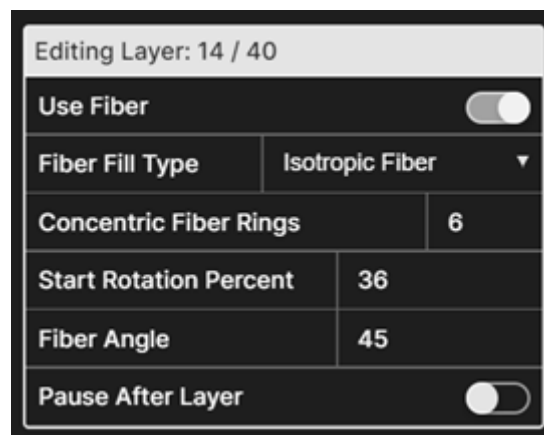


Ilustración 44: Menú para la personalización de la impresión de la fibra. Software Eiger.

Desde el menú *Internal View* podremos colocar la fibra de refuerzo en la capa que queramos e incluso combinar patrones de impresión diferentes en la misma pieza. Seremos capaces también de modificar el ángulo de orientación.

5.2. EQUIPO DE ENSAYOS:

En primer lugar, cabe mencionar que la empresa INSTRON se fundó en 1946, con sede en Canton, Boston (Massachusetts). Sus fundadores, trabajadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts, decidieron unir sus conocimientos sobre tecnología y electrónica al darse cuenta que no había equipos de prueba lo suficientemente exactos. El nombre INSTRON proviene de la combinación de las palabras 'instrumento' y 'electrónica' representando así el motor de esta empresa.

Actualmente INSTRON cuenta con varias empresas dedicadas a la investigación y desarrollo de materiales y técnicas de ensayo y fabricación, y con más de 500 años de experiencia.

Todos los ensayos se realizaron en el laboratorio de la Universidad de Jaén equipado y preparado para ello. En la imagen adjunta aparece todo el equipamiento utilizado para cada ensayo.



Ilustración 45: Máquina de ensayos.

- Máquina de ensayos: INSTRON 5567 – A: formada por una cruceta en la parte superior es la encargada de efectuar el movimiento. En ella se aloja el corazón de la máquina, elemento con más importancia ya que es la que mide la fuerza que se está aplicando. Acoplada en la parte inferior de la cruceta encontramos la rótula, que se puede montar y desmontar según el tipo de ensayo que se vaya a realizar, y en la cual, podremos insertar las mordazas para los ensayos de tracción y cortante a través de pasadores. En la parte inferior, justo debajo de la rótula encontramos el segundo pie para la otra parte de las mordazas.

Podremos controlar la máquina con el mando de control que se encuentra a la derecha del bastidor.

La máquina cuenta con varias medidas de seguridad; en el mando de control encontramos un botón rojo para poder cancelar el movimiento de la cruceta mientras el ensayo se encuentra en ejecución. En la parte frontal del bastidor encontramos un botón rojo de mayor tamaño sobre una superficie amarilla para detener de inmediato cualquier acción de la máquina, y por último, encontramos un botón amarillo y negro en el bastidor, del que podremos regular su altura mediante rosca. Cuando este botón entra en contacto con la cruceta todo el ensayo se detiene, evitando así que la cruceta tome posiciones peligrosas.

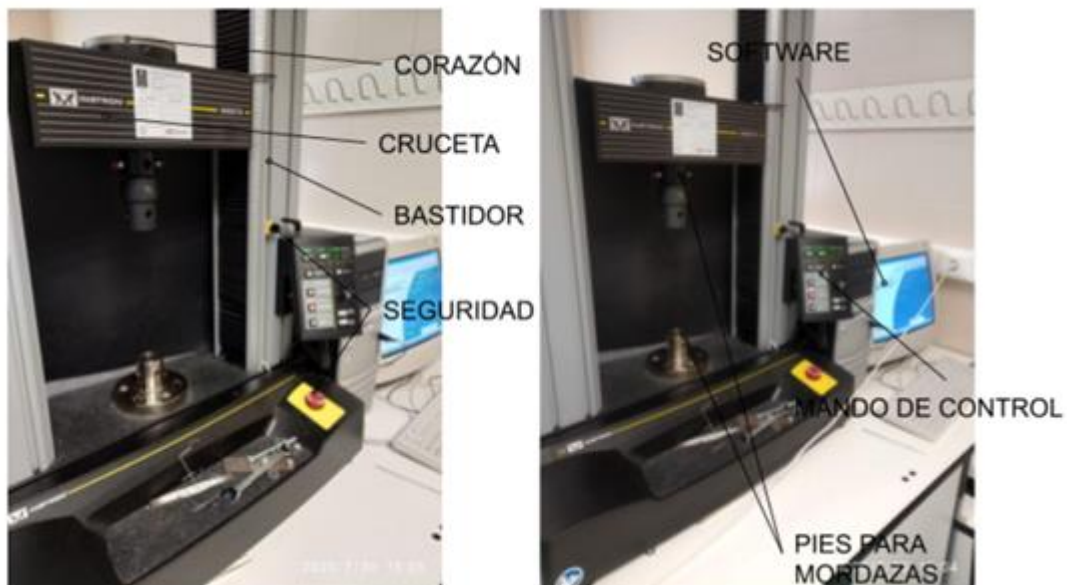


Ilustración 46: Principales elementos de la máquina de ensayos.

Dependiendo del ensayo que se vaya a realizar dispondremos de varias mordazas. Para este estudio en el que se van a realizar ensayos a tracción y cortante el laboratorio cuenta con mordazas que cumplen las especificaciones de sus respectivas normas.



Ilustración 47: Mordazas para ensayos de tracción.



Ilustración 48: Mordazas para ensayo de cortante.

- Software BLUEHILL: con este software controlaremos la máquina y además definiremos todos los parámetros de los ensayos: tipo de ensayo, velocidad, fuerza a aplicar... Además nos permite tomar mediciones de la carga y de la extensión de la cruceta en cada segundo y la opción de exportar un documento *.xlsx con los datos grabados.

- Cámara: cámara CCD de resolución 1392 x 1040 píxeles de la marca Basler.



Ilustración 49: Cámara del laboratorio con la que se grabaron todos los ensayos.

- Lámpara: para conseguir la iluminación y el contraste adecuado para obtener una buena resolución de imagen.

5.3. SOFTWARE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES: VIC 2D-6:

Software desarrollado por la empresa *Correlated Solutions INC*, fundada en 1998 para comercializar tecnología de correlación digital de imágenes, desarrollada originalmente en la Universidad de Carolina del Sur. Desde que se empezó a comercializar, los sistemas de correlación digital de imágenes han encontrado una gran aceptación en todo tipo de industria.

La correlación digital de imágenes, referida comúnmente como DIC, es un método óptico para medir deformaciones en la superficie de un objeto. Este método rastrea los cambios en el patrón de valores grises en pequeños vecindarios llamados 'subset' durante la deformación.

En definitiva, esta técnica experimental es muy precisa, permitiendo registrar incluso el avance de una grieta.

A continuación se muestra una imagen de cómo funciona el DIC.

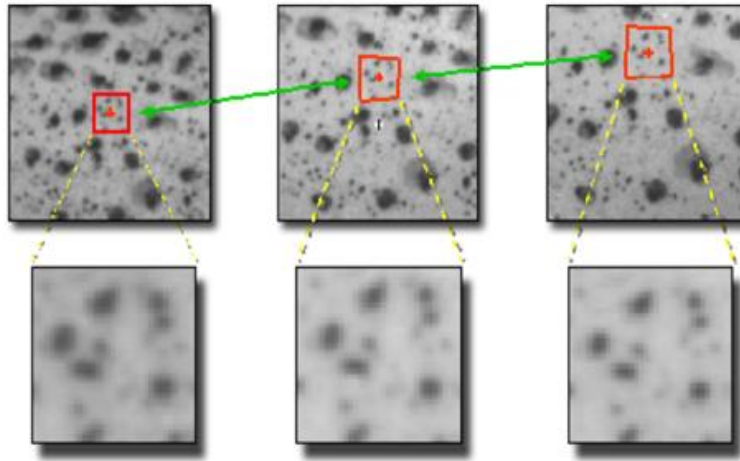


Ilustración 50: Esquema del funcionamiento de DIC.

La ilustración 50 muestra esquemáticamente el funcionamiento de la herramienta DIC. En primer lugar se tiene que realizar un moteado en escala de grises sobre la superficie que se va a analizar. El software analizará la superficie a analizar y la divide en pequeños 'vecindarios' llamados *subset*, marcados en rojo. El software comparará los vecindarios de la primera imagen de referencia con las siguientes imágenes.

De cada *subset* el software leerá el patrón de grises que conforman el vecindario y los comparará con el vecindario equivalente de imágenes posteriores.

Se irá creando el campo de desplazamientos en relación al grado de desplazamiento que presente cada punto que forma un vecindario, de forma que se obtendrán las deformaciones de la superficie total analizando cada *subset*.

El tamaño del subset es un parámetro muy importante en el análisis DIC pues influye directamente en la sección que se está analizando, a menor tamaño de *subset* mayor precisión presentarán nuestros resultados.

Es importante realizar un moteado lo más aleatorio posible y en superficies que no presenten patrones para que no haya ambigüedades en el análisis.

6. PROGRAMA EXPERIMENTAL I: ENSAYO A TRACCIÓN:

6.1. NORMA ASTM 3039/D3039M:

El ensayo a tracción en este estudio se llevó a cabo según indicaciones y recomendaciones de la norma ASTM D3039/D3039M, de la cual describo a continuación los puntos clave.

Se emplea la norma americana ya que no se encontraron normas ISO específicas para ensayos de piezas obtenidas mediante impresión 3D.

- ÁMBITO DE APLICACIÓN:

Este método de ensayo determina las propiedades de materiales de matriz polimérica reforzados con fibras de alto módulo sometidas a esfuerzo de tracción en un plano. La forma del material del compuesto se limita a fibras continuas o compuestos discontinuos con fibras de refuerzo en los que el laminado es equilibrado y simétrico respecto de la dirección de ensayo.

- RESUMEN DEL MÉTODO DE ENSAYO:

La probeta de ensayo debe ser una tira plana y delgada, con sección transversal rectangular y constante, que se colocará en una máquina de ensayos adecuada mediante unas mordazas y se le aplicará una carga de tracción de forma constante mientras se registran los valores de carga. Como resultados se podrán obtener: respuesta tensión-deformación, tensión última, módulo elástico y coeficiente de Poisson.

NOTA: en la norma recomiendan el uso de galgas extensométricas para el cálculo de la deformación, en este ensayo emplearé extensómetros virtuales mediante la herramienta de correlación digital de imágenes.

- GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS:

Se recomienda ensayar al menos cinco probetas por cada condición que se tenga para un mismo ensayo, a menos que se puedan garantizar resultados válidos y precisos con menor número de ensayos.

En este subapartado la norma cita literalmente que: 'el diseño de las probetas de ensayo mecánico, especialmente aquellas que usan pestañas en los extremos, sigue siendo en gran parte un arte más que una ciencia, sin consenso de la industria sobre cómo abordar la ingeniería de la interfaz de agarre'. Por lo que se adjuntan la Tabla 1 en la que se muestran los requerimientos geométricos a la hora de realizar el diseño de las probetas y la Tabla 2 en la que se muestran recomendaciones geométricas.

Parameter	Requirement
Coupon Requirements:	
shape	constant rectangular cross-section
minimum length	gripping + 2 times width + gage length
specimen width	as needed ^A
specimen width tolerance	± 1 % of width
specimen thickness	as needed
specimen thickness tolerance	± 4 % of thickness
specimen flatness	flat with light finger pressure
Tab Requirements (if used):	
tab material	as needed
fiber orientation (composite tabs)	as needed
tab thickness	as needed
tab thickness variation between tabs	± 1 % tab thickness
tab bevel angle	5 to 90°, inclusive
tab step at bevel to specimen	feathered without damaging specimen

^ASee 8.2.2 or Table 2 for recommendations.

Ilustración 51: Requerimientos geométricos de las probetas, según ASTM D3039..

TABLE 2 Tensile Specimen Geometry Recommendations ^A						
Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, ^A
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

Ilustración 52: Recomendaciones geométricas para probetas, según ASTM D3039..

- PROCEDIMIENTO:

Antes de iniciar el ensayo la norma recomienda tomar tres mediciones de la sección transversal de la probeta en tres puntos diferentes y operar con la sección media resultante.

- Velocidad de ensayo: la velocidad de ensayo debe ser tal que se provoque una tasa de deformación constante en la probeta. El ratio de deformación debe ser seleccionado de forma que se produzca el fallo de la probeta en un intervalo de tiempo de entre 1 y 10 minutos. La norma aconseja una velocidad de 2 mm/min.
- Modos de fallo: se pide reportar el modo y la localización del fallo en las probetas y elegir de entre el catálogo de fallos que se muestra a continuación para dar una descripción estandarizada de la forma de fallo usando el código que se indica.

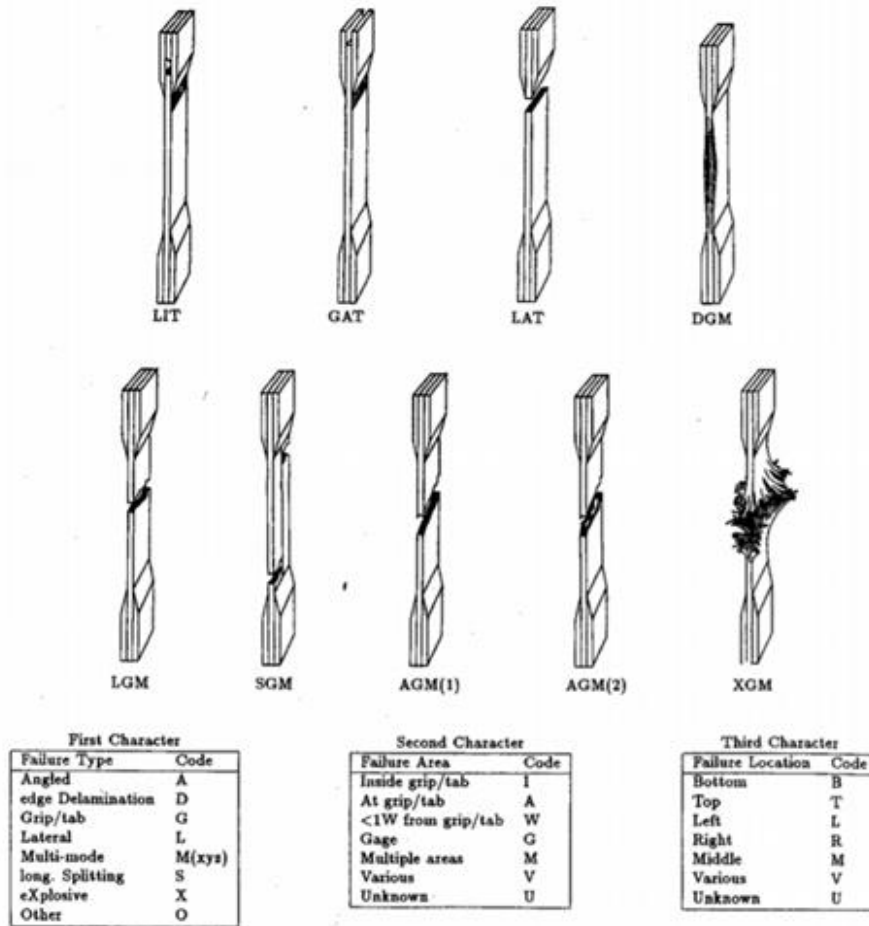


FIG. 4 Tensile Test Failure Codes/Typical Modes

Ilustración 53: Catálogo de los modos de fallo.

- CÁLCULOS:

La norma indica cómo realizar los cálculos para hallar tensión, deformación última, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

NOTA: solo muestro el cálculo relativo a la tensión y al coeficiente de Poisson. Las deformaciones las obtendré con la herramienta de correlación de imágenes, y aunque para el cálculo del coeficiente de Poisson son necesarias las deformaciones he empleado la ecuación de la norma.

→ Sección transversal:

$$A = w * h \quad ec(1)$$

Donde:

A: sección transversal, [mm²].

w: espesor de la probeta, [mm].

h: ancho de la probeta, [mm].

→ Tensión:

$$F^{tu} = P^{max}/A \quad ec(2)$$

$$\sigma_i = P_i/A \quad ec(3)$$

Donde:

F^{tu} : tensión última, [MPa].

P^{max} : máxima carga antes de la rotura, [N].

σ_i : tensión en el instante 'i' de la medición, [MPa].

P_i : carga en el instante 'i' de la medición, [N].

A : media de la sección transversal de la probeta, [mm²].

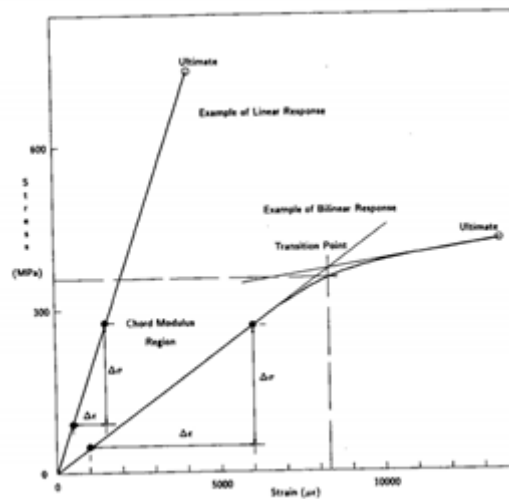


FIG. 5 Typical Tensile Stress-Strain Curves

Ilustración 54: Posibles respuestas tensión-deformación.

→ Coeficiente de Poisson:

$$\nu = -\varepsilon_T/\varepsilon_L \quad ec(4)$$

Donde:

ν : coeficiente de Poisson.

ε_T : deformación en la dirección transversal de aplicación de la carga, [μ ε].

ε_L : deformación en la dirección longitudinal de aplicación de la carga, [μ ε].

6.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PROBETAS:

Los patrones de impresión que se modificarán en este ensayo para estudiar su importancia en la resistencia de la pieza son: la posición de la capa de fibra de refuerzo y el patrón de impresión de la fibra de refuerzo.

En primer lugar se realiza un modelo CAD y se importa el archivo *.stl al software de la impresora. El software divide las probetas de tracción en 32 capas, con una altura de 0,1 mm cada una.

El diseño de las probetas se encuentra en los anexos Plano I.

Los patrones estudiados serán: concéntrico e isotrópico. Se emplearán cuatro capas de fibra de vidrio: dos capas situadas en la cara inferior y dos capas en la cara superior, dispuestas simétricamente a partir de la quinta capa de onyx, que conforma la matriz polimérica de la probeta.

Para cada patrón de fibra estableceré dos grupos: un primer grupo con ambas capas de fibra de vidrio dispuestas de forma contigua y otro grupo con las capas de fibra dispuestas de forma intercalada. Obteniendo en total cuatro grupos de probetas, con la siguiente nomenclatura:

- Patrón de fibra concéntrico, capas contiguas: TCON.
- Patrón de fibra isotrópico, capas contiguas: TI.
- Patrón de fibra concéntrico, capas intercaladas: TIC.
- Patrón de fibra isotrópico, capas intercaladas: TII.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros de impresión para cada grupo de probetas.

NOMBRE	NÚMERO	PATRÓN DE RELLENO	PATRÓN DE FIBRA DE VIDRIO
TCON	3	Triangular	6 anillos concéntricos
TI	3	Triangular	[0, 45]
TIC	5	Triangular	6 anillos concéntricos
TII	5	Triangular	[0, 45]

Tabla 1: Grupo de probetas para ensayo a tracción.

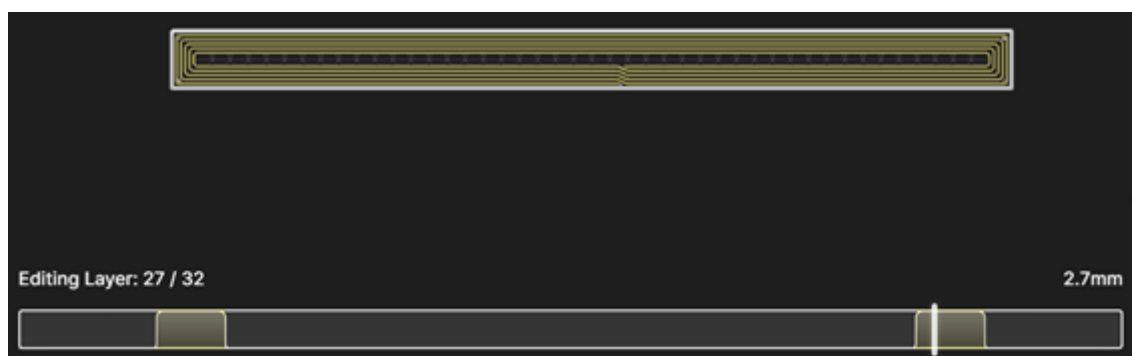


Ilustración 55: Patrón concéntrico, capas de fibra de vidrio conriguas, 6 anillos.



Ilustración 56: Patrón isotrópico, capas de fibra de vidrio contiguas, capa a 0°.

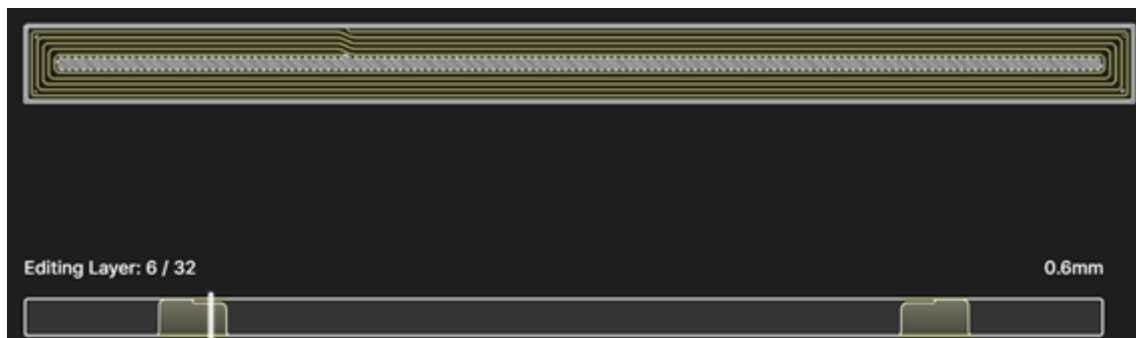


Ilustración 57: Patrón isotrópico, fibra contigua, capa con fibra a 45°.

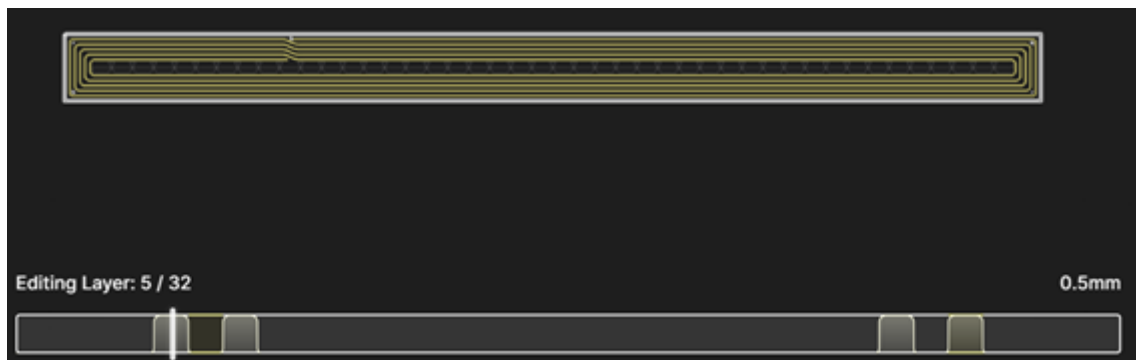


Ilustración 58: Patrón concéntrico, fibra alternada, 6 anillos.

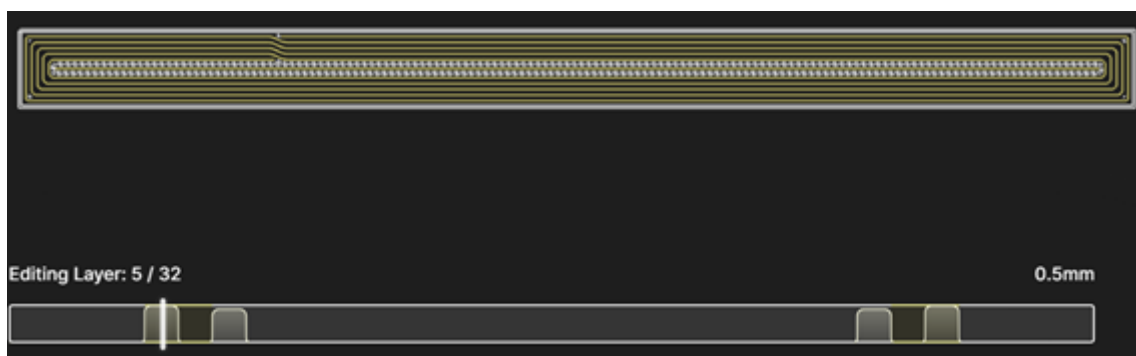


Ilustración 59: Patrón isotrópico, fibra alternada, capa a 0°.

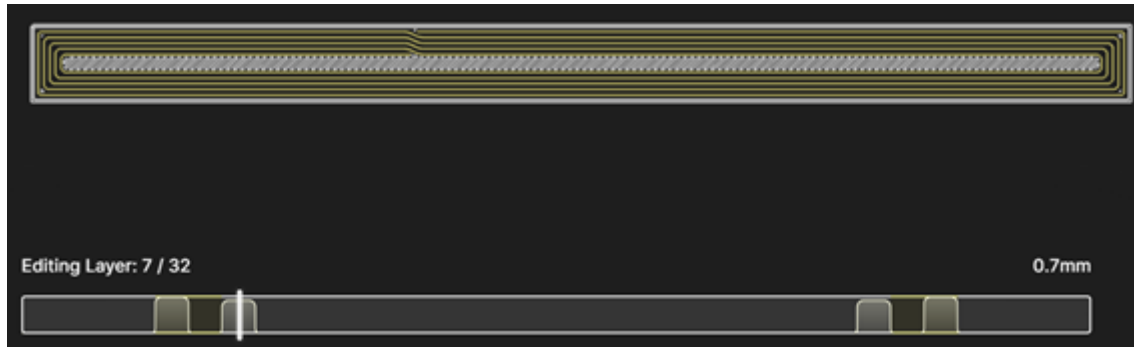


Ilustración 60: Patrón isotrópico, fibra alternada, capa con fibra a 45°.

6.3. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

En primer lugar se tomaron tres mediciones de la sección transversal empleando para ello la ecuación 1.

A continuación se realiza un moteado en la superficie de la probeta que se va a grabar. Aprovechando que el material onyx es negro, bastó con aplicarle una capa de pintura blanca en spray para conseguir el patrón moteado. Dejamos secar la pintura antes de realizar el ensayo.

Seguidamente, se montan las probetas en las mordazas adecuadas para el ensayo a tracción, mostradas en la imagen 47. Es importante apretar lo justo las mordazas para que las probetas rompan en la sección que queda entre ambas mordazas. Estas probetas no tienen la geometría tipo 'hueso', por lo que no sabemos de antemano dónde va a romper la probeta, esto hace aún más necesario tener un especial cuidado cuando se colocan las probetas para que la zona de fractura quede siempre visible.

Igual de importante es colocar la probeta totalmente recta para que el eje longitudinal de la probeta coincida con la dirección de aplicación de la carga.

Una vez se tenga la probeta situada correctamente en la máquina de ensayos debemos colocar la cámara. La cámara debe de estar a una distancia que permita ver la probeta completamente antes y después del ensayo, esto es, una vez finalizado el ensayo la mordaza superior va a estar más elevada, esta posición debe verse también en la imagen final.

Fue necesario el uso de la lámpara para conseguir una iluminación óptima en la probeta, aunque en todos los ensayos fue obligatorio modificar algunos ajustes de la cámara, como fueron: ganancia, contraste, saturación y, por supuesto, enfoque, para conseguir una imagen nítida.



Ilustración 61: Montaje completo del ensayo a tracción.

Una imagen válida se muestra debajo.

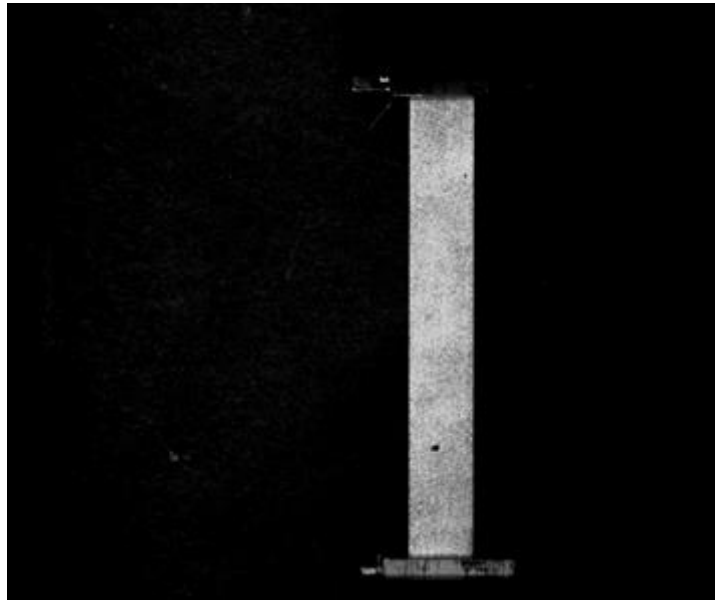


Ilustración 62: Probeta instalada en las mordazas en posición de reposo.

En primer lugar se eligió una velocidad de 0,5 mm/min y posteriormente se modificó a 1 mm/min para el resto de ensayos pues el tiempo que tardaba en romper la primera probeta fue elevado. Con la velocidad de 1 mm/min los ensayos no duraron más de ocho minutos, tal y como recomienda la norma.

Una vez definido el ensayo, la probeta preparada y la cámara correctamente calibrada empezaré a grabar con la cámara unos segundos antes de iniciar el ensayo con la máquina. Lo hago así para tener una imagen de referencia que corresponda con la probeta en la posición de reposo. Esta primera imagen será útil en el software VIC-2D 6 para calibrar y tomarla como referencia.

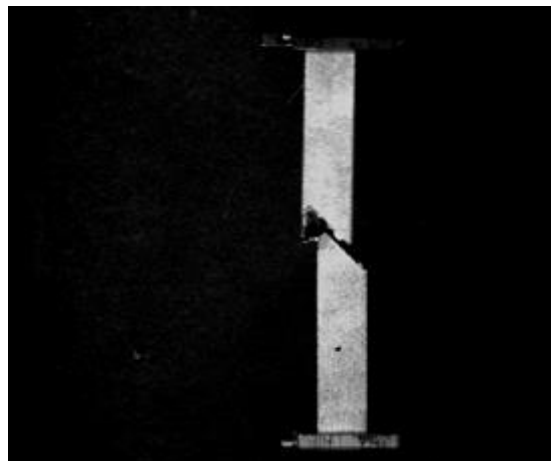


Ilustración 63: Probeta en el instante de rotura.

A continuación realizo el análisis DIC, el procesamiento de las imágenes correspondiente a los ensayos de tracción es exactamente el mismo. En

algunas ocasiones se modificó el tamaño del *subset*, pues el tamaño de las fotos pudo variar de un ensayo a otro.

Finalmente se muestra una imagen final en la que se muestra el extensómetro tal cual indica la norma.

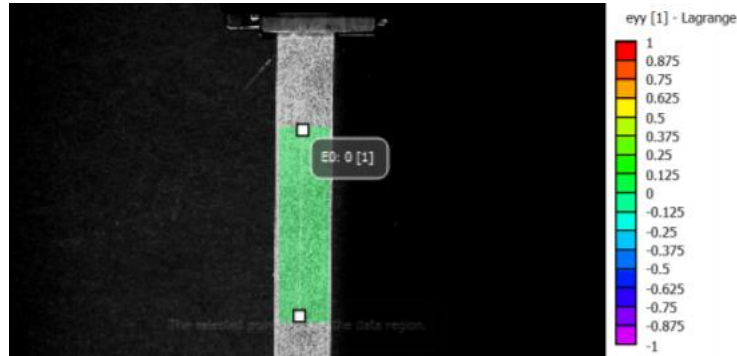


Ilustración 64: Extensómetro virtual en DIC.

De las gráficas que más nos interesa sacar es la deformación longitudinal, que la podemos extraer directamente del extensómetro.

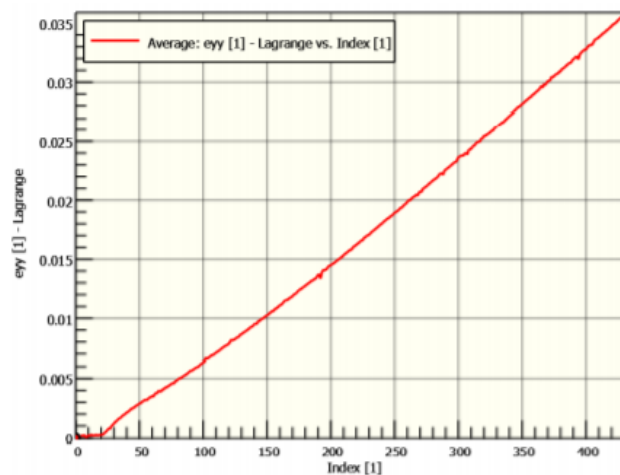


Ilustración 65: Deformación frente al tiempo en DIC

6.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS:

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos para los ensayos a tracción. Para facilitar el análisis dividiré este apartado en dos subapartados: el primero para los resultados de las probetas impresas con el patrón concéntrico y el segundo apartado para las probetas con patrón isotrópico.

→ PATRÓN CONCÉNTRICO:

En esta serie de datos incluyo las probetas con patrón de fibra de refuerzo concéntrico, con las capas impresas contiguas y con las capas alternadas, correspondientes a los grupos TCON y TIC.

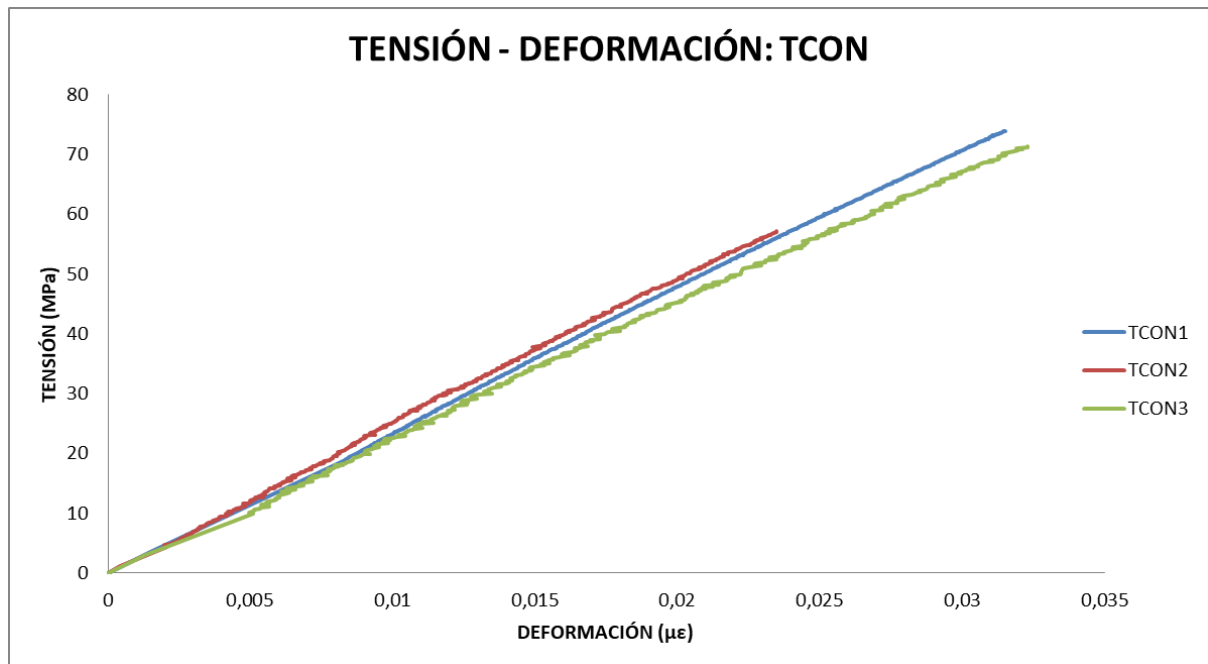


Ilustración 66: Gráfica tensión-deformación del grupo TCON.

	MÓDULO DE YOUNG E (MPa)	TENSIÓN MÁXIMA σ_{MAX} (MPa)	DEFORMACIÓN DE ROTURA ϵ (%)
TCON-1	2422,20	73,80	3,04
TCON-2	2485,00	57,02	2,34
TCON-3	2277,80	71,28	3,20
MEDIA	2395,00	67,37	2,86
DESVIACIÓN TÍPICA	106,24	9,05	0,46

Tabla 2: Tabla de resultados para el grupo TCON.

En la gráfica de la respuesta tensión-deformación vemos que no hay una zona elástica y una zona plástica como en la mayoría de los plásticos, sino que el material se comporta de forma elástica y, cuando se alcanza la tensión máxima rompe.

Podemos destacar el grado de deformación que sufre el material alcanzando casi el 3% íntegramente en régimen elástico, lo que denota un comportamiento bastante frágil

Hay que mencionar que estas probetas rompieron muy cerca de la mordaza por estar demasiado apretadas, esto explica la baja tensión de rotura obtenida para la segunda muestra. Es importante resaltar también que en los extremos de las probetas de tracción se observaron varios errores de impresión, ya que al tener una longitud mucho mayor que el espesor, los extremos solían

desprenderse de la cama (probetas esbeltas) por lo que los defectos de impresión pueden afectar a la baja tensión de rotura.

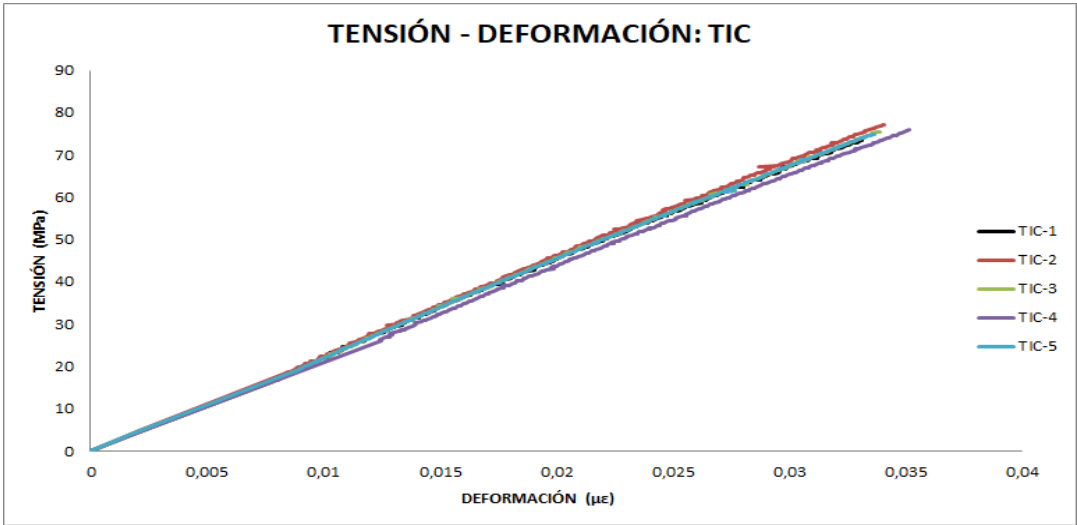


Ilustración 67: Gráfica tensión-deformación del grupo TIC.

	MÓDULO DE YOUNG E (MPa)	TENSIÓN MÁXIMA σ_{MAX} (MPa)	DEFORMACIÓN DE ROTURA ϵ (%)
TIC-1	2250,60	73,58	3,31
TIC-2	2291,80	77,15	3,41
TIC-3	2255,40	75,53	3,39
TIC-4	2178,60	75,94	3,52
TIC-5	2256,00	74,90	3,37
MEDIA	2246,48	75,42	3,40
DESVIACIÓN TÍPICA	41,38	1,32	0,08

Tabla 3: Tabla de resultados para el grupo TIC.

Para esta serie de datos los valores de los resultados son prácticamente iguales a los obtenidos para la serie de ensayos anterior, aunque mucho más uniformes.

→ PATRÓN ISOTRÓPICO:

En esta serie de datos se muestran los resultados pertenecientes a los grupos TI y TII.

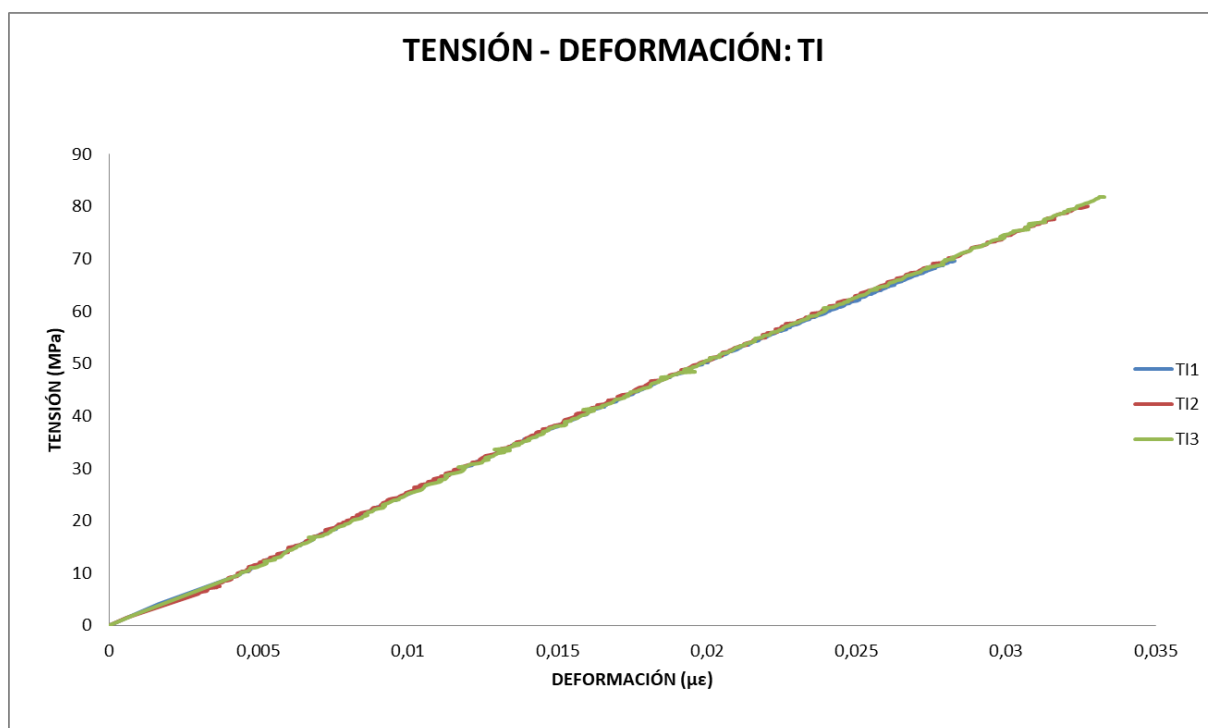


Ilustración 68: Gráfica tensión-deformación para el grupo TI.

	MÓDULO DE YOUNG E (MPa)	TENSIÓN MÁXIMA σ_{MAX} (MPa)	DEFORMACIÓN DE ROTURA ϵ (%)
TI-1	2538,80	69,64	2,67
TI-2	2522,10	80,05	3,26
TI-3	2512,00	81,80	3,26
MEDIA	2524,30	77,16	3,06
DESVIACIÓN TÍPICA	13,53	6,58	0,34

Tabla 4: Tabla de resultados para el grupo TI.

Lo más destacable de esta serie de ensayos respecto de las anteriores es el aumento de la tensión máxima y la uniformidad de los datos obtenidos, excepto por la tensión última de la primera probeta, el módulo de Young es prácticamente igual en toda la serie. La primera probeta ensayada rompió cerca de las mordazas lo que nos lleva a un posible fallo de impresión como se mencionó anteriormente o por la demasiada presión en las mordazas. Las dos probetas restantes si rompieron en la zona intermedia.

El aumento en la tensión última puede deberse a la orientación de la fibra, ya que al tener capas orientadas a 45° según la dirección de carga, la carga se distribuye por mayor sección de fibra.

En este caso, en la deformación de rotura si se supera el 3%, trabajando en la zona elástica.

Por último, las probetas con patrón isotrópico y con las capas de fibras alternadas.

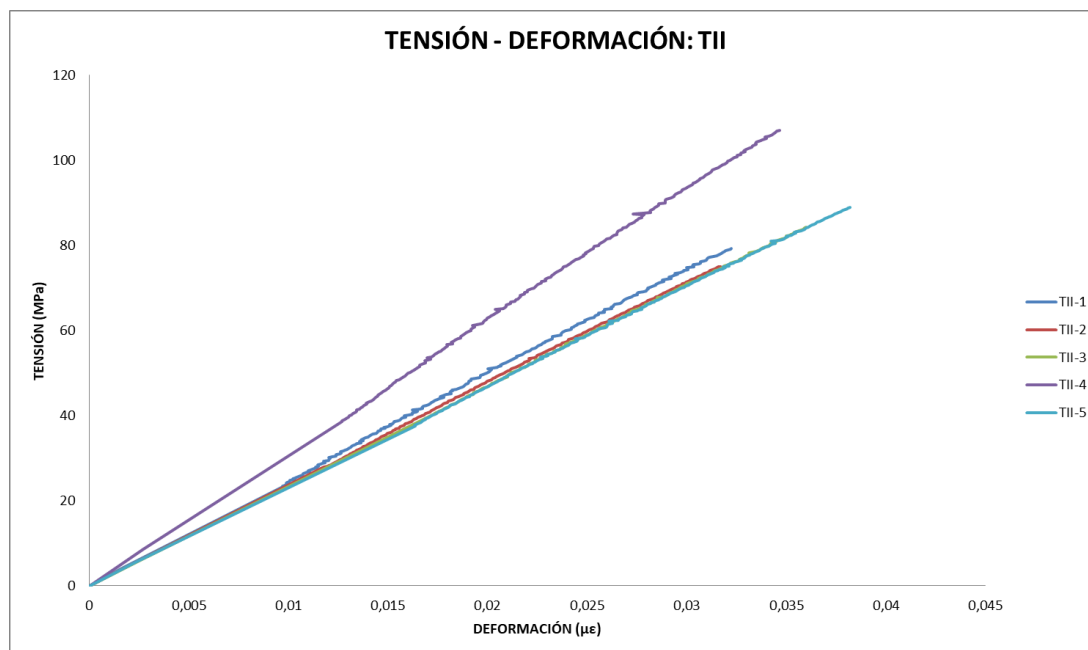


Ilustración 69: Gráfica tensión-deformación para el grupo TII.

	MÓDULO DE YOUNG E (MPa)	TENSIÓN MÁXIMA σ_{MAX} (MPa)	DEFORMACIÓN DE ROTURA ϵ (%)
TII-1	2490,00	79,16	3,22
TII-2	2387,50	74,94	3,17
TII-3	2352,90	84,22	3,60
TII-4	3120,90	107,08	3,47
TII-5	2344,00	88,93	3,82
MEDIA	2539,06	86,87	3,46
DESVIACIÓN TÍPICA	330,39	12,46	0,27

Tabla 5: Tabla de resultados para el grupo TII.

En esta serie de datos encontramos el mayor aumento del módulo elástico y de la deformación de rotura.

En el módulo de Young encontramos valores medios de hasta 2.5 GPa, soportando de media una tensión de rotura que roza los 90 MPa.

En valores de deformación, todas las probetas superaron el 3% de deformación en la zona elástica.

6.5. CONCLUSIONES:

Si nos fijamos en el módulo de Young obtenido para cada grupo observamos que las probetas con un patrón de fibra de vidrio isotrópico es mayor que el módulo obtenido con el patrón concéntrico. De la misma forma, se obtienen mayores tensiones de rotura con el patrón isotrópico, más aún con las capas alternadas, obteniendo un aumento del 13% de la tensión de rotura en el grupo TII en comparación con el grupo TIC.

Observando la deformación de rotura es el grupo TII el que ofrece la mayor deformación, de 3,46% frente al 3,40 que ofrece su grupo análogo con patrón concéntrico.

Por lo que podemos finalmente podemos determinar que para esfuerzos a tracción la forma más eficiente de imprimir las capas de refuerzo es de forma alternada y con patrón isotrópico.

Finalmente, para obtener una imagen más global de las propiedades obtenidas las comparo en diagramas.

MÓDULO DE YOUNG

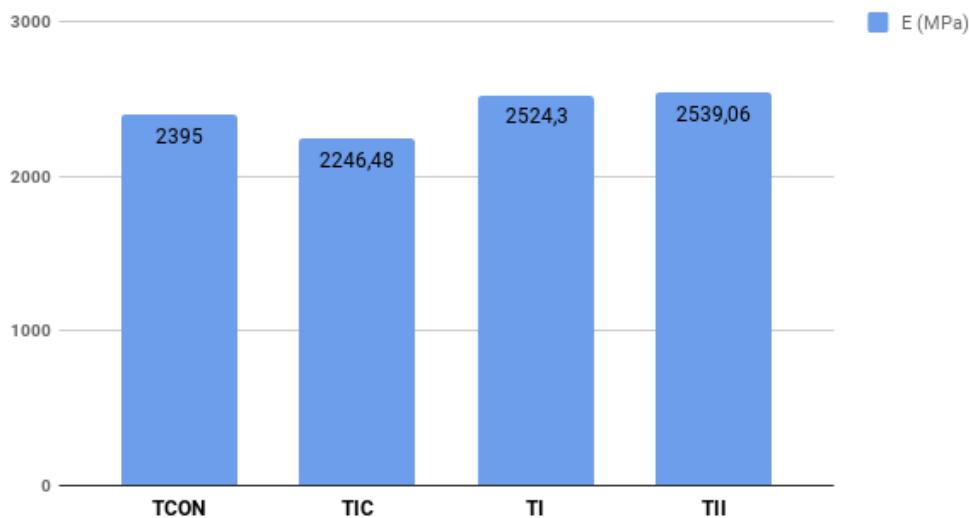


Ilustración 70: Comparación del módulo elástico para los diferentes grupos.

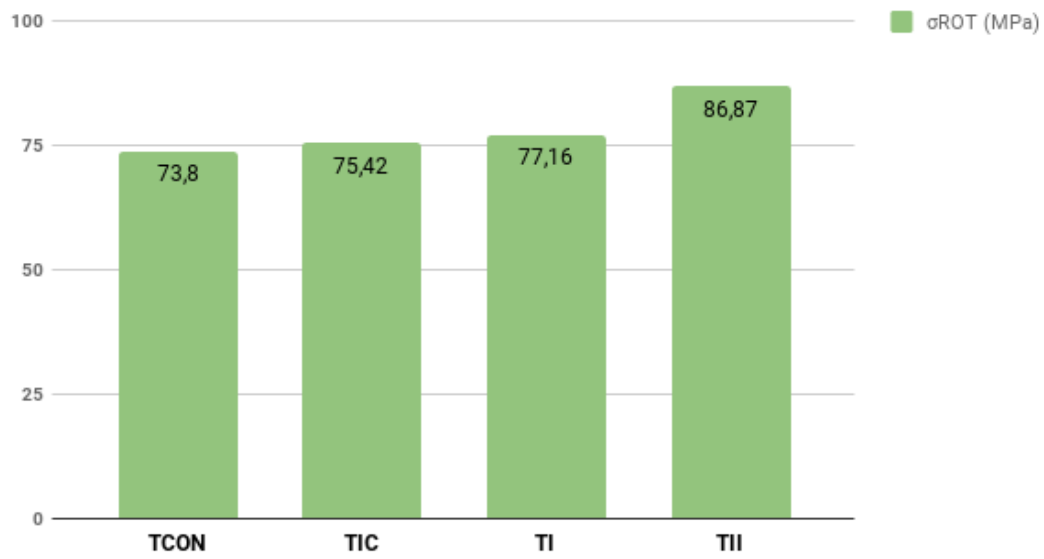
TENSIÓN DE ROTURA

Ilustración 71: Comparación de la tensión de rotura para los diferentes grupos.

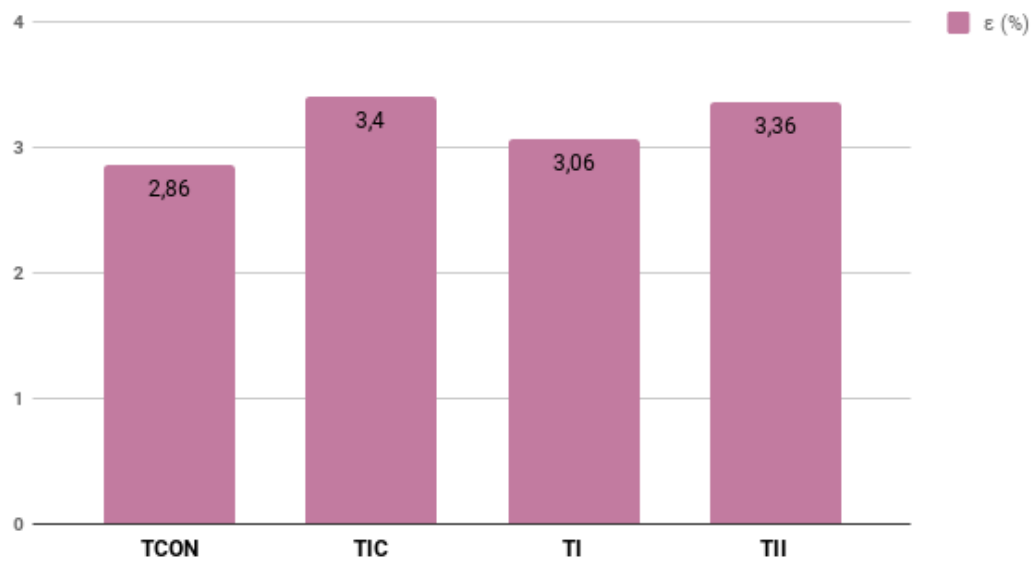
DEFORMACIÓN DE ROTURA

Ilustración 72: Comparación de la deformación de rotura para los diferentes grupos.

7. PROGRAMA EXPERIMENTAL II: ENSAYO A CORTANTE:

7.1. NORMA: ASTM D5379/D5379M-98:

El ensayo a cortante en este estudio se llevó a cabo según indicaciones y recomendaciones de la norma ASTM D5379/D 5379M-98, de la cual describo a continuación los puntos clave de esta norma.

Al igual que en el ensayo a tracción, se emplea la norma americana al no encontrar una norma ISO específica para este tipo de ensayos.

- ÁMBITO DE APLICACIÓN:

Este método de ensayo determina las propiedades de materiales compuestos reforzados con fibras de alto módulo sometidos a esfuerzo cortante puro. Los materiales compuestos están limitados a fibras continuas o a materiales compuestos con fibras de refuerzo en los que el laminado está formado por láminas o capas que contengan el mismo número de capas orientadas a 0° y 90° en equilibrio y simetría en la secuencia de apilamiento.

- RESUMEN DEL MÉTODO DE ENSAYO:

Las probetas deberán ser planas, con una sección transversal rectangular, además, debe constar de dos pestañas simétricas y centradas. En la figura a continuación se muestran las especificaciones geométricas que debe tener.

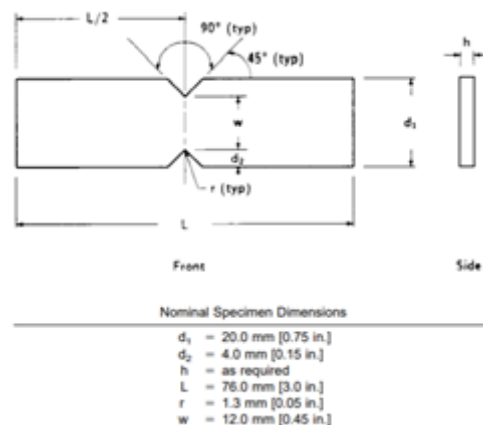


Ilustración 73: Especificaciones geométricas de las probetas de cortante.

Las probetas se cargarán en la máquina de ensayos con la ayuda de mordazas especiales, mostradas en la imagen 48.

La probeta se introducirá en la mordaza con las pestañas situadas a lo largo de la línea de acción de la carga. La mordaza superior comenzará su desplazamiento gracias a la máquina de ensayos, esto provocará un esfuerzo cortante en la probeta mientras que se registra la carga.

NOTA: la norma recomienda usar dos galgas extensiométricas entre las dos pestañas para medir las deformaciones pero, al igual que en el ensayo a tracción, definiré de forma virtual estas galgas en el software VIC 2D-6. La colocación de las galgas y de los extensómetros virtuales será igual y se muestra en la figura a continuación perteneciente a la norma.

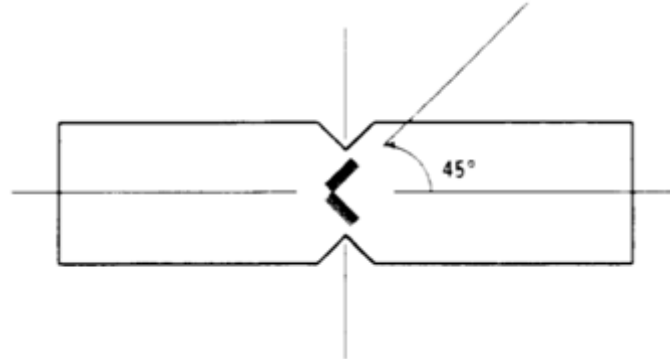


Ilustración 74: Situación de los extensómetros.

- GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS:

Al igual que en la norma del ensayo a tracción, se recomienda ensayar al menos cinco probetas para cada tipo de ensayo, a menos que se puedan garantizar resultados exactos con menor número de ensayos.

En la siguiente figura se muestra la geometría que debe tener la probeta. Además, la norma añade una figura que recoge la forma, dimensiones y tolerancias.

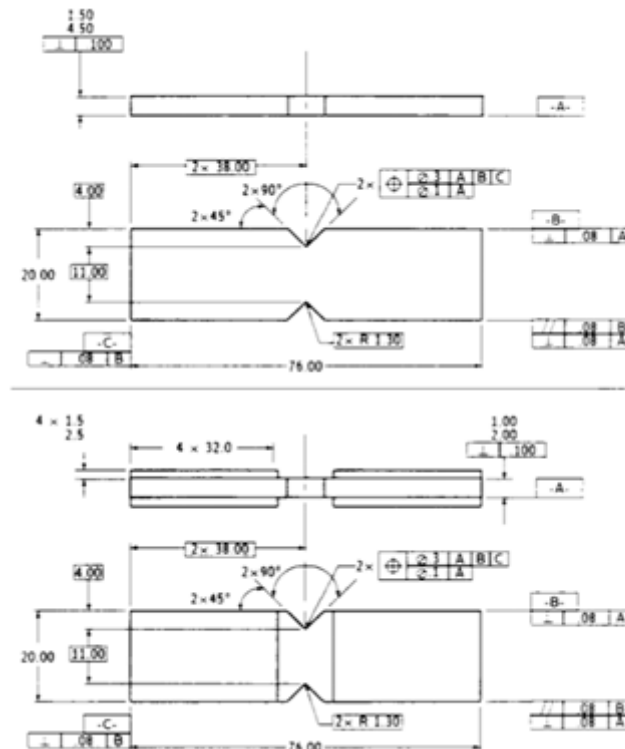


Ilustración 75: Geometría y tolerancia de las probetas.

- ORIENTACIÓN DEL MATERIAL:

Este apartado es importante pues describe los seis planos sobre los que se puede realizar el ensayo, haciendo una clasificación según rompa el material al aplicarle el esfuerzo cortante:

-En el plano: si la carga está aplicada en el plano 1-2.

-Interlaminar: para cualquier corte o deformación que se produzca en los planos 1-3 ó 2-3.

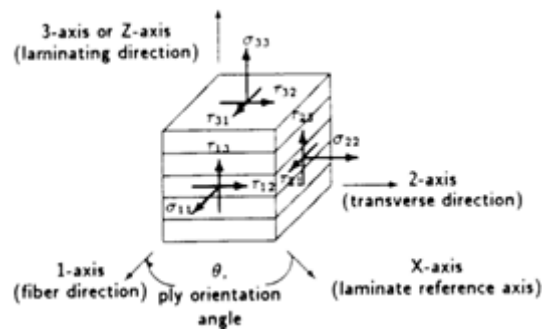


Ilustración 76: Sistema de coordenadas del material.

De la misma forma, la norma nos describe cuál es el módulo de elasticidad transversal calculado según la orientación de las capas y según la orientación del esfuerzo aplicado.

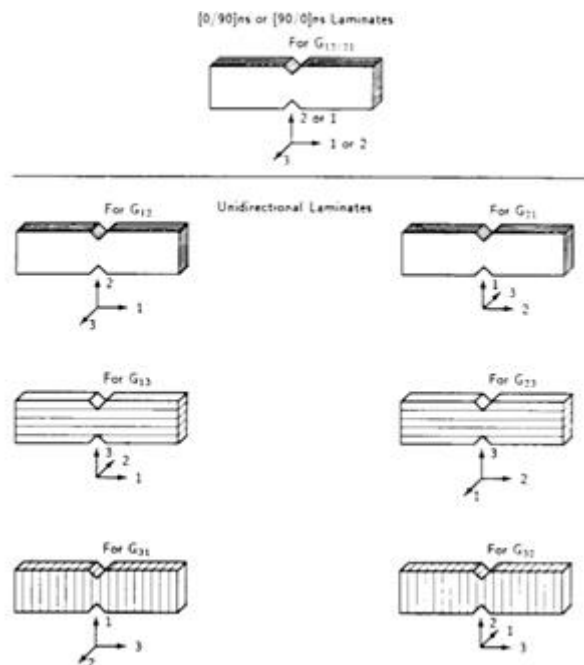


Ilustración 77: Posibles orientaciones de los planos del material.

- PROCEDIMIENTO:

Al igual que para el ensayo a tracción esta norma nos recomienda tres mediciones de la sección transversal y tomar como sección válida la media de estas tres.

- Velocidad de ensayo: no se establece ninguna velocidad para este ensayo, aunque impone la condición de que el ensayo no dure más de diez minutos.

Para este ensayo he tomado una velocidad de desplazamiento de las garras de 2 mm/min, alcanzando un tiempo máximo de ocho minutos para cada ensayo.

- Colocación de las probetas: se muestra debajo una imagen de cómo debe quedar la probeta colocada antes de realizar el ensayo.

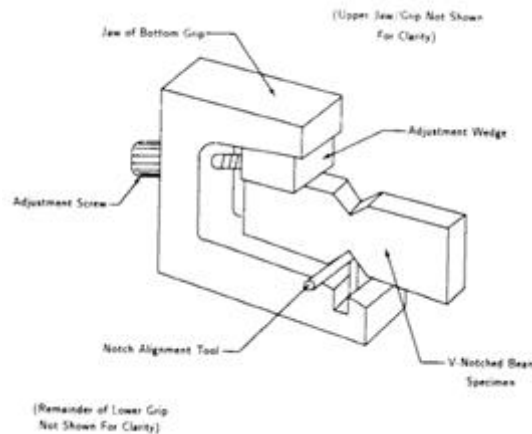


Ilustración 78: Colocación de las probetas en las mordazas.

- Modos de fallo: nos corresponde, una vez finalizado el ensayo, establecer una relación entre el modo de fallo de nuestra probeta y las formas más típicas de rotura para saber si nuestro ensayo es válido.

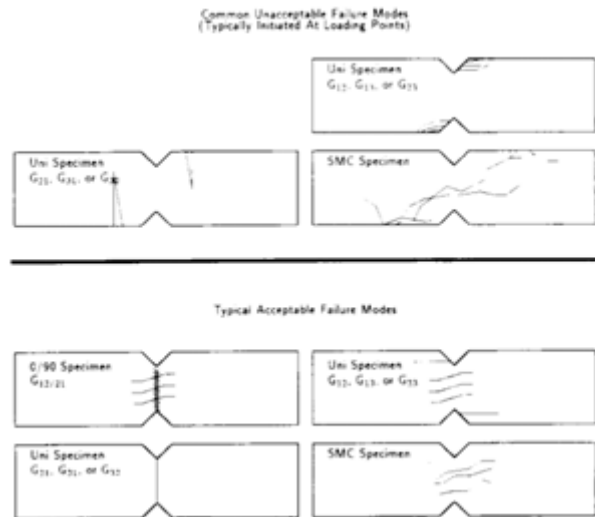


Ilustración 79: Formas comunes de fallo.

- CÁLCULOS:

Calcularé según esta norma la tensión de cortante y la deformación total, que será función de las dos galgas extensiométricas. Aunque no haga uso de las galgas los extensómetros virtuales se comportan de igual forma que éstas, por lo que considero válido el cálculo de la deformación según indica la norma.

→ Tensión:

$$F^u = P^u / A \quad ec(5)$$

$$\tau_i = \frac{P_i}{A} \quad ec(6)$$

Donde:

F^u : tensión última, [MPa].

P^u : carga al 5% de deformación, [N].

τ_i : tensión tangencial en el punto 'i' de la medición, [MPa].

P_i : carga en el punto 'i' de la medición, [N].

A : sección transversal indicada en la imagen [].

→ Deformación:

$$\gamma_i = |\varepsilon_{+45}| + |\varepsilon_{-45}| \quad ec(7)$$

$$\gamma_a = \min\{5\% \gamma \text{ última carga}\}$$

Donde:

γ_i : deformación tangencial en el punto i de la medición, [$\mu\varepsilon$].

ϵ_{+45} : deformación normal a $+45^\circ$ en el punto i de la medición, $[\mu\epsilon]$.

ϵ_{-45} : deformación normal a -45° en el punto i de la medición, $[\mu\epsilon]$.

γ^a : deformación tangencial última, $[\mu\epsilon]$.

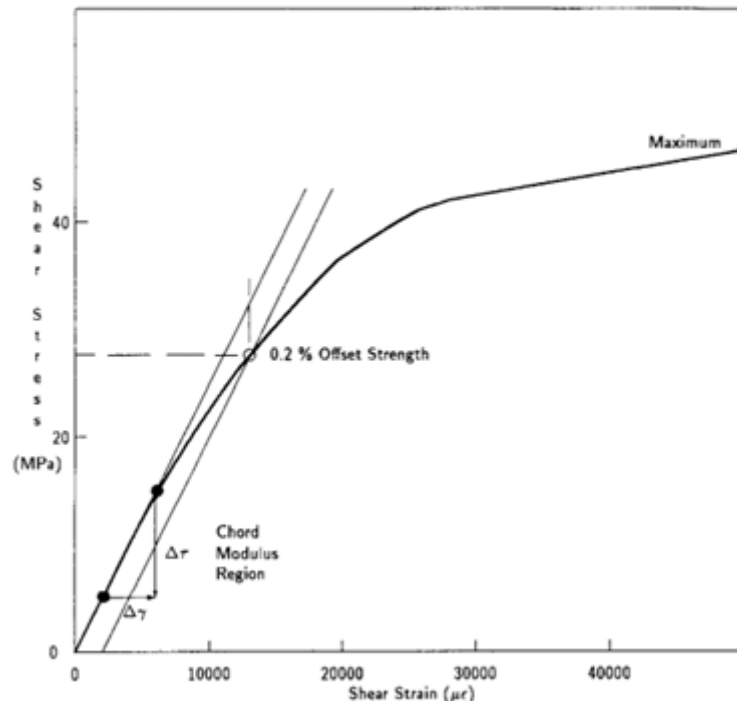


Ilustración 80: Respuesta tensión-deformación para ensayos a cortante.

7.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PROBETAS:

Para este ensayo los patrones de impresión que se modificarán para estudiar su importancia en la resistencia de la pieza impresa son: la posición de la capa de fibra de refuerzo y el patrón de ésta.

Tras importar el archivo *.stl al software Eiger de la impresora el número total de capas para estas probetas son 40, con una altura de 0,1 mm cada una.

Los patrones estudiados serán: concéntrico e isotrópico. La disposición de las capas de fibra es simétrica y se imprimirán a partir de la quinta capa.

De forma análoga al ensayo de tracción estableceré dos grupos para cada patrón de fibra: un primer grupo con ambas capas de fibra de vidrio dispuestas de forma contigua y otro grupo con las capas de fibra dispuestas de forma intercalada. Obteniendo en total cuatro grupos de probetas, con la siguiente nomenclatura:

- Patrón de fibra concéntrico, capas contiguas: CCON.
- Patrón de fibra isotrópico, capas contiguas: CI.
- Patrón de fibra concéntrico, capas intercaladas: CIC.
- Patrón de fibra isotrópico, capas intercaladas: CII.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros de impresión para cada grupo de probetas.

NOMBRE	NÚMERO	PATRÓN DE RELLENO	PATRÓN DE FIBRA DE VIDRIO
CCON	3	Triangular	6 anillos concéntricos
CI	3	Triangular	[0, 45]
CIC	5	Triangular	6 anillos concéntricos
CII	5	Triangular	[0, 45]

Tabla 6: Grupo de probetas para el ensayo a cortante.

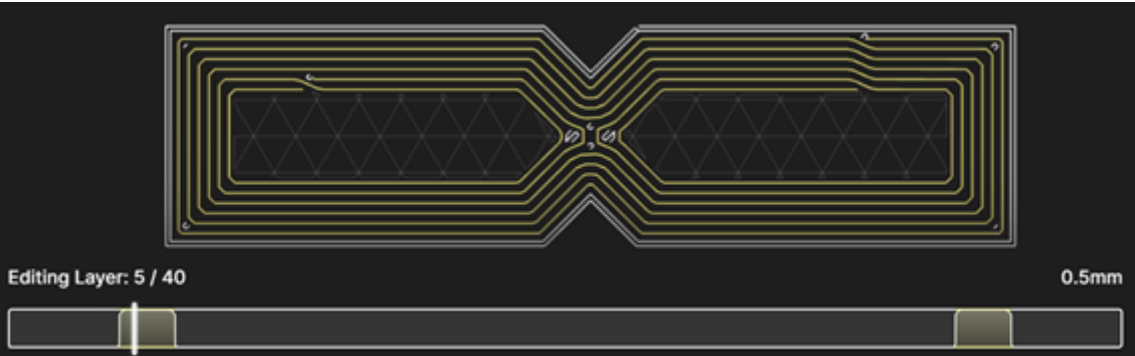


Ilustración 81: Patrón concéntrico, capas de fibra contiguas, 6 anillos.

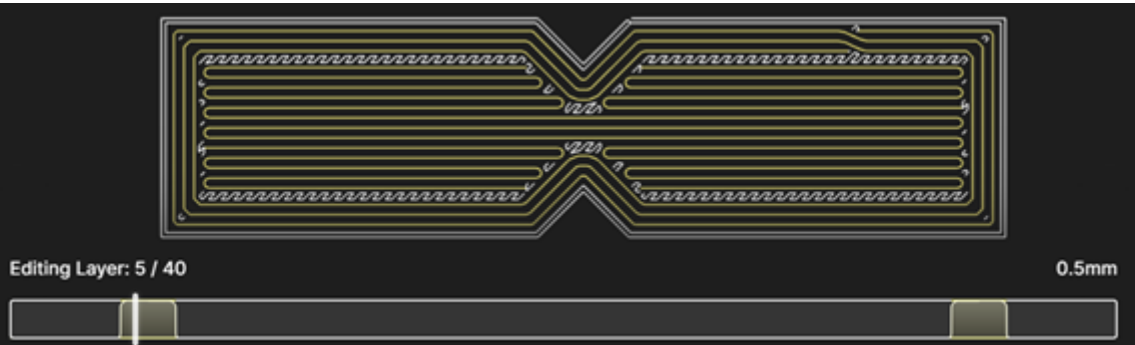


Ilustración 82: Patrón isotrópico, capas de fibra contiguas, fibra a 0°.

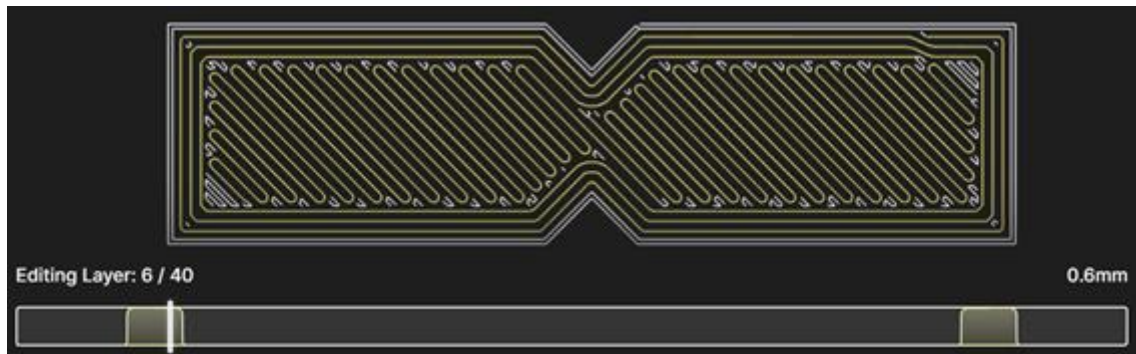


Ilustración 83: Patrón isotrópico, capas de fibra contiguas, fibra a 45°.

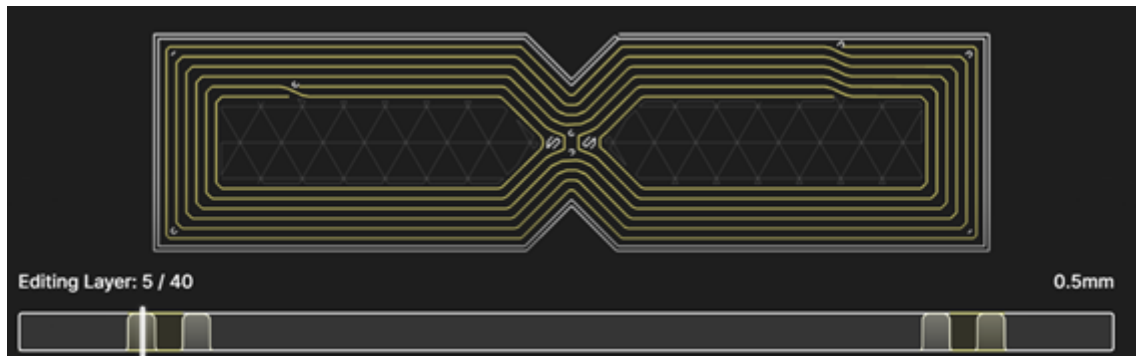


Ilustración 84: Patrón concéntrico, capas de fibra intercaladas.

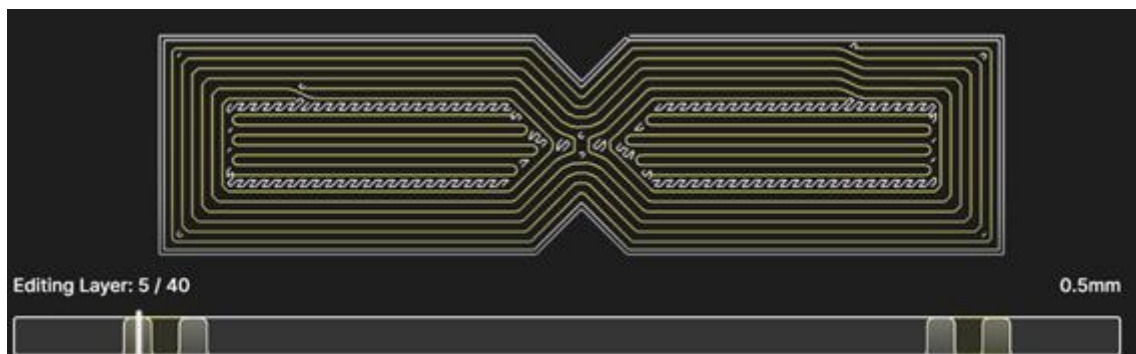


Ilustración 85: Patrón isotrópico, capas de fibra intercaladas, fibra a 0°.

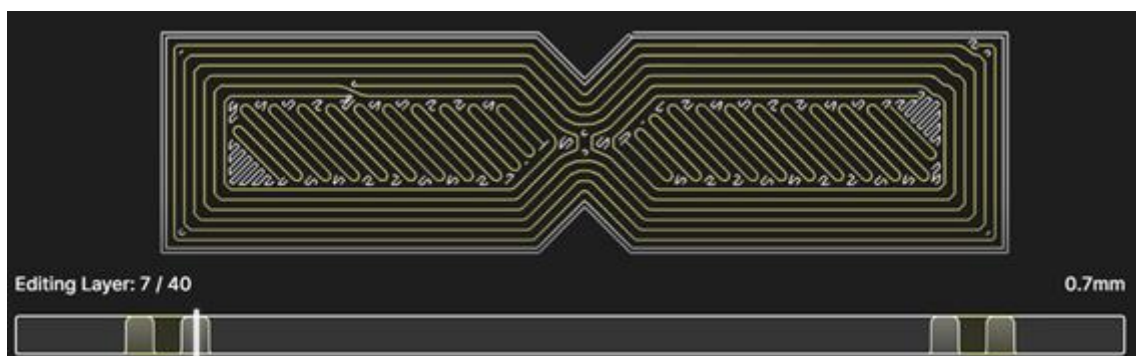


Ilustración 86: Patrón isotrópico, capas de fibra intercaladas, fibra a 45°.

Finalmente, muestro una imagen correspondiente al patrón de fibra concéntrico de una probeta de la cual se detuvo la impresión por problemas de extrusión.

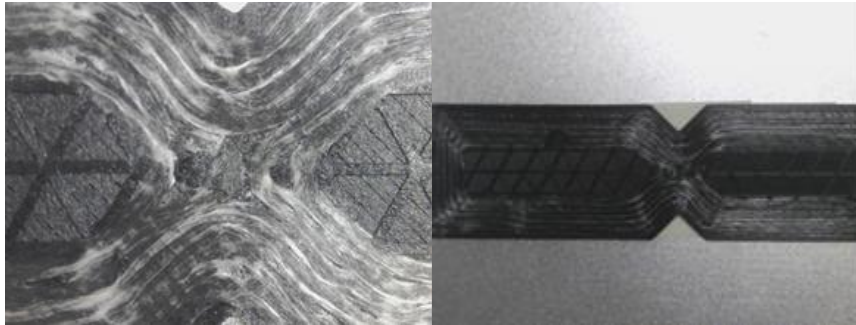


Ilustración 87: Patrón concéntrico en probeta real.

7.3. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Comienzo tomando tres mediciones de la sección de carga, tomando como final la sección media. En este caso, como la zona que nos interesa es la zona de la pestaña, realizaré tres mediciones en la pestaña.

$$A = w * h$$

Donde:

w : distancia entre pestañas, [mm].

h : espesor, [mm].

El proceso de moteado es igual que en las probetas a tracción, al igual que el proceso de calibración de la cámara y de la máquina. A continuación adjunto una figura con una foto calibrada.

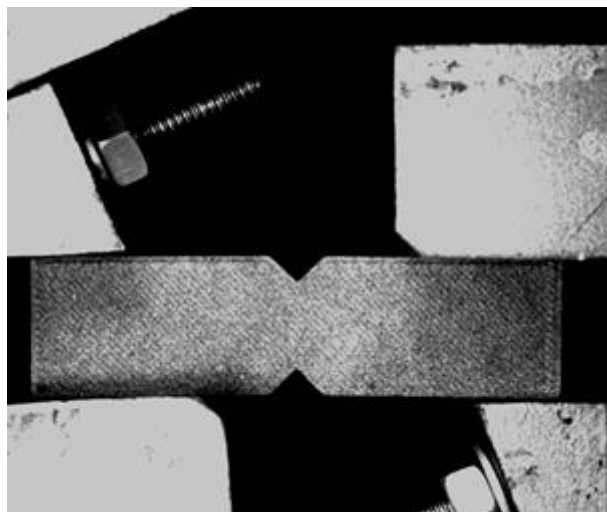


Ilustración 88: Probeta instalada en las mordazas en posición de reposo.

Para este ensayo empleamos las garras mostradas en la figura 48, prestando especial cuidado a que la probeta quede totalmente recta entre la sección de apoyo y la cuña, garantizando así que el esfuerzo es uniforme por toda la cara lateral de la probeta.



Ilustración 89: Probeta en su posición de máxima deformación.

A continuación se realiza el análisis DIC. Es importante para este ensayo colocar los extensómetros tal cual nos indica la norma, ambos a 45° en la sección de la pestaña.

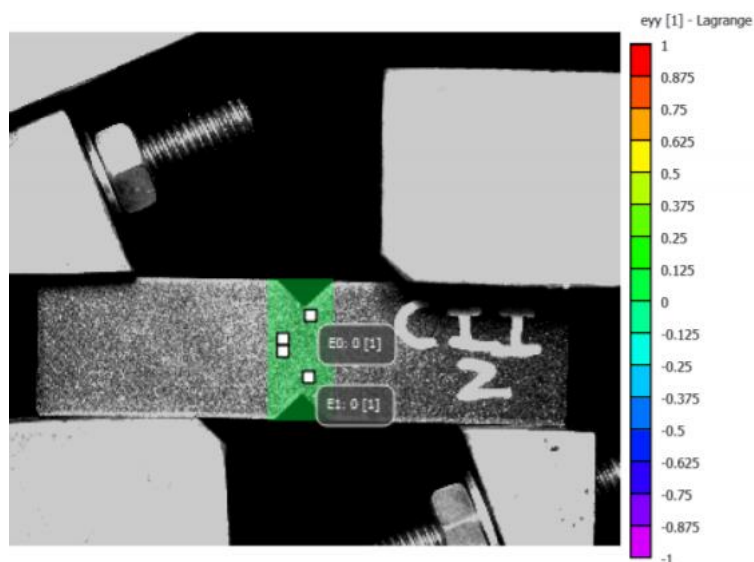


Ilustración 90: Extensómetros virtuales en DIC.

Al tener dos extensómetros, tendremos dos campos de deformaciones, de los cuales calcularemos la deformación total según la ecuación 7. En la imagen siguiente se muestra la deformación de ambos extensómetros en función del tiempo.

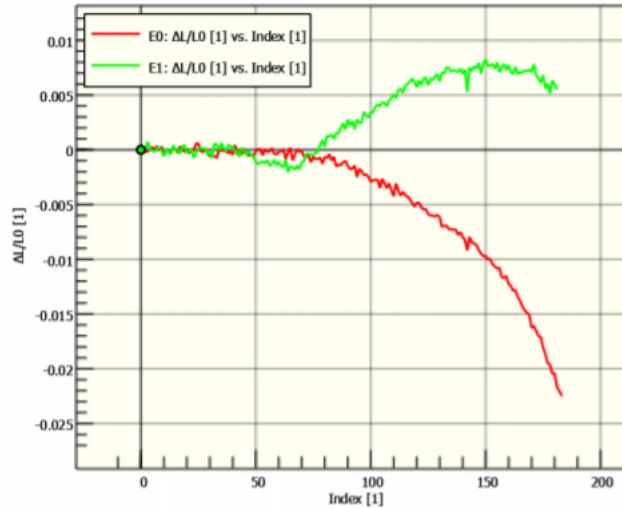


Ilustración 91: Deformaciones de ambos extensómetros mostrados en la imagen 90.

7.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS:

En este apartado dividiré los ensayos realizados en dos subapartados para facilitar la comparación entre ellos. Primero se mostrarán los resultados del grupo de las probetas con patrón concéntrico de fibra de refuerzo y finalmente los resultados del grupo de las probetas con patrón isotrópico.

Como se mencionó en el apartado anterior ninguna probeta llegó a romper, por lo que los ensayos se dieron por finalizados cuando se alcanza la carga máxima.

Los resultados mostrados a continuación ofrecen las curvas experimentales tensión tangencial frente a la deformación tangencial.

→ PATRÓN CONCÉNTRICO:

En primer lugar se muestran las probetas con las capas de fibra de vidrio contiguas:

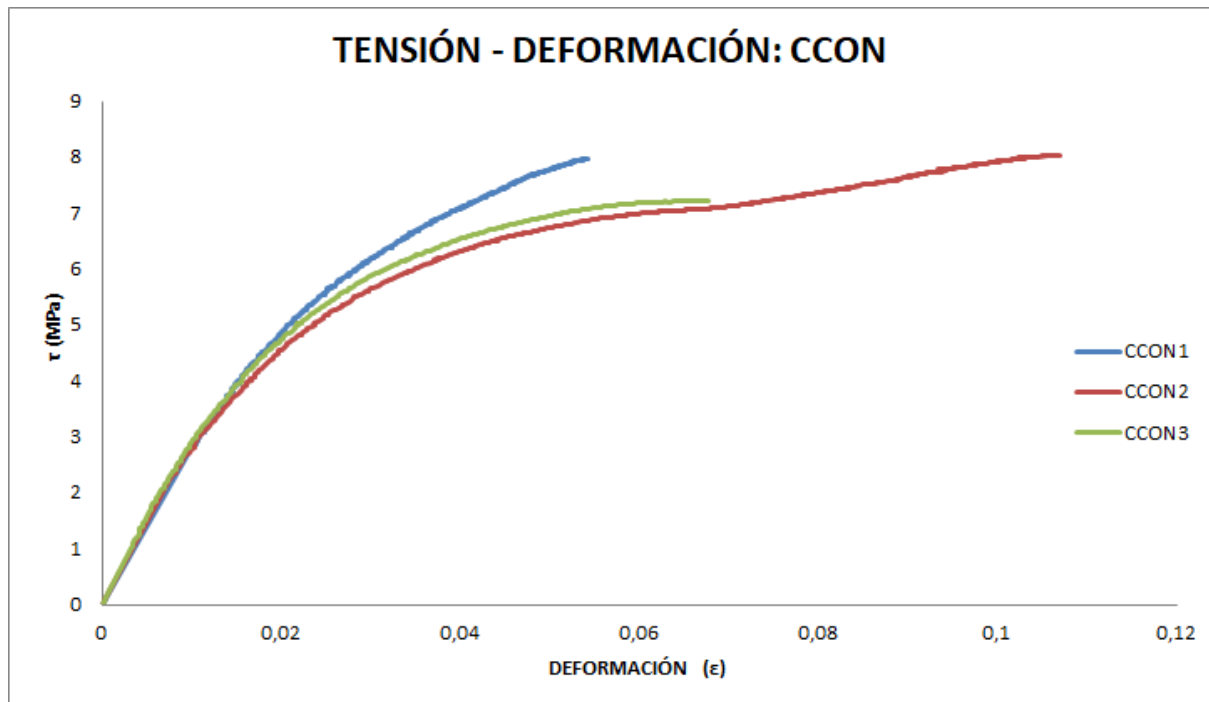


Ilustración 92: Gráfica tensión-deformación para el grupo CCON.

	MÓDULO TRANSVERSAL DE ELASTICIDAD G [MPa]	TENSIÓN MÁXIMA τ [MPa]	DEFORMACIÓN MÁXIMA γ(%)
CCON-1	280,32	7,97	5,42
CCON-2	299,69	8,02	10,71
CCON-3	310,20	7,23	6,76
MEDIA	269,74	7,74	7,63
DESVIACIÓN TÍPICA	16,75	0,69	3,26

Tabla 7: Tabla de resultados para el grupo CCON.

A continuación los resultados para las capas de fibra alternadas:

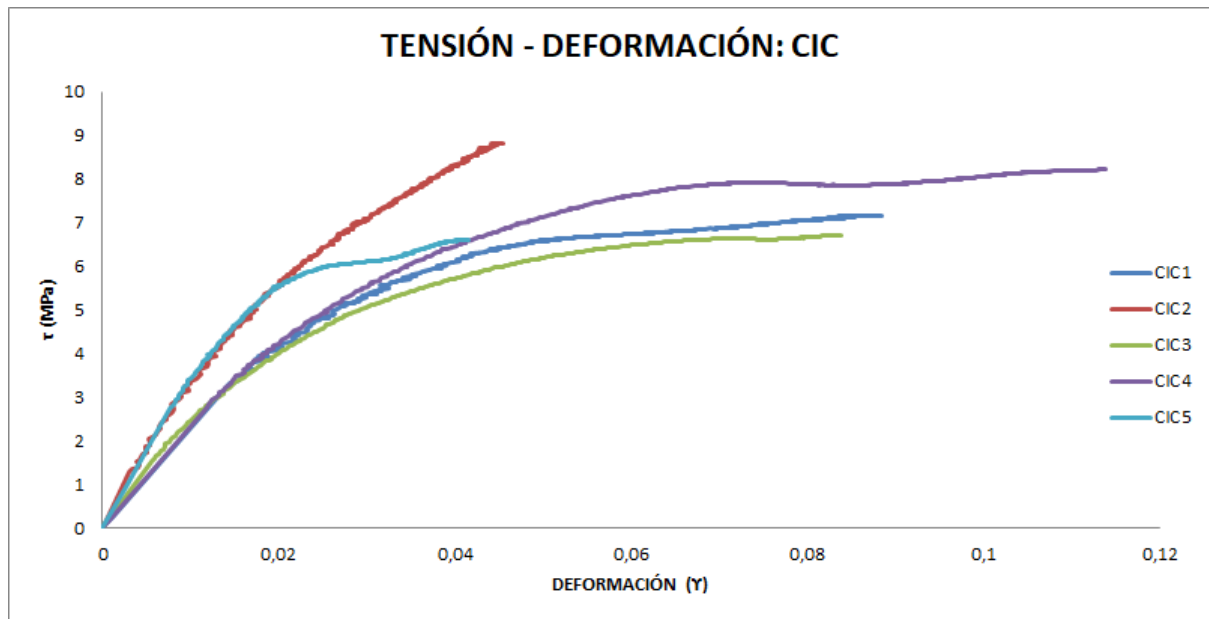


Ilustración 93: Gráfica tensión-deformación para el grupo CIC.

	MÓDULO TRANSVERSAL DE ELASTICIDAD	TENSIÓN MÁXIMA	DEFORMACIÓN MÁXIMA
	G [MPa]	τ [MPa]	γ (%)
CIC-1	230,28	7,17	8,85
CIC-2	416,46	8,81	4,53
CIC-3	268,66	6,71	8,38
CIC-4	232,22	8,22	11,40
CIC-5	359,78	6,60	4,13
MEDIA	301,48	7,50	7,46
DESVIACIÓN TÍPICA	83,01	0,97	3,08

Tabla 8: Tabla de resultados para el grupo CIC.

Comparando los resultados de ambos grupos de probetas podemos determinar que en este caso la disposición de la fibra de vidrio no afecta para nada la disposición y el patrón.

Se observa un pequeño aumento del módulo de elasticidad transversal en el lote con las capas de fibra de vidrio alternadas, aunque no es un aumento sustancial.

Si nos fijamos en los valores de deformación máxima podemos decir que son muy similares.

→ PATRÓN ISOTRÓPICO:

En primer lugar se muestran las probetas con las capas de fibra contiguas.

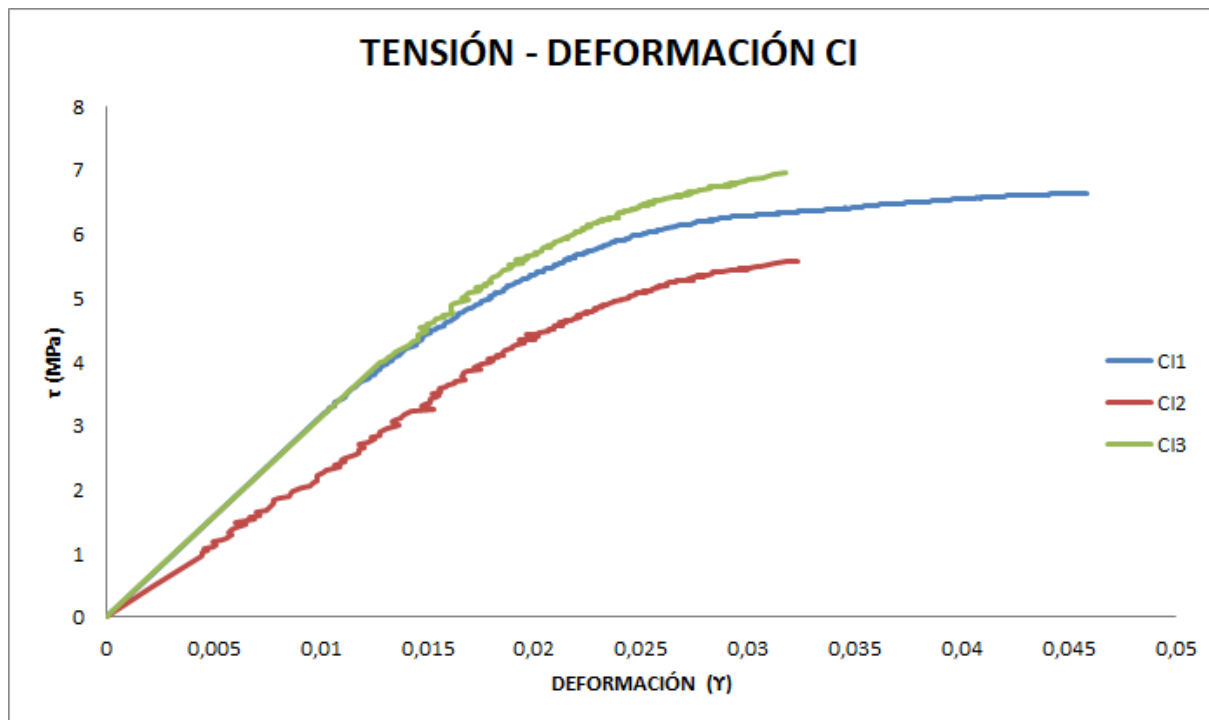


Ilustración 94: Gráfica tensión-deformación del grupo CI.

	MÓDULO TRANSVERSAL DE ELASTICIDAD	TENSIÓN MÁXIMA	DEFORMACIÓN MÁXIMA
	G [MPa]	τ [MPa]	γ(%)
CI-1	311,18	6,63	4,59
CI-2	214,23	5,56	3,24
CI-3	310,32	6,94	3,18
MEDIA	278,58	6,38	3,67
DESVIACIÓN TÍPICA	55,73	0,72	0,80

Tabla 9: Tabla de resultados para el grupo CI.

Finalmente, los resultados para las capas alternadas de fibra de vidrio.

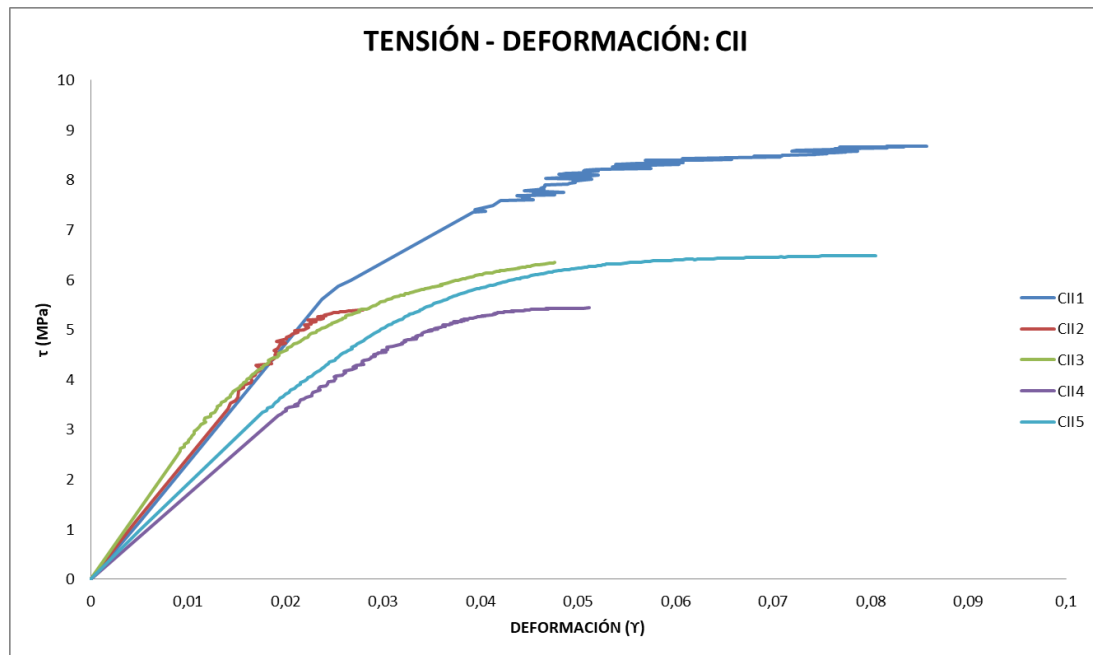


Ilustración 95: Gráfica tensión-deformación para el grupo CII.

	MÓDULO TRANSVERSAL DE ELASTICIDAD G [MPa]	TENSIÓN MÁXIMA τ [MPa]	DEFORMACIÓN MÁXIMA γ(%)
CII-1	237,28	8,67	8,57
CII-2	242,56	5,40	2,78
CII-3	279,20	6,34	4,76
CII-4	170,81	5,43	5,11
CII-5	189,24	6,48	8,05
MEDIA	223,82	6,47	5,85
DESVIACIÓN TÍPICA	43,60	1,33	2,42

Tabla 10: Tabla de resultados para el grupo CII.

Los resultados de este grupo son muy similares entre sí, salvo por el aumento en la deformación máxima que se alcanza con el patrón isotrópico alternado. Los valores del módulo de elasticidad transversal y de tensión máxima son prácticamente iguales por lo que podemos concluir que la localización de las capas de fibra de vidrio no influyen en la resistencia de la pieza.

7.5. CONCLUSIONES:

Mejores resultados ofrecen en este caso las probetas con patrón concéntrico, obteniendo valores muy similares tanto para las capas alternadas como para las capas contiguas.

En el caso del patrón de fibra isotrópico se obtuvieron peores resultados, tanto para el módulo transversal de elasticidad como para la tensión y deformación últimas.

En este caso es más sencillo concluir que la forma más óptima de imprimir las capas de fibra de refuerzo es con patrón concéntrico sin importar demasiado si las capas están contiguas o alternadas.

MÓDULO DE ELASTICIDAD TRANSVERSAL

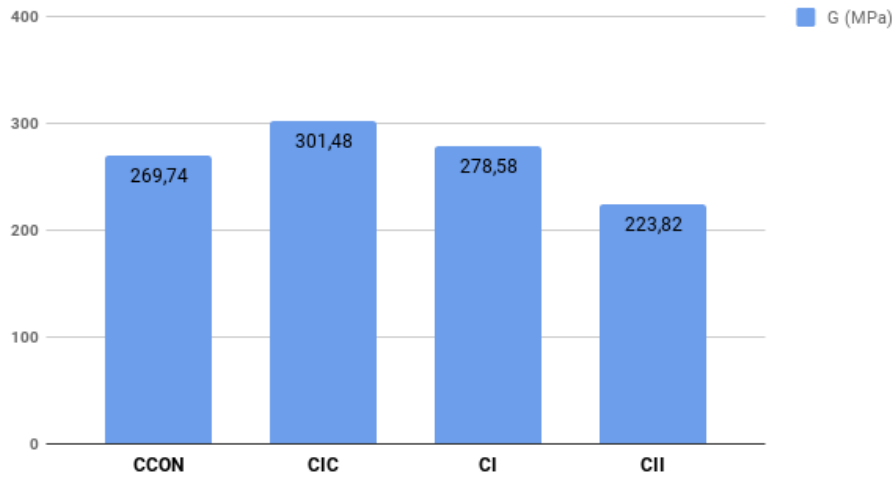


Ilustración 96: Comparación del módulo de elasticidad transversal.

TENSIÓN MÁXIMA



Ilustración 97: Comparación de la tensión máxima.

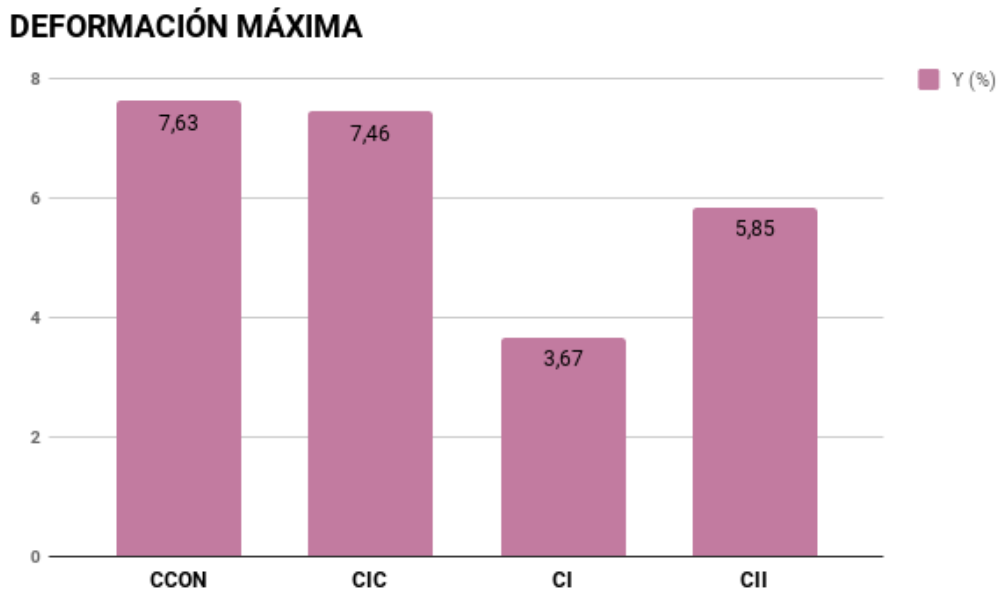


Ilustración 98: Comparación de la deformación máxima.

8. COEFICIENTE DE POISSON:

Para realizar una caracterización mecánica completa de este estudio es interesante calcular el coeficiente de Poisson para el ensayo a tracción. Se define coeficiente de Poisson (ν) como la relación que existe entre la deformación longitudinal en sentido perpendicular a la fuerza aplicada y la deformación longitudinal en la dirección de la fuerza aplicada.

$$\nu = |\varepsilon_T / \varepsilon_L| = |\varepsilon_x / \varepsilon_y| \quad ec(8)$$

Donde:

ε_T : deformación perpendicular al sentido de aplicación de la fuerza. Al ser un ensayo a tracción siendo el eje 'y' el eje de aplicación de la carga, esta deformación es equivalente a la deformación en el eje 'x'.

ε_L : deformación en sentido de aplicación de la fuerza. Es la correspondiente a la deformación en el eje 'y'.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para los cuatro grupos de probetas del ensayo a tracción.

→ TCON:

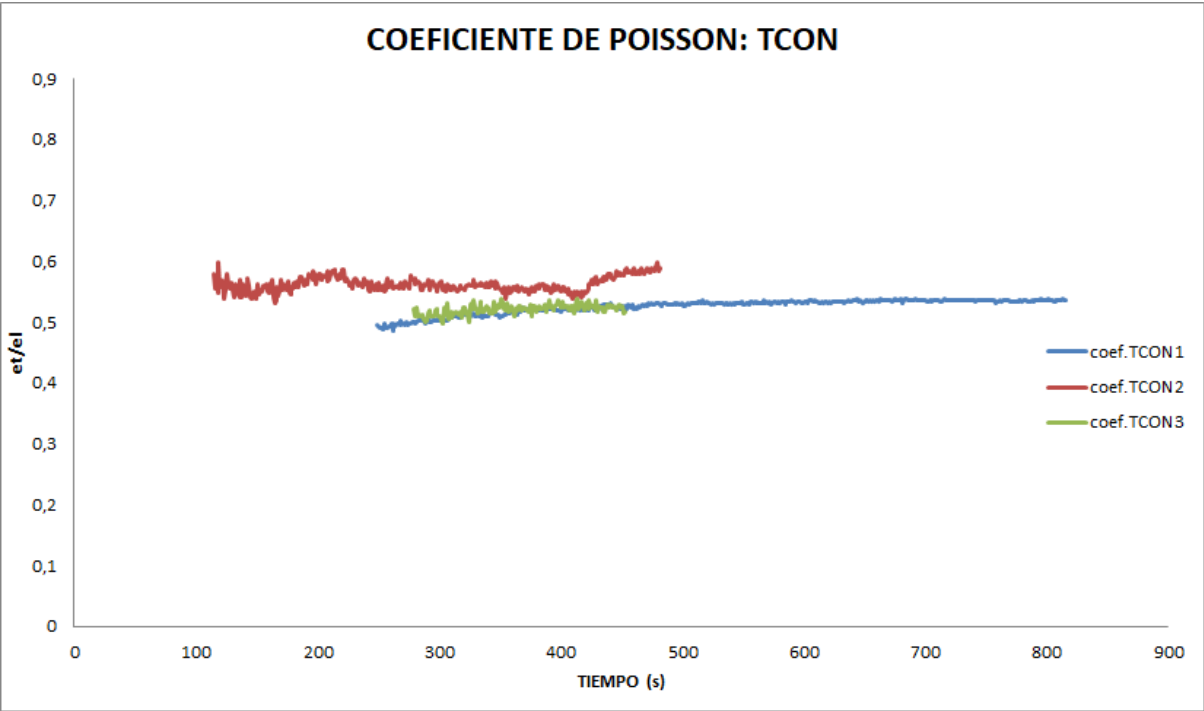


Ilustración 99: Coeficiente de Poisson del grupo TCON.

COEFICIENTE DE POISSON	
	v
TCON-1	0,49
TCON-2	0,55
TCON-3	0,49
MEDIA	0,51
DESVIACIÓN TÍPICA	0,04

Tabla 11: Valores del coeficiente de Poisson del grupo TCON.

→ TI:

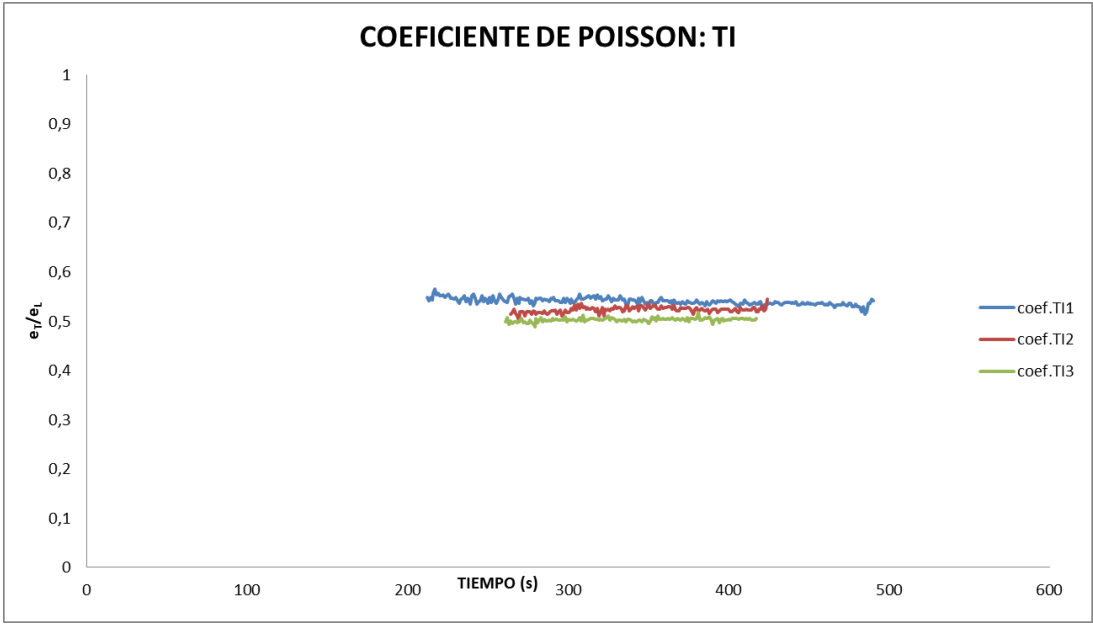


Ilustración 100: Coeficiente de Poisson del grupo TI.

COEFICIENTE DE POISSON	
	v
TI-1	0,56
TI-2	0,51
TI-3	0,49
MEDIA	0,52
DESVIACIÓN TÍPICA	0,04

Tabla 12: Valores del coeficiente de Poisson del grupo TI.

→ TIC:

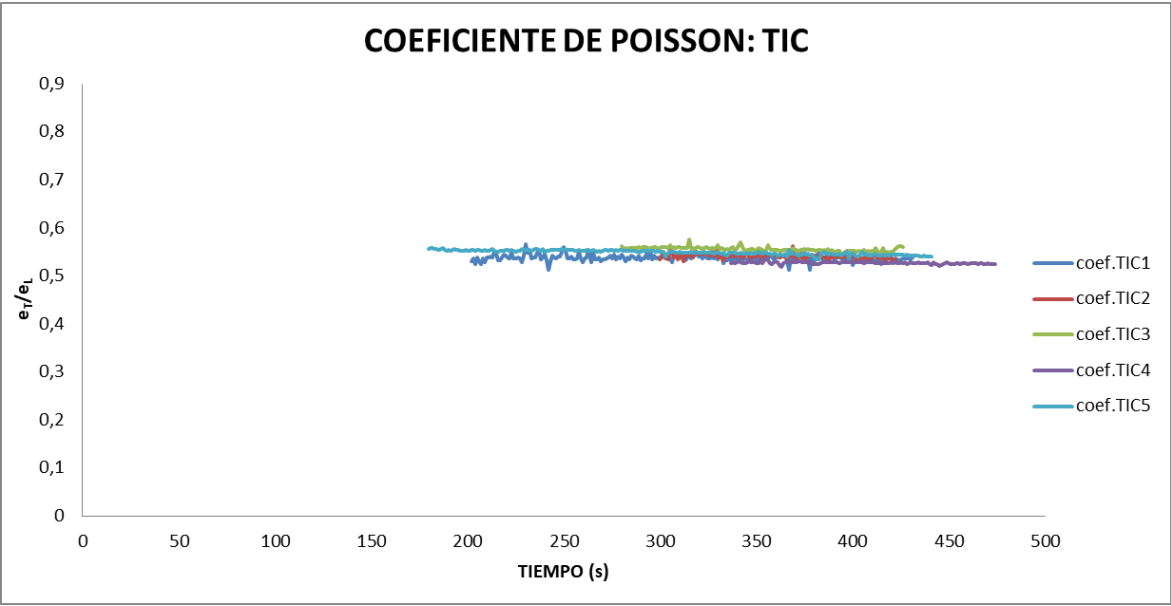


Ilustración 101: Coeficiente de Poisson del grupo TIC.

COEFICIENTE DE POISSON	
	ν
TIC-1	0,54
TIC-2	0,56
TIC-3	0,58
TIC-4	0,54
TIC-5	0,57
MEDIA	0,56
DESVIACIÓN TÍPICA	0,02

Tabla 13: Valores del coeficiente de Poisson del grupo TIC.

→ TII:

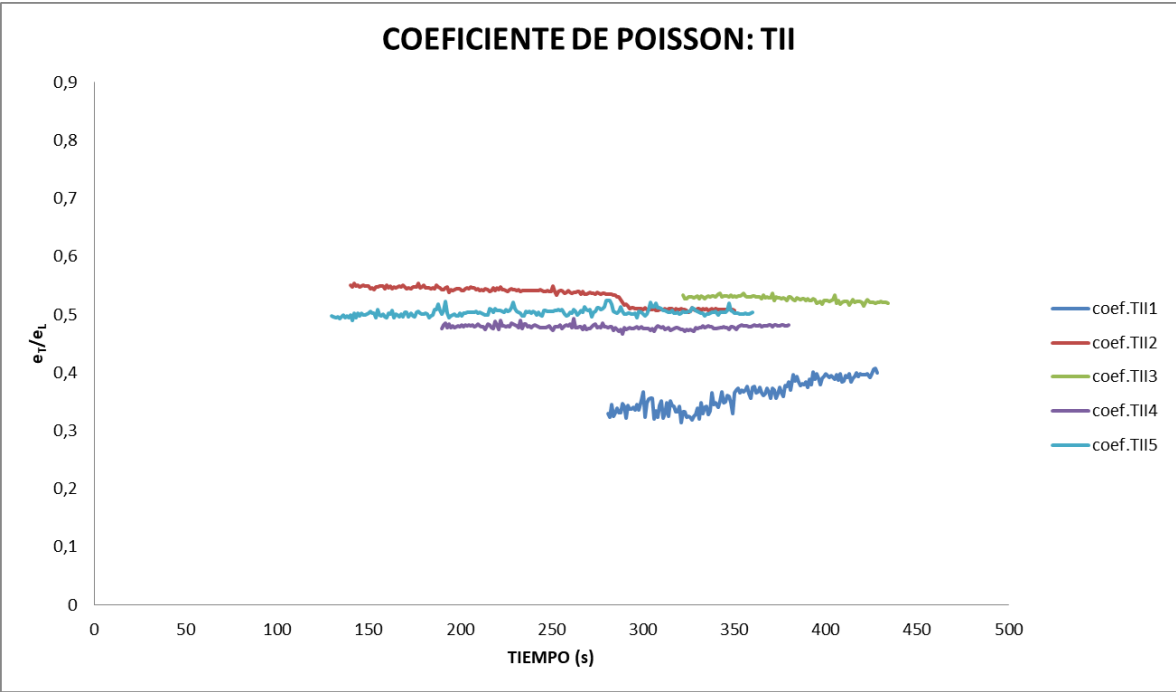


Ilustración 102: Coeficiente de Poisson del grupo TII.

COEFICIENTE DE POISSON	
	v
TII-1	0,17
TII-2	0,59
TII-3	0,57
TII-4	0,48
TII-5	0,50
MEDIA	0,46
DESVIACIÓN TÍPICA	0,17

Tabla 14: Valores del coeficiente de Poisson del grupo TII.

El coeficiente de Poisson varía habitualmente entre 0 y 0,5 para materiales isotrópos, los resultados obtenidos son coherentes con la anisotropía del material reforzado con fibra. Estos valores no se encuentran en la bibliografía, por lo que su determinación resulta novedosa e interesante.

9. MODOS DE FALLO:

En este apartado se desarrollarán los modos de fractura que presentaron las probetas tanto en el ensayo a tracción como en el ensayo a cortante.

→ ENSAYO A TRACCIÓN:

En los ensayos iniciales se observó que las probetas no rompían en la zona situada entre ambas mordazas, sino que rompían por zonas cercanas a las mordazas. A esto se le pueden atribuir varias explicaciones:

- La fuerza con la que se agarra la mordaza a la probeta pudo ser demasiado grande, lo que provocó estados tensionales adicionales en la zona de agarre de la probeta.
- Las probetas no tienen la geometría 'tipo hueso', como recogen otras normas para ensayos a tracción similares. Esto introduce incertidumbre sobre la zona en la que romperá.
- Las probetas tienen una longitud mucho mayor que su ancho lo que provocó que en algunos casos se despegaran de la bandeja de impresión, esto conduce a fallos de adherencia del plástico y de la fibra de vidrio sobre las capas anteriores, lo que afecta directamente a la resistencia de la probeta.
- En el estudio analizado en el punto 4 de esta memoria se reportaron fallos similares en las zonas de inserción de la fibra en la pieza. En los puntos donde comienza a imprimirse la fibra de vidrio presentan varias discontinuidades, este problema fue resuelto modificando los puntos de inserción de la fibra, llevándose estos puntos fuera de la pieza para que la distribución de la fibra en el interior de la pieza fuese uniforme. En este estudio no se pudo hacer debido a que la impresora no incluye esta función.

Aunque no todas las probetas rompieran en la zona intermedia de la sección todos los modos de fallo se consideran válidos, pues le puedo asignar el código de fractura que establece la norma en el apartado 6.1 figura 53.

GRUPO PROBETA	CÓDIGO FRACTURA
TCON	LAT
TI	LAT
TIC	AGM
TII	SGM

Tabla 15: Asignación del código de fractura del ensayo a tracción.

Como se aprecia en la gráfica tensión-deformación de todos los grupos de probetas en todas ellas se produce fractura frágil. Esto nos indica que en el momento en que aparece una grieta interna en la probeta este material rompe si la carga sigue aumentando. Esto puede ser un peligro si se quiere emplear

este material para aplicaciones en los que tenga que soportar esfuerzos de fatiga, pues una vez que la grieta aparezca la resistencia de la probeta no va a aumentar debido a efectos de deformación ni va a tener una zona de fluencia que permita aumentar la deformación hasta que finalmente se produzca el fallo.

La deformación máxima que soportan las probetas, en líneas generales, es de alrededor del 3%, valor que es similar a la deformación máxima que soportan materiales como el ABS o PLA.

Resumiendo, las probetas formadas por una matriz de onyx reforzadas con fibra de vidrio trabajan solamente en régimen elástico, induciendo una fractura frágil en el momento en el que aparece una fractura interna y ofreciendo deformaciones máximas equivalentes a las que ofrecen plásticos más comunes.

Finalmente adjunto varias imágenes de las formas de fracturas más comunes con sus correspondientes códigos.

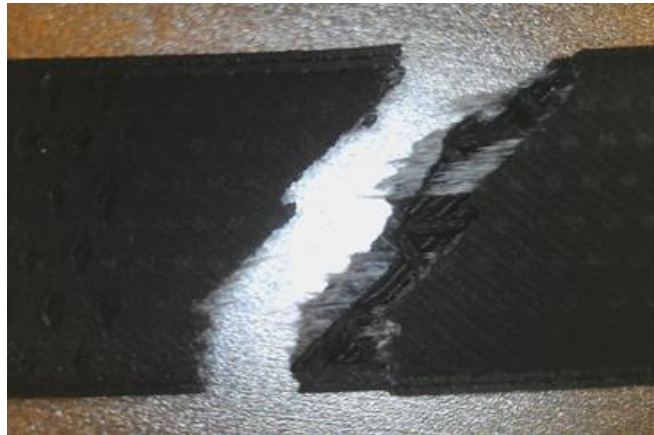


Ilustración 103: Rotura AGM.

A la izquierda de la ilustración 10 se puede apreciar el desgarro que sufre la fibra de vidrio, presentando un plano de fractura a 45°



Ilustración 104: Rotura AGM1.

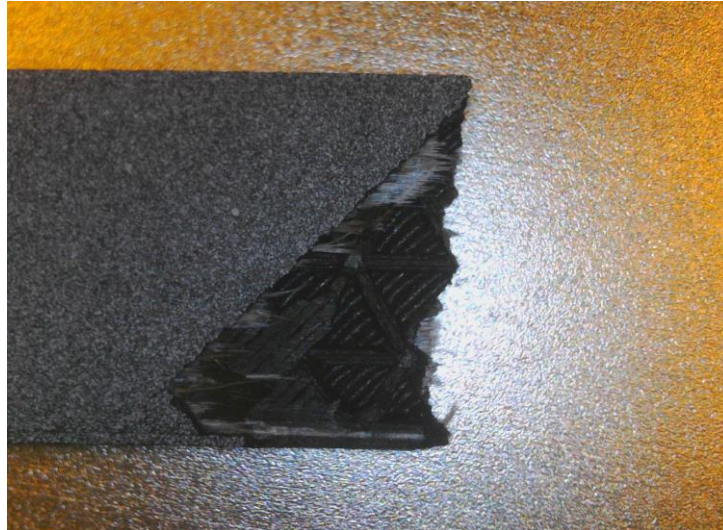


Ilustración 105: Rotura AGM2.



Ilustración 106: Rotura SGM.

En el caso de la fractura de la ilustración 106 se puede ver que no presenta ningún patrón de rotura, sino que la matriz de onyx ha quebrado por diferentes puntos y que la fibra de vidrio se ha desgarrado, lo que es común en todos los casos de fractura.

→ ENSAYO A CORTANTE:

En estos ensayos no se produjo ninguna fractura, todas las probetas se deformaron hasta un punto máximo y era entonces cuando la probeta comenzaba a resbalar entre los soportes.

En algunos casos se produjo pandeo de la probeta, esto es, una vez que se produce la deformación de la probeta, ésta se recoloca y entonces aparecen esfuerzos de flexión que llevan al pandeo.



Ilustración 107: Probeta de ensayo a cortante deformada por la pestaña.

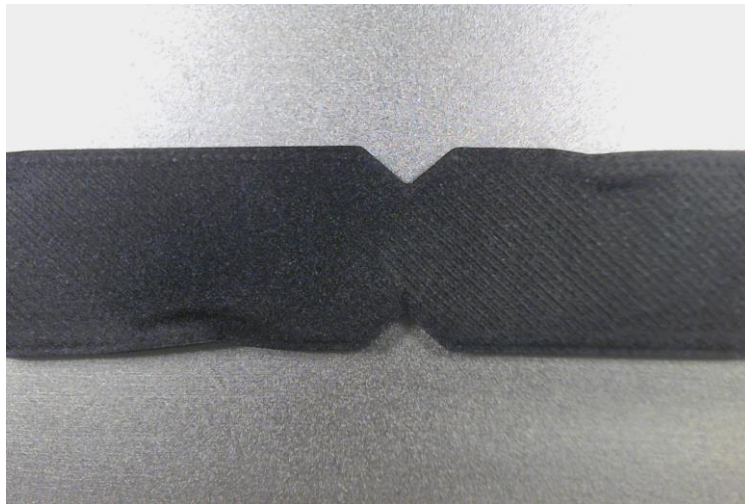


Ilustración 108: Probeta de ensayo a cortante deformada.

Un fallo que se debe tener en cuenta en estas probetas fue la separación que se produjo de las capas en la zona de agarre entre la probeta y la mordaza. Ambas mordazas están formadas por una garra y por una cuña que ejerce presión sobre la probeta para que permanezca inmóvil. Cuando la mordaza superior empieza a desplazarse verticalmente esta cuña presiona sobre el ancho de la probeta, provocando que las capas se separen.

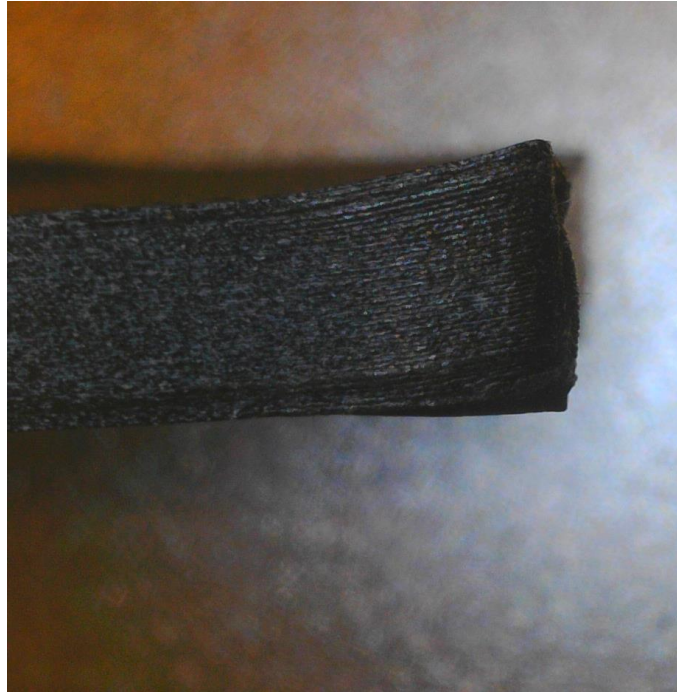


Ilustración 109: Separación de las capas en la zona de agarre.

10. CONCLUSIONES:

Sin hacer mención a los resultados obtenidos, se pueden destacar varios aspectos como conclusiones más interesantes de este estudio.

En primer lugar se puede destacar el potencial que presenta la impresión 3D mediante la técnica FFF como técnica innovadora de fabricación. No solo nos permite fabricar rápido, a bajo coste y geometrías complejas, sino que ofrece un gran catálogo de materiales cada vez más resistentes para piezas que desempeñan funciones exigentes en la industria.

En particular son destacables las aplicaciones que presenta en la industria el material onyx, ya sea en crudo como reforzado con fibra de vidrio o kevlar, del cual se pueden fabricar herramientas.

También se aprecia la utilidad y las grandes ventajas que nos ofrece la herramienta de correlación digital de imágenes. Una herramienta que nos permite tomar mediciones de deformaciones, desplazamientos para caracterizaciones mecánicas totales de materiales o incluso ensamblajes ofrece una gran ventaja en el estudio de nuevos materiales y de nuevas técnicas de fabricación, por lo que se puede decir que las nuevas técnicas de fabricación van de la mano con la herramienta DIC.

En segundo lugar cabe mencionar que se han cumplido los objetivos iniciales de este TFG, entre los cuales estaban: realización de programas experimentales, explotar la técnica de impresión 3D y estudio el estudio de materiales tan comunes como la fibra de carbono y de vidrio.

Muchos de estos objetivos se han podido cumplir gracias a la realización de este TFG y que son temas tan interesantes y modernos que merece la pena estudiar a fondo, pues al fin y al cabo son las técnicas que se emplean en la industria cada día con más frecuencia.

Como conclusiones generales de los ensayos realizados es importante destacar que en el ensayo a tracción de este material no se presenta zona plástica, sino que solamente está presente la zona elástica y del cual se alcanzan tasa de deformación similares a las de otros polímeros. Esto rinde cuenta de que sin duda el material onyx es un material innovador ya que presenta valores típicos de otros polímeros alcanzando solamente régimen elástico y con tensiones últimas mayores de las que cabe esperar con polímeros más extendidos en la impresión 3D.

Del ensayo a cortante cabe destacar el que ninguna probeta rompiera, lo que indica que la fibra de carbono con el nylon forman una matriz elástica y que la fibra de vidrio en este tipo de ensayo no tiene la presencia, obviamente, que la que tiene en el ensayo a tracción.

De los resultados generales de este estudio se puede apreciar por qué este material tiene tanta proyección en la industria, ya que ofrece acabados superficiales muy buenos, con poco efecto escalón, propiedades mecánicas muy buenas que le permiten suplir materiales como el aluminio, con un coste mucho menor.

Como conclusiones personales puedo destacar sobre todo el estudio de la impresión 3D, que al principio de este estudio era una técnica desconocida y de la que ahora puedo ver la gran cantidad de ventajas que ofrece y el mundo que hay detrás de las técnicas de impresión en 3D, no solamente la técnica FFF. Acentuar también el uso de la herramienta DIC de la cual a lo largo del estudio del grado no había tocado nada y es, sin embargo, una herramienta muy versátil y con mucha proyección en el ámbito de la investigación de materiales.

11. TRABAJOS FUTUROS:

Para futuros trabajos puede ser interesante el estudio del efecto que tendría la modificación de los patrones de fibra. En este proyecto se ha estudiado la influencia del patrón concéntrico e isotrópico por separado, en estudios futuros se podría estudiar la influencia que tiene el combinar ambos patrones en una misma pieza, pues los patrones concéntrico e isotrópico ofrecen propiedades diferentes.

Como se comentó en el apartado 5 de este ensayo, las piezas impresas en 3D ofrecen propiedades iguales en el plano de impresión, por lo que es interesante presentar un estudio en el que se modifique la dirección de impresión, colocando la probeta en varias posiciones y estudiar su efecto.

Para realizar caracterizaciones completas de este material se pueden realizar ensayos de dureza para conocer la resistencia del onyx a ser penetrado y ensayos de fractura para conocer el comportamiento del onyx bajo cargas cíclicas.

12. Bibliografía

Alexander Paolini, S. K. (2019). Additive manufacturing in construction: a review on processes, applications, and digital planning methods. *Elsevier*, 13.

Andrew N. Dickson, J. N. (2016). Fabrication of continuous carbon, glass and kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing. *Elsevier*, 7.

Andrew N. Dickson, K.-A. R. (2018). Additive manufacturing of woven carbon fibre polymer composites. *Elsevier*, 7.

ASTM International. (1998). *Standard Test Method for Shear Properties Of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*. West Conshohocken, PA, United States.

ASTM International. (2000). *Standard Test Method for Tensile Properties Of Polymer Matrix Composite Materials*. West Conshohocken, PA, United States.

Benkler, Y. (2012). *El Pingüino y el Leviatán: Por qué la cooperación es nuestra arma más valiosa para mejorar el bienestar de la sociedad*.

Chawla, K. K. (2011). *Composite Materials, Science and Engineering, Third Edition*. Birmingham, USA.

daily., I. 3. (s.f.). *Llega un nuevo filamento de policarbonato*.

Electronics, D. (s.f.). Recuperado de: <https://www.dynamoelectronics.com/tienda/filamento-abs-azul-175mm-z-abs/>.

Fuda Ning, W. C. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Elsevier*, 10.

García Zapata, J. M. (2019). *Caracterización mecánica avanzada de nuevos materiales para impresión 3D*. Jaén.

<http://www.plastico.com/temas/La-impresion-3D-se-abre-paso-en-la-industria-mexicana+118590?pagina=2>, R. d. (2017). La impresión 3D se abre paso en la industria mexicana. *Tecnología del plástico*.

Juan Naranjo-Lozada, H. A.-G.-C.-G. (2019). Tensile properties and failure behaviour of chopped and continuous carbon fiber composites produced by additive manufacturing. *Elsevier*, 15.

Universitat Ramon Llull (s.f.). Recuperado de <https://www.iqs.edu/sites/default/files/pictures/dic4.png>

Markforged. (s.f.). <https://support.markforged.com/portal/s/>.

Natives, 3. (s.f.). Guía completa: plásticos en la impresión 3D.

plástico, T. d. (s.f.). La impresión 3D se abre paso en la industria mexicana.

Society, I. D. (2018). *A good practices guide for Digital Image Correlation*.

Solutions, C. (s.f.). <https://www.correlatedsolutions.com/vic-2d/>.

Torres Expósito, A. (2018). *Caracterización mecánica de nuevos materiales para impresión 3D*. Jaén.

Velasco, J. G. (2009). *Energías renovables*. Editorial Reverte.

ANEXOS

ANEXO I: CARGA DE BOBINAS EN MARKFORGED ONYX SERIES.

En este apartado se darán las instrucciones básicas para la carga y descarga de las bobinas, tanto de plástico (Onyx) como de fibra de vidrio (refuerzo) para la impresora 'Markforged Onyx Series'.

En primer lugar nos centraremos en la carga plástico, Onyx en adelante. Éste es un material muy sensible a la humedad por lo que debemos evitar a toda costa que la bobina de Onyx esté en contacto con la atmósfera por demasiado tiempo, según el fabricante, 15 minutos con la bobina expuesta al ambiente son suficientes para que el material pierda sus propiedades.

La bobina viene embalada en un envoltorio completamente sellado.



Ilustración 110: Envoltorio de la bobina de onyx.

Una vez abierto el envoltorio tendremos que instalar la bobina en la caja hermética proporcionada por el fabricante. La caja está compuesta por:

- Dos cierres herméticos.
- Salida para el filamento.
- Tapón hermético.
- Husillo.
- Bolsa desecante.



Ilustración 111: Caja hermética para onyx.

El husillo está formado por dos partes que se ensamblan gracias a un imán. Introduciremos una parte del husillo en el centro de la bobina y cerraremos el husillo. Seguidamente situaremos el husillo con la bobina en los apoyos instalados en el interior de la caja hermética.

Posteriormente quitaremos el tapón hermético rojo situado en un lateral de la caja y, por fuera de la caja, conectaremos el tubo que conecta el exterior de la impresora con el extrusor en el interior de ella.

Una vez situado el tubo por fuera de la caja, localizaremos en la bobina el inicio del filamento y, con cuidado de no destensar la bobina (podría quedar atascado el filamento en el interior de la caja) introduciremos el filamento por el interior del tubo que hemos conectado anteriormente a la salida sellada de la caja, de tal forma que el filamento de Onyx fluya por el interior del tubo.

Nos tendremos que ayudar girando la bobina hasta que veamos que el extremo del filamento ha llegado al extrusor de la impresora.

Nos centramos ahora en el monitor táctil de la impresora, donde desde el menú de inicio indicaremos a la impresora que deseamos cargar material.

Pulsamos el icono de menú.

Seleccionamos la pestaña 'Materials', aquí encontraremos el módulo de carga de Onyx.

Elegimos 'Load Plastic' y a continuación 'Quick Load'.

A continuación se empezarán a calentar los extrusores como indica el fabricante.

Una vez que se han calentado los extrusores, el motor de alimentación que se encuentra en el extrusor empezará a girar y arrastrará el filamento hacia la boquilla de plástico ya calentada.

NOTA: una vez que el filamento de Onyx ha llegado al extrusor éste debería quedar totalmente introducido en él, lo que es posible que no suceda, por lo que tendremos que retirar el tubo del extrusor e introducir manualmente el extremo del filamento en el extrusor hasta que fluya gracias al motor. Instalaremos posteriormente el tubo otra vez en el extrusor para aislar al filamento de la atmósfera.

Debemos esperar hasta que el Onyx fluya a través de la boquilla y pulsar 'Stop' cuando esto suceda en la pantalla de la impresora. El motor de alimentación se detendrá y dejará de fluir plástico lo que nos indica que el material Onyx ha quedado instalado y preparado para ser usado.

A continuación realizaremos la carga de la fibra de refuerzo (fibra de vidrio en este caso).

El proceso es bastante similar a la carga de plástico exceptuando que las boquillas no se calentarán en este proceso.

En el caso de la fibra de refuerzo, éstas se instalan en el husillo interior izquierdo de la impresora. El husillo derecho es de almacenaje para otras bobinas.

Del husillo izquierdo retiraremos el extremo magnético e introduciremos la bobina, seguidamente conectaremos la parte magnética de forma que la bobina quede situada en el interior de él.

De forma análoga, en el menú principal seleccionamos 'Materials', 'Fiber Load' y 'Quick Load'.

El motor de alimentación destinado a la fibra comenzará a girar, es ahora cuando introduciremos el extremo de la fibra de refuerzo por el tubo bowden similar (aunque de menor diámetro) al del Onyx. El tubo bowden se encuentra situado encima de la bobina de refuerzo. Con cuidado de que no se destense la bobina iremos introduciendo la fibra hasta que sea el motor el que haga que la fibra fluya.

Cuando la fibra fluya a través de la boquilla pulsaremos 'Cut' en la pantalla, se accionará el cortador, eliminando el extremo de fibra que ya ha salido del extrusor.

Seleccionamos 'Done' y ya tenemos la bobina de fibra lista para ser usada.

ANEXO II: NIVELACIÓN DE LA BANDEJA DE IMPRESIÓN: MARKFORGED ONYX SERIES

- Es recomendable realizar el calibrado de la bandeja de impresión con frecuencia, pues los tornillos de sujeción inferiores de la bandeja pueden desenroscarse, y una pequeña variación en la altura de la cama puede provocar roces entre el extrusor y la cama y puede dañar la pieza.
- Cuando ejecutemos esta función no debemos apoyar las manos ni realizar ningún tipo de presión en el marco o en la bandeja de la impresora para realizar un nivelado lo más exacto posible
- Una vez que hayamos terminado la función 'SHIM BED LEVEL', es recomendable ejecutar el comando 'BED LEVEL UTILITY' para terminar de comprobar el nivelado de la bandeja.

Para esta acción necesitaremos:

- A. Dos cuñas de latón proporcionadas por el fabricante: 'PLASTIC SHIM', con la que regularemos la altura del extrusor de onyx, y 'FIBER SHIM', con la que ajustaremos la altura del extrusor de la fibra de refuerzo.
- B. Llave hexagonal de 2.5mm.
- C. Espátula.

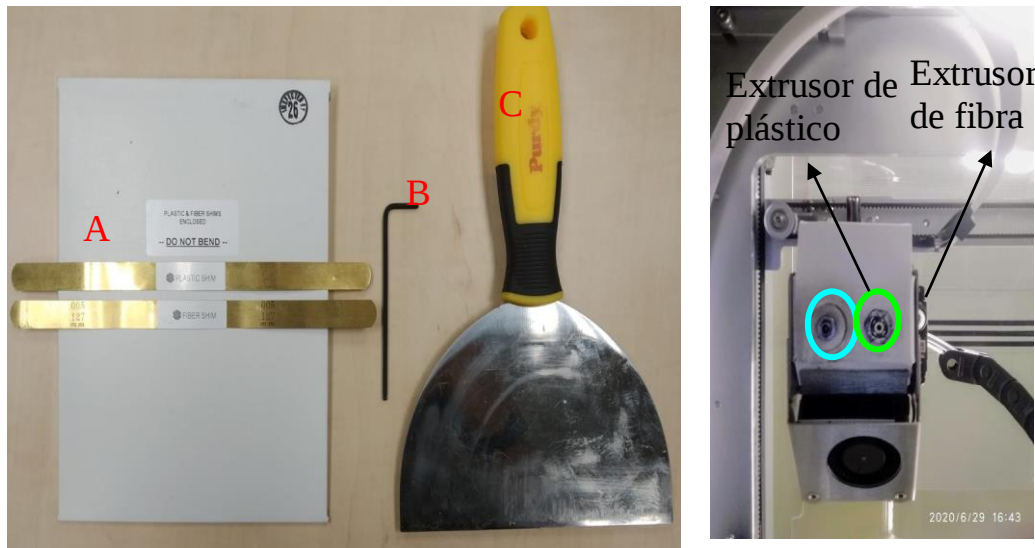


Ilustración 112: A la izquierda se muestran los materiales necesarios, a la derecha se muestra una vista inferior del sistema de extrusión.

A continuación se especifica paso a paso el proceso de nivelado:

1. Encendemos la impresora y desplegamos el menú inicial:



Ilustración 113: Menú inicial de la pantalla de la impresora.

2. En segundo lugar, seleccionamos 'Bed Level', y 'Shim Bed Level':

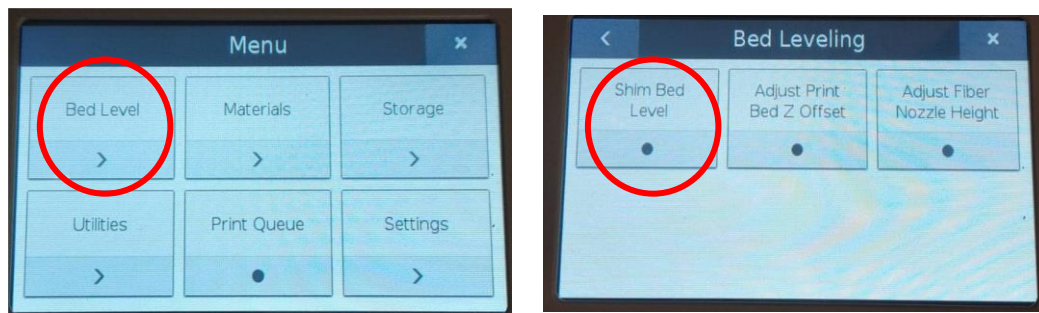


Ilustración 114: Paso 2 detallado.

3. Deberemos desenroscar los tornillos de sujeción de la bandeja, que se encuentran en la parte inferior de las garras que la sujetan, hasta que la bandeja se encuentre en la posición más baja. Los tornillos se encuentran situados: dos en la parte frontal de la bandeja (en la esquina izquierda y derecha), y un tercer tornillo centrado en la parte trasera de la bandeja.

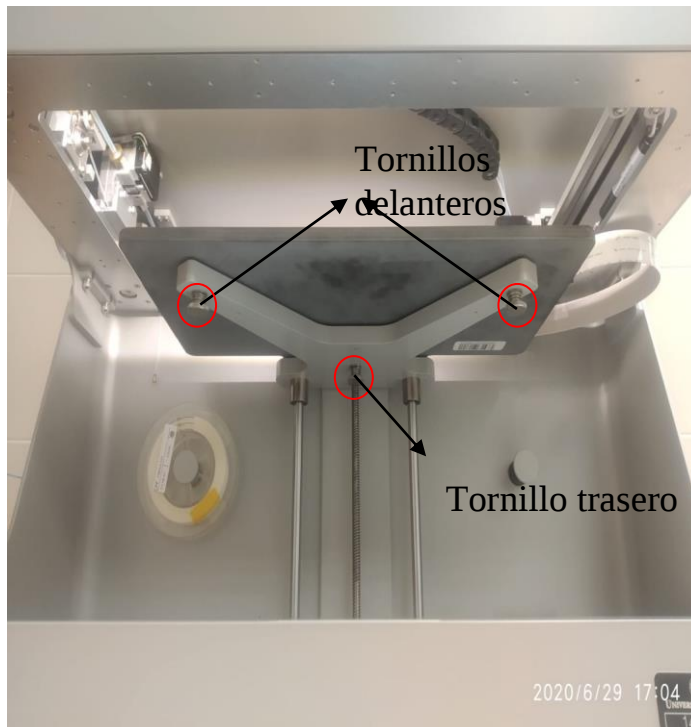


Ilustración 115: Vista inferior de la bandeja de impresión.

En primer lugar, el extrusor se desplazará hacia la esquina derecha, justo encima del tornillo de la base, con ayuda de la cuña 'PLASTIC SHIM' la deslizaremos entre la cama y el extrusor de onyx e iremos ajustando el tornillo hasta que notemos cierta resistencia entre la cuña y el extrusor:

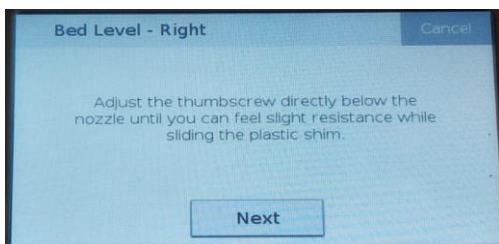


Ilustración 116: A la izquierda se muestra la acción en la pantalla de la impresora y a la derecha se muestra el cabezal de impresión en la posición indicada.



Ilustración 117: Colocación de la cuña bajo el extrusor de plástico.

Una vez que tengamos el tornillo derecho ajustado, pulsaremos 'NEXT' en la pantalla de la impresora, y repetiremos este proceso para el tornillo izquierdo y trasero.

Finalmente, con estos tres tornillos ajustados tendremos la opción de repetir este proceso ('RETRY') o podremos pasar directamente a ajustar el extrusor de la fibra ('NEXT').

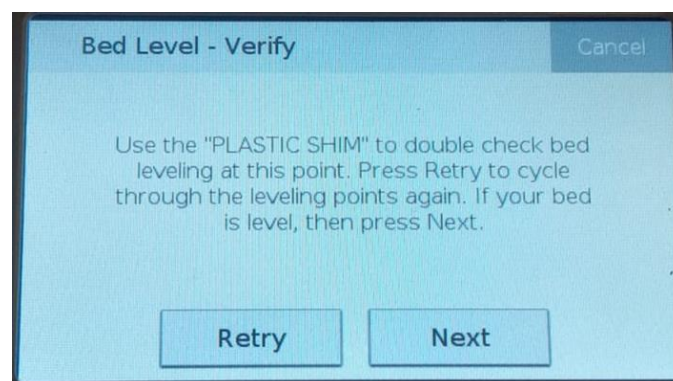


Ilustración 118: Siguiendo acción en el proceso de nivelado.

4. El proceso para ajustar el extrusor de la fibra es bastante similar al del extrusor de plástico. Usaremos para este caso la cuña 'FIBER SHIM' y la llave hexagonal de 2.5 mm.

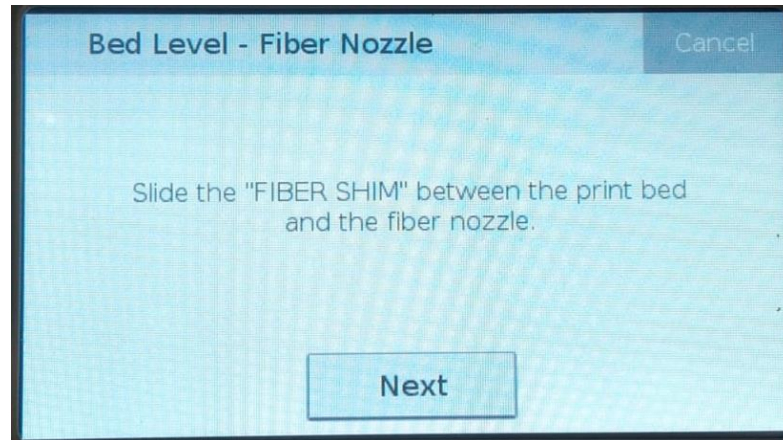


Ilustración 119: Siguiente acción en el proceso de nivelado.

El extrusor se desplazará automáticamente hasta la esquina derecha. Cuando ajustemos el extrusor de la fibra sólo lo haremos una vez, en la esquina derecha, a diferencia del extrusor de plástico, que lo calibramos en 3 puntos.

Deslizaremos la cuña 'FIBER SHIM' entre el extrusor de fibra y la cama, ajustaremos la altura del extrusor desde el tornillo resaltado en amarillo en la foto inferior, hasta que notemos cierta resistencia.

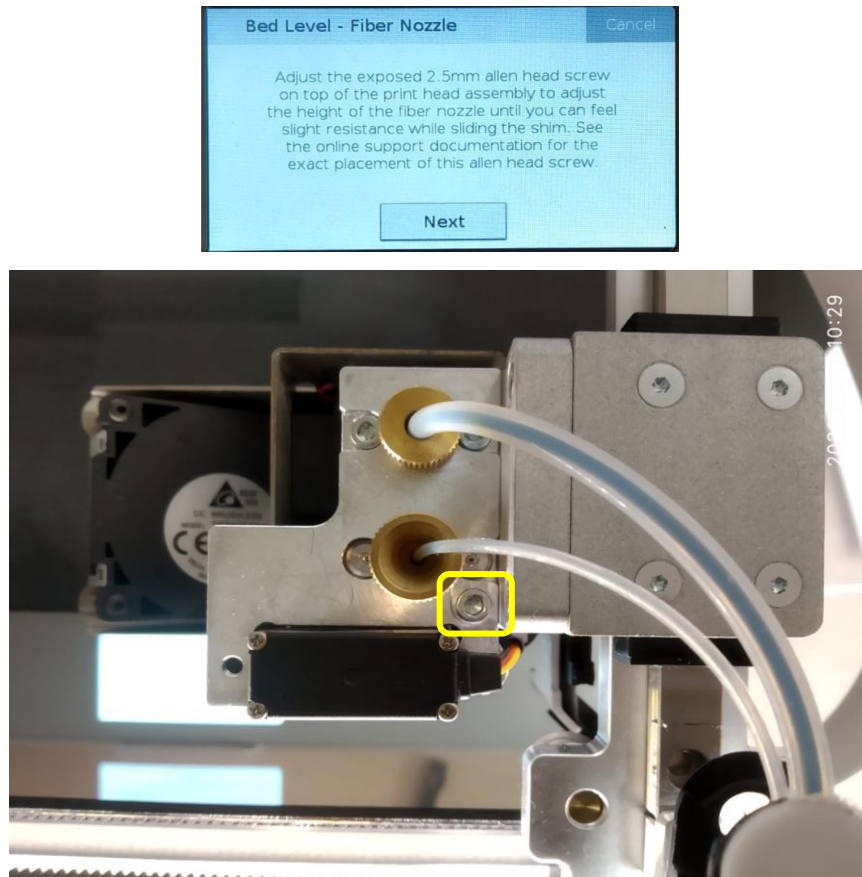


Ilustración 120: En la imagen superior se muestra la descripción de la acción y en la imagen inferior se resalta en amarillo el tornillo que debemos tocar.

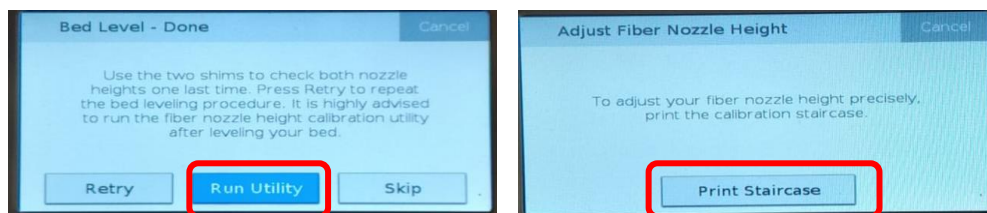


Ilustración 121: Últimas acciones del proceso.

5. Una vez calibrados los dos extrusores, el fabricante nos recomienda imprimir una carcasa para comprobar finalmente si durante la impresión el nivelado de la cama y del extrusor de la fibra es el adecuado.

→ Cuando pulsemos 'PRINT STAIRCASE' se calentarán ambos extrusores, es importante que antes de que empiece a imprimir limpiemos bien con el cepillo ambos extrusores, para no provocar rozamientos innecesarios entre la carcasa y el extrusor.

6. Una vez finalizada la impresión obtendremos lo siguiente: una carcasa que está dividida en 5 niveles (secciones): -2, -1, 0, 1 y 2, teniendo cada nivel una altura diferente.



Ilustración 122: Carcasa impresa sobre la bandeja de impresión.

A continuación, el extrusor se desplazará por encima de la carcasa, dependiendo del nivel en el que deje marca el extrusor, habremos realizado un buen calibrado o no.

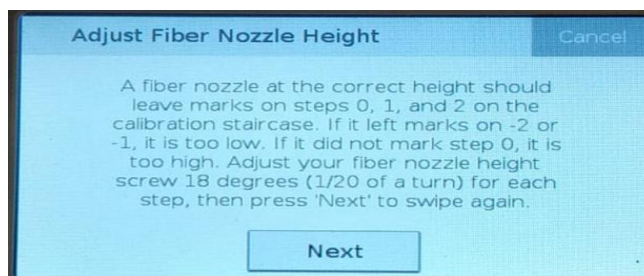


Ilustración 123: Descripción que se muestra en la pantalla de un buen calibrado.

El fabricante nos dice, que si el extrusor deja marca en los niveles 0, 1 ó 2, entonces el extrusor de fibra está bien calibrado. Si deja marca en los niveles -1 ó -2, significa que el extrusor de la fibra está más bajo de lo normal, si por el contrario, no hay marca en el nivel 0, el extrusor está demasiado alto.

Este proceso de marcado se repetirá 3 veces, aunque podremos repetirlo íntegramente al final de la función 'SHIM BED LEVEL'.

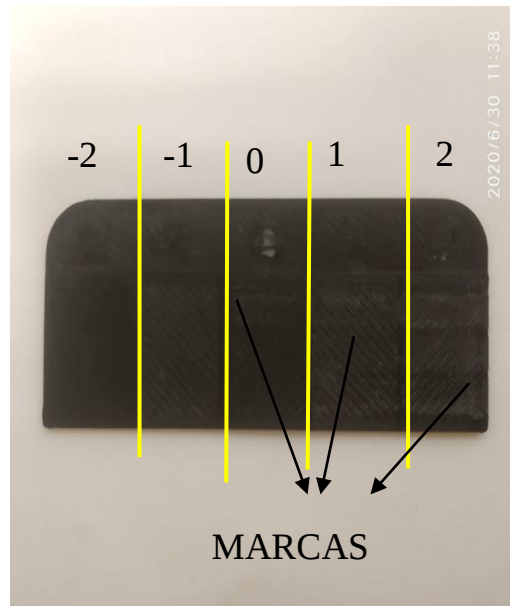


Ilustración 124: Niveles que conforman la carcasa y las marcas que debe dejar.

ANEXO III: TEST DE PILARES DE ONYX: MARKFORGED ONYX SERIES

- Uno de los diagnósticos más completos que Markforged implementa en su serie de escritorio es el 'ONYX TEST PILLARS', mediante el cual, se imprime una carcasa que consta de tres pilares rectangulares, tres pilares circulares, y un pilar rectangular de mayor tamaño. Mediante este test podemos comprobar: el estado de la bobina de onyx (tiene excesiva humedad o no), el estado del extrusor de onyx, la adherencia del material sobre la cama o problemas de extrusión.
- En la página web del fabricante se muestra una guía de comparación para el estado final de los pilares.

Para ejecutar esta rutina, desplegaremos el menú en la pantalla de inicio y pulsaremos la sección 'UTILITIES':

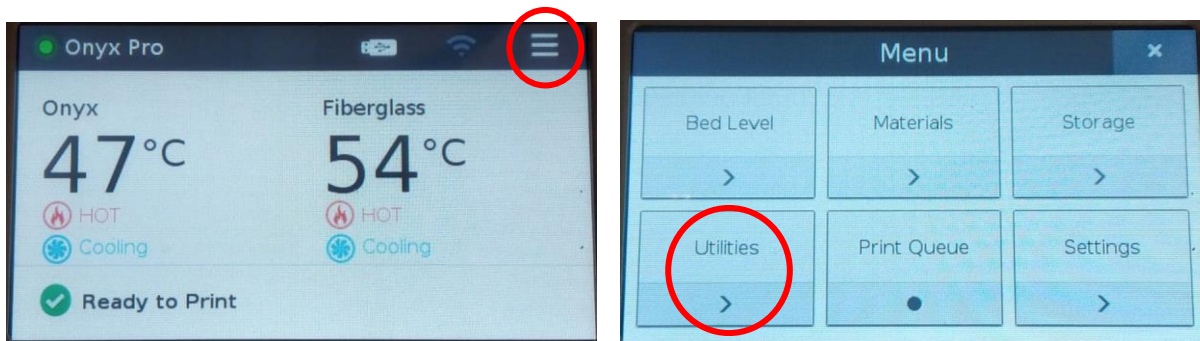


Ilustración 125: Pasos iniciales.

A continuación, seleccionaremos 'TEST PRINTS' y 'ONYX PILLARS TEST

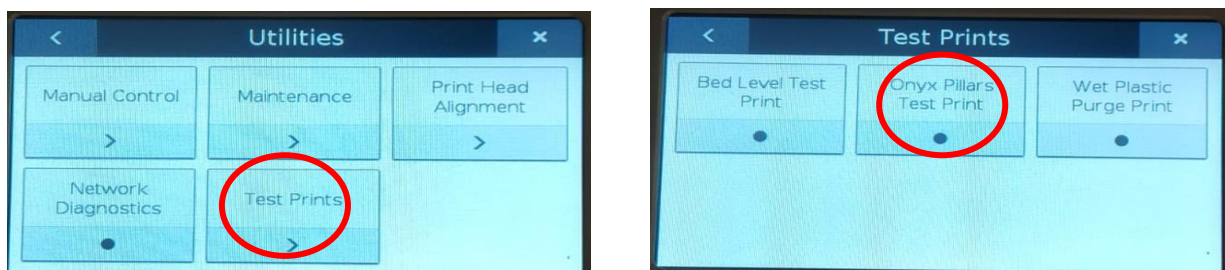


Ilustración 126: Siguientes pasos.

PRINT':

Finalmente, se adjunta una imagen de cómo resultó el test hecho en el laboratorio:

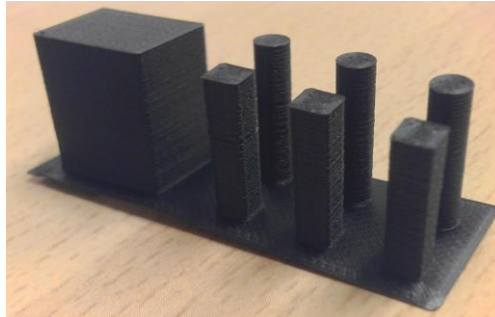


Ilustración 127: Pilares impresos en el laboratorio.

En la página web de Markforged podemos encontrar una guía de fotos que nos identifica varios problemas dependiendo del estado final de los pilares.

Si la bobina ha absorbido humedad, los pilares quedarían de tal forma:

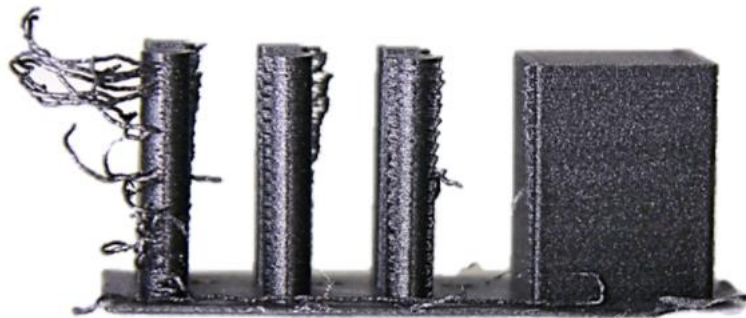


Ilustración 128: Pilares impresos con una bobina húmeda.

Si el extrusor presenta problemas de subextrusión:

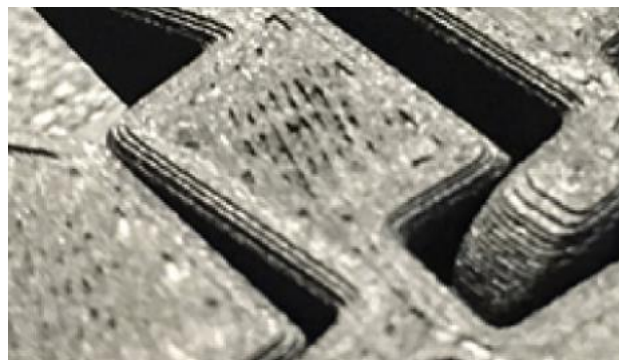


Ilustración 129: Problemas de subextrusión.

Si los pilares tienen cavidades puede significar que es hora de cambiar el extrusor:

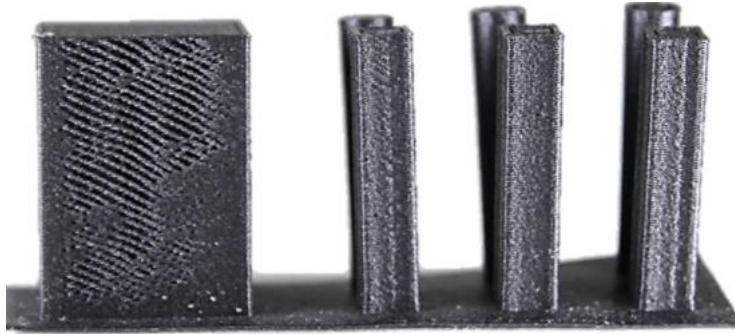


Ilustración 130: Pilares propios de un extrusor en mal estado.

Si los pilares no tienen una geometría precisa significa que la tensión del cinturón de la guía xy es baja:

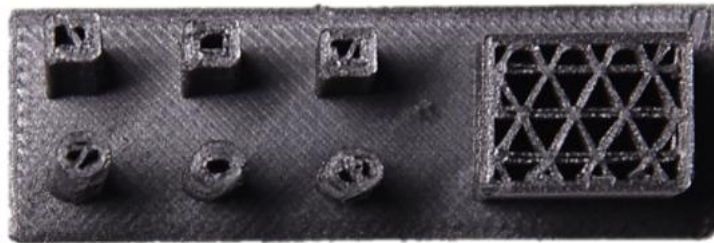


Ilustración 131: Pilares propios de una correa desajustada.

ANEXO IV: MANUAL VIC-2D 6:

La interfaz inicial del software VIC-2D 6 contiene comandos que son familiares a otras aplicaciones.

En la parte superior encontramos los menús que incluyen las funciones más básicas, mientras que en el menú a la izquierda encontramos herramientas como la edición de imágenes (AOI Editor) y procesamiento de datos (Plot). En el centro de la pantalla encontramos el área de trabajo. En esta región se irán abriendo tantas ventanas como herramientas de análisis ejecutemos.

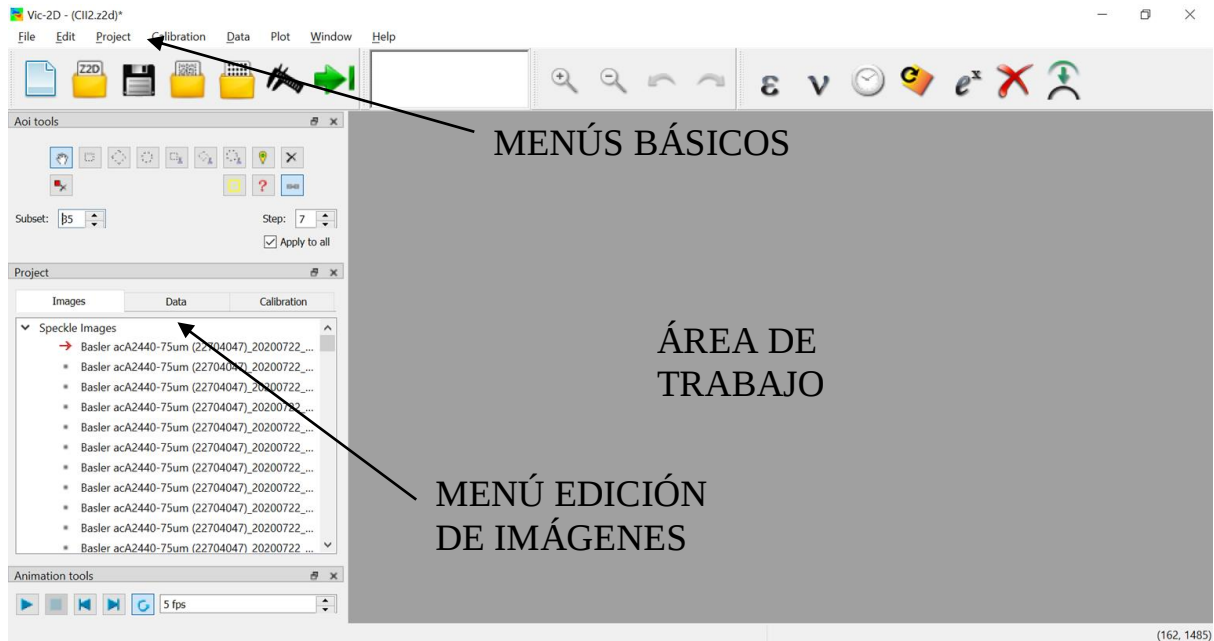


Ilustración 132: Pantalla de trabajo VIC-2D 6.

A continuación se describen las funciones más importantes de los menús que podemos encontrar en la barra superior:



Ilustración 133: Menú superior.

→ MENÚ FILE:

- New: crea un proyecto nuevo.
- Open: abre un proyecto existente.
- Open recent: nos permite seleccionar proyectos modificados recientemente.

- Save: guardar el actual archivo.
- Save as: guardar un proyecto bajo un nombre concreto.

- MENÚ EDIT:
 - Undo: deshacer la última acción en la imagen de referencia.
 - Redo: rehacer la última acción en la imagen de referencia.
 - Herramientas AOI: todas las herramientas para el procesamiento de imágenes.

- MENÚ PROJECT:
 - Speckle images: añadir imágenes moteadas a un proyecto.
 - Calibration images: añadir imágenes de referencia al proyecto.
 - Speckle image group: añadir un grupo de imágenes moteadas a un mismo proyecto.
 - Calibration image groups: añadir un grupo de imágenes de referencia a un mismo proyecto.
 - Vídeo clip: genera un archivo de vídeo de extensión *.avi.

- MENÚ CALIBRATION:
 - Calibration scale: emplea una imagen para aplicarle una escala de corrección (imagen de referencia).
 - Distortion correction: usa imágenes previamente analizadas para corregir distorsiones aleatorias.
 - Clear distortion: limpiar el mapa de distorsión.
 - More: ajustes avanzados.

- MENÚ DATA:
 - Start analysis: muestra icono de 'run analysis' para comenzar el estudio.
 - Post-Processing tools: muestra un submenú con varias opciones para el postprocesado de las imágenes.
 - Export: encontramos varias opciones para exportar los datos obtenidos con las herramientas anteriores.

- MENÚ PLOT:
 - New plot: añade una nueva ventana para extraer gráficas en el área de trabajo.
 - Inspector: submenú con varias herramientas de análisis.

A continuación se describen los pasos a la hora de realizar un ensayo en este software.

En primer lugar se muestra la pantalla de inicio al programa, antes de cargar ninguna imagen o abrir ningún proyecto.

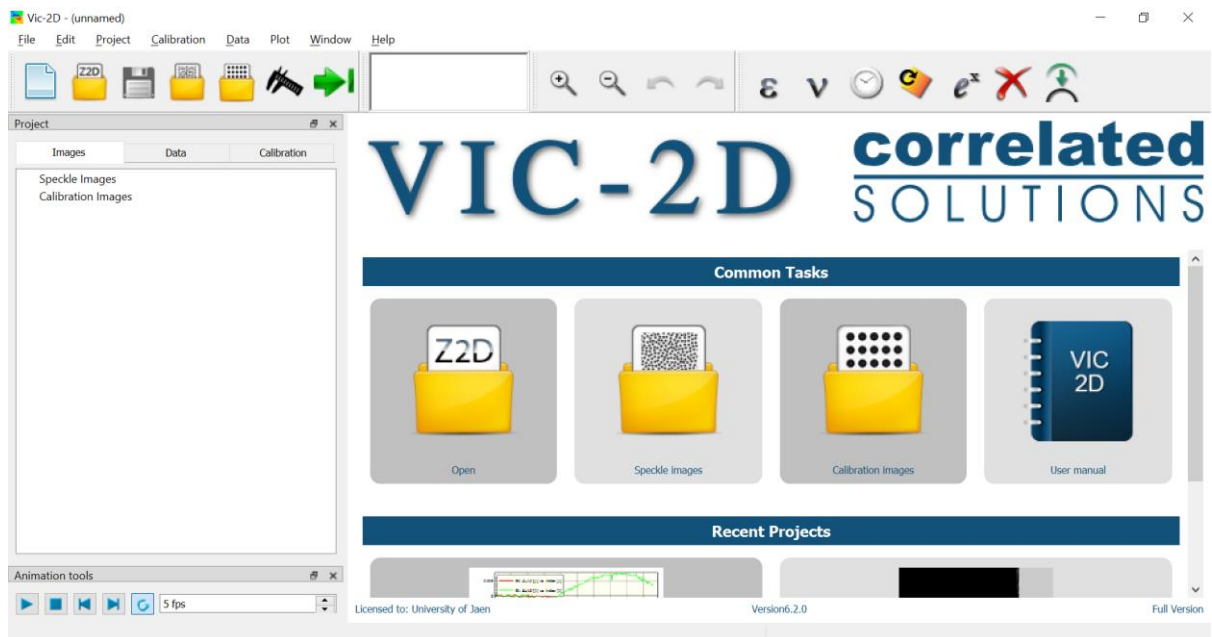


Ilustración 134: Menú inicial.

En primer lugar seleccionamos la opción '*speckle images*' donde seleccionaremos todas las imágenes que conforman nuestro estudio.

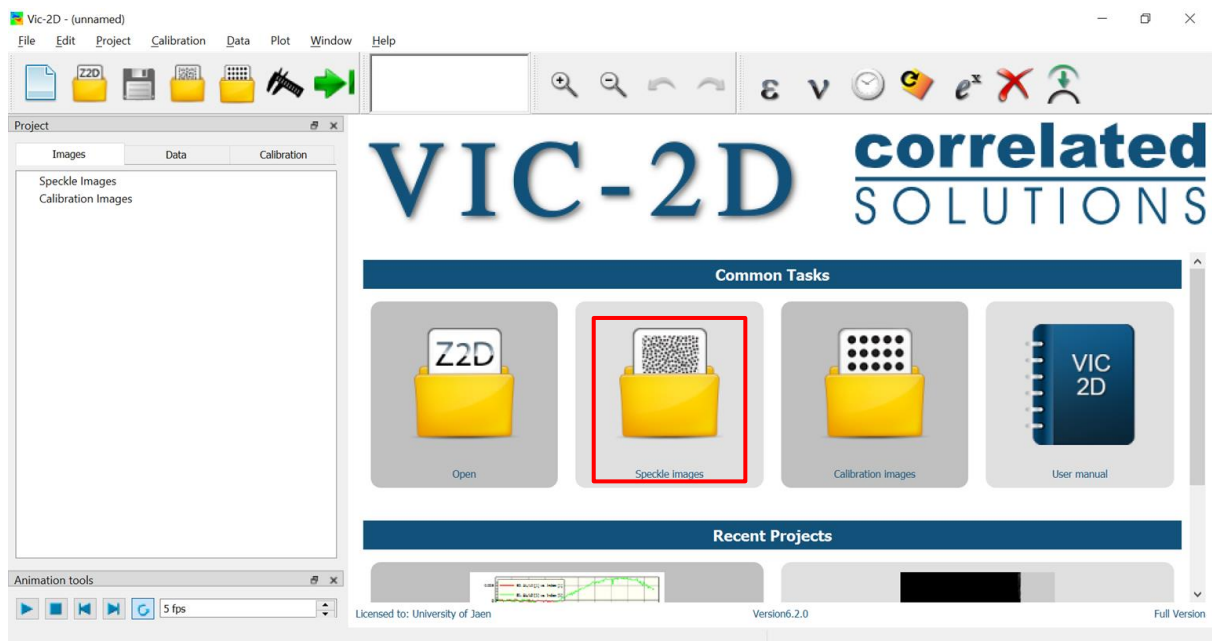


Ilustración 135: Comando Speckle Image.

A continuación se abrirá el menú '*images*' a nuestra izquierda donde encontraremos el nombre de todas las fotos que hemos cargado. Desde este menú podremos eliminar o añadir archivos.

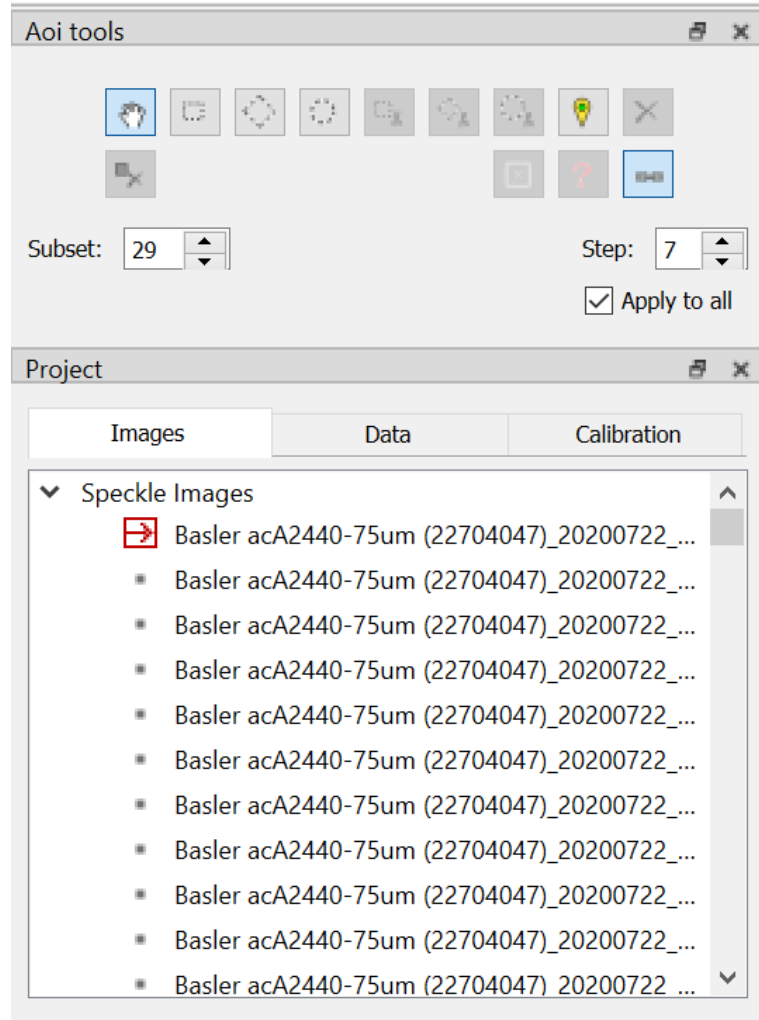


Ilustración 136: Menú edición de imágenes (AOi).

Seguidamente tendremos que calibrar las imágenes. Esto lo hacemos



seleccionando la imagen de referencia y clicando en la barra superior, e introducimos la distancia en milímetros, seleccionando con el



comando la distancia que queramos medir.

NOTA: cuanto mayor sea la distancia que introducimos en este apartado más fiables serán los resultados que obtengamos en pasos posteriores. Si la medida introducida en el software es muy pequeña éste nos dará un aviso aunque el análisis se pueda ejecutar igualmente.

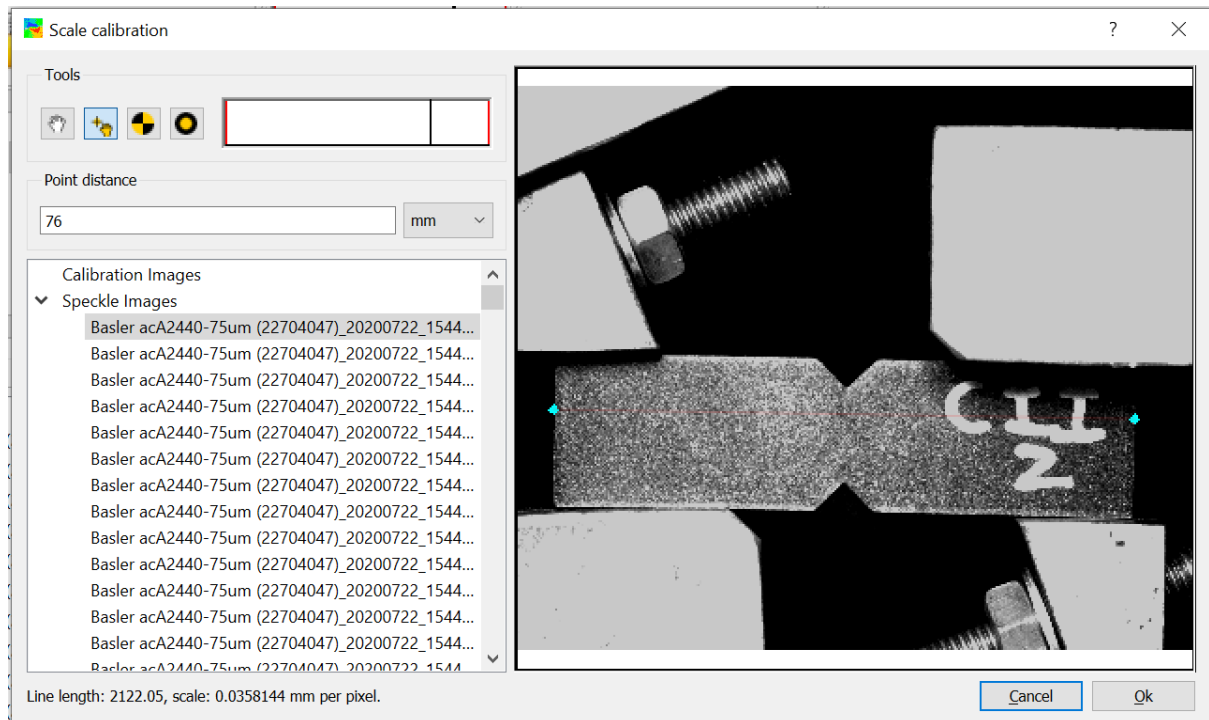


Ilustración 137: Pantalla del comando 'Calibration Scale'.

Una vez calibradas las imágenes el siguiente paso es seleccionar el área de interés.

En el menú Data, en el menú de procesamiento de imágenes, AOi, a la izquierda del área de trabajo, se abrirán varias opciones para seleccionar el área de interés, marcadas en rojo en la imagen siguiente.

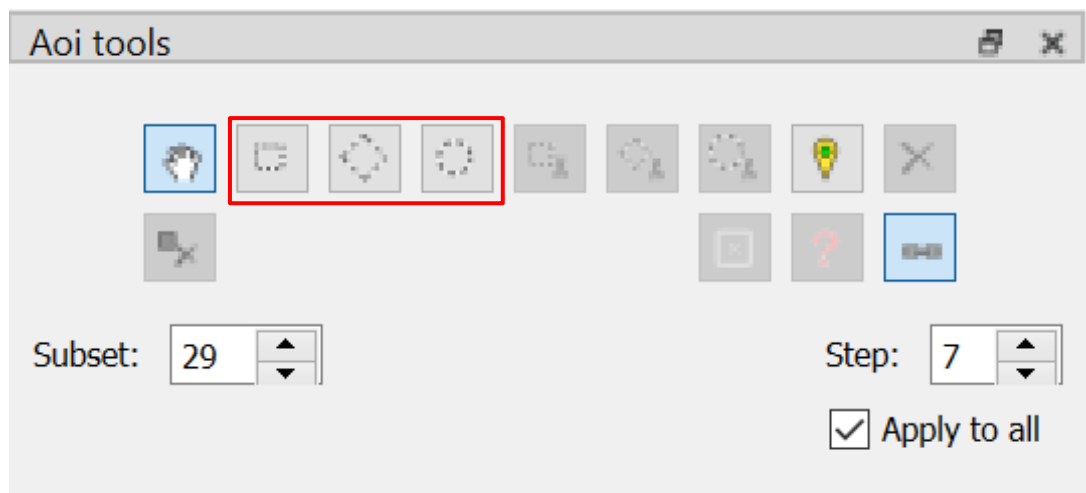


Ilustración 138: Menú de edición AOi.

En este menú también podemos determinar cuál será el punto de inicio del

análisis .



Haciendo click en el icono el software nos recomendará, según nuestra imagen, un tamaño determinado de subset, aunque éste no corresponde con el más óptimo.

Una vez hecho todo esto, la pantalla de trabajo debería quedar tal que así.

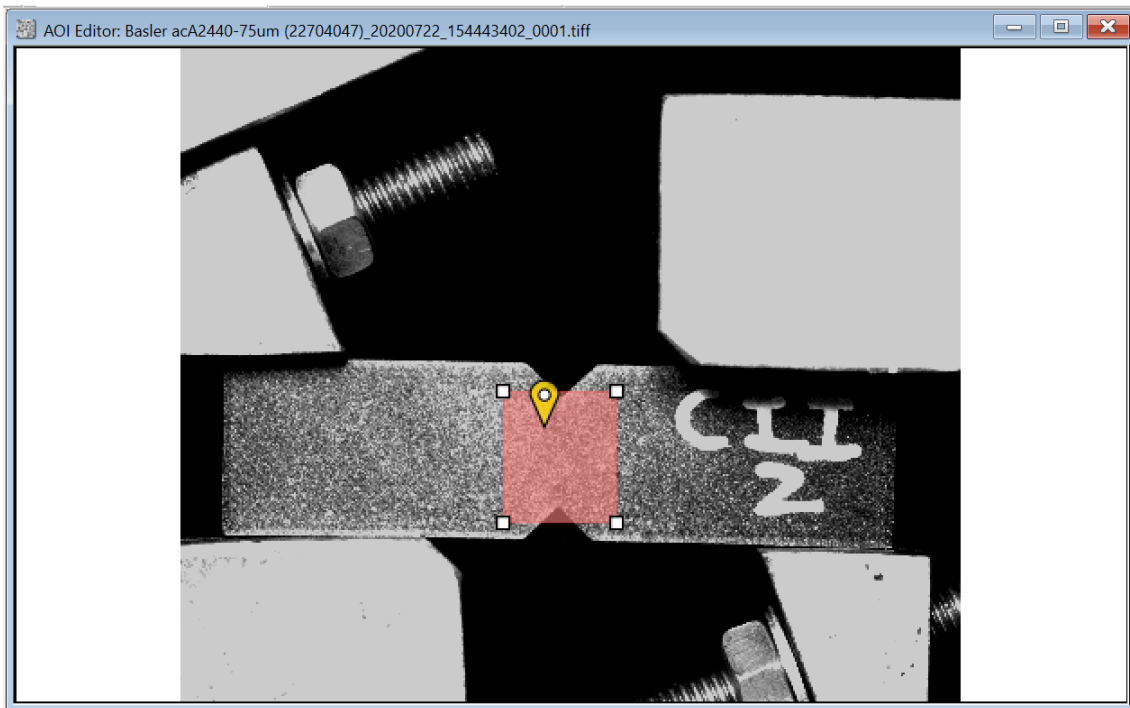


Ilustración 139: Sección de la imagen que se va a analizar en rojo.



A continuación, en la barra superior, menú Data clicamos . El software comenzará el análisis DIC y, simultáneamente, podremos ver en pantalla el progreso del análisis, donde se muestra a su vez el tiempo restante del análisis, el número del fichero que está analizando, el número de puntos que está analizando frente al número total de puntos que conforman el subset y el número de iteraciones.

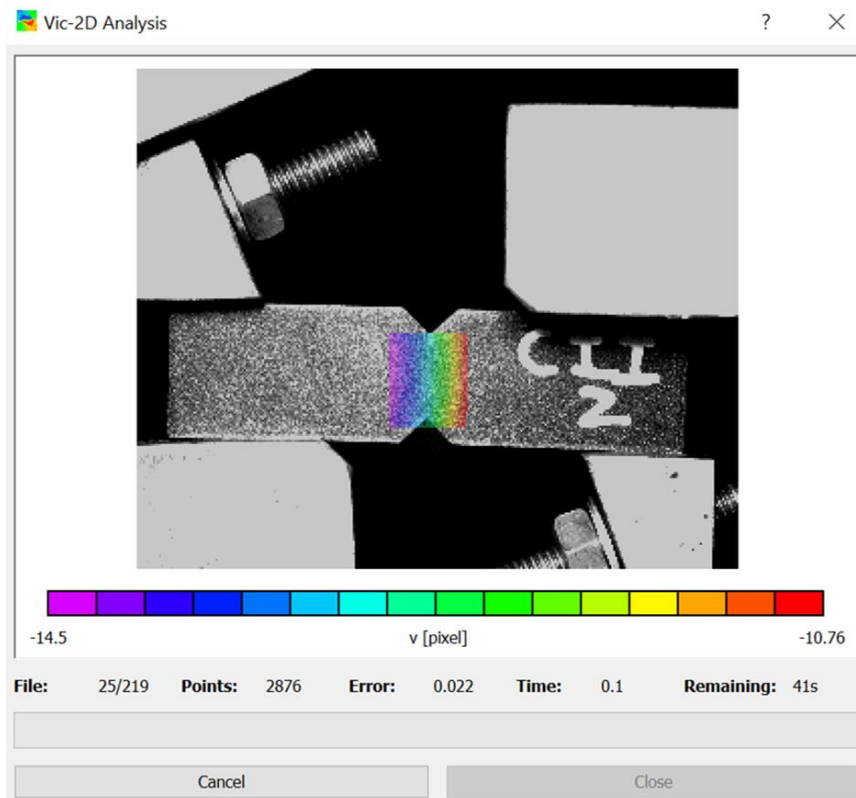


Ilustración 140: Pantalla de análisis.

Una vez finalizado el análisis en el menú Data, postprocessing tools, encontramos dos herramientas '*Smooth*' y '*Remove rigid motion*' que nos ayudarán a obtener imágenes más limpias y eliminar las imágenes que presenten desplazamientos que el software no haya leído.



Ilustración 141: Selección del comando 'Data'.

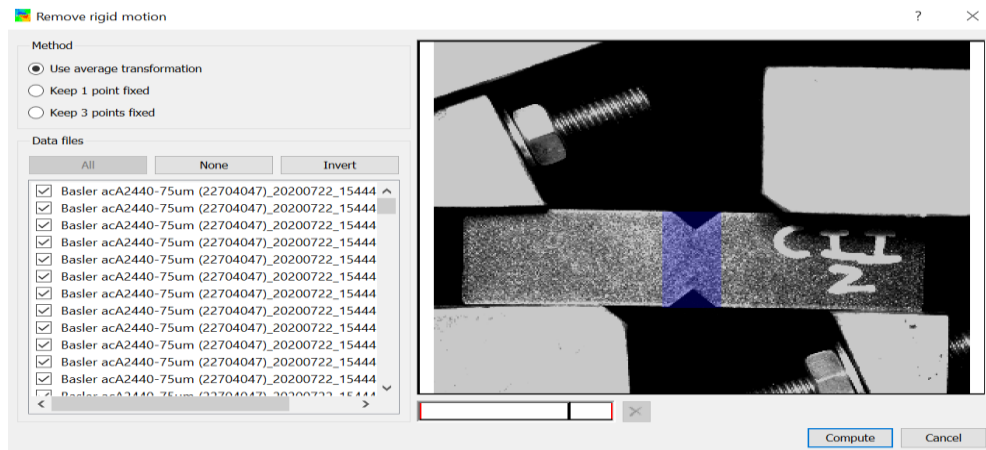


Ilustración 142: Remove Rigid Motion.

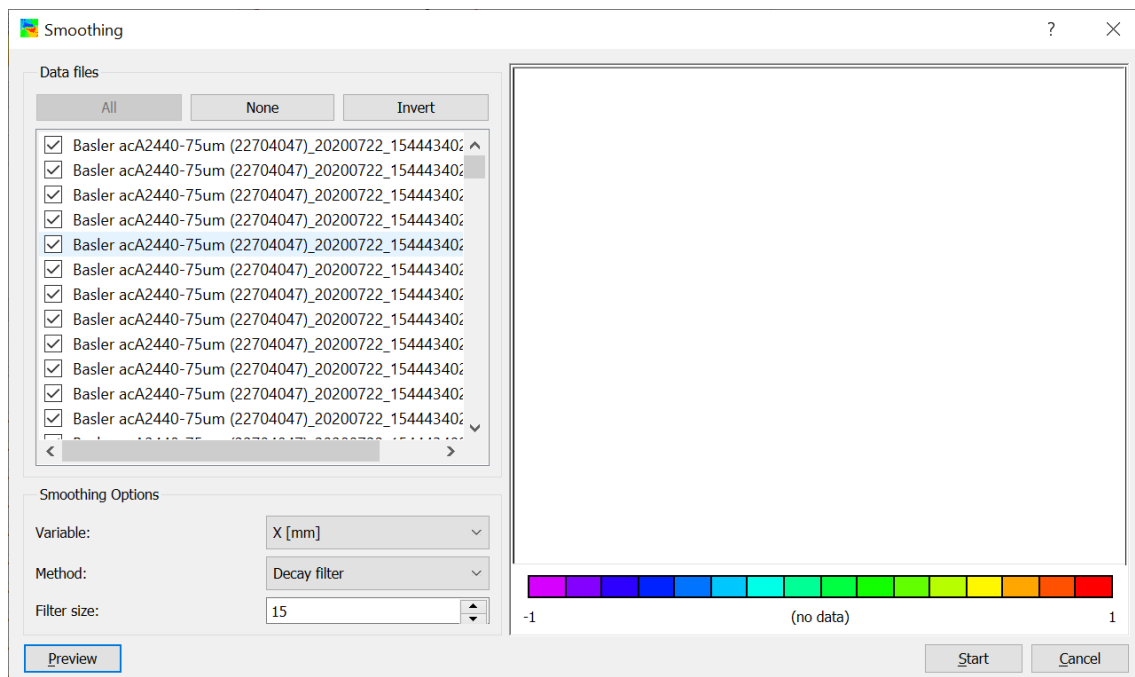


Ilustración 143: Smooth.

Para obtener los desplazamientos tenemos que incluir extensómetros, para ello clicamos *DATA* en el menú de edición de imágenes.

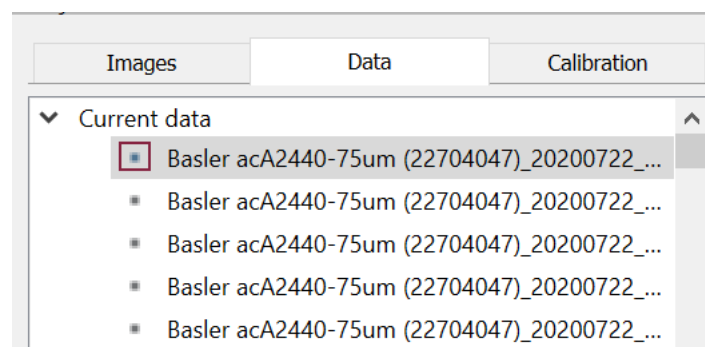


Ilustración 144: Menú 'Data' dentro de la sección AOI.



Y clicamos , posteriormente situaremos el extensómetro en la zona que deseemos estudiar las deformaciones.

NOTA: el caso que se muestra es un ensayo a cortante, por lo que se sitúan los extensómetros según indica la norma ASTM D3039.

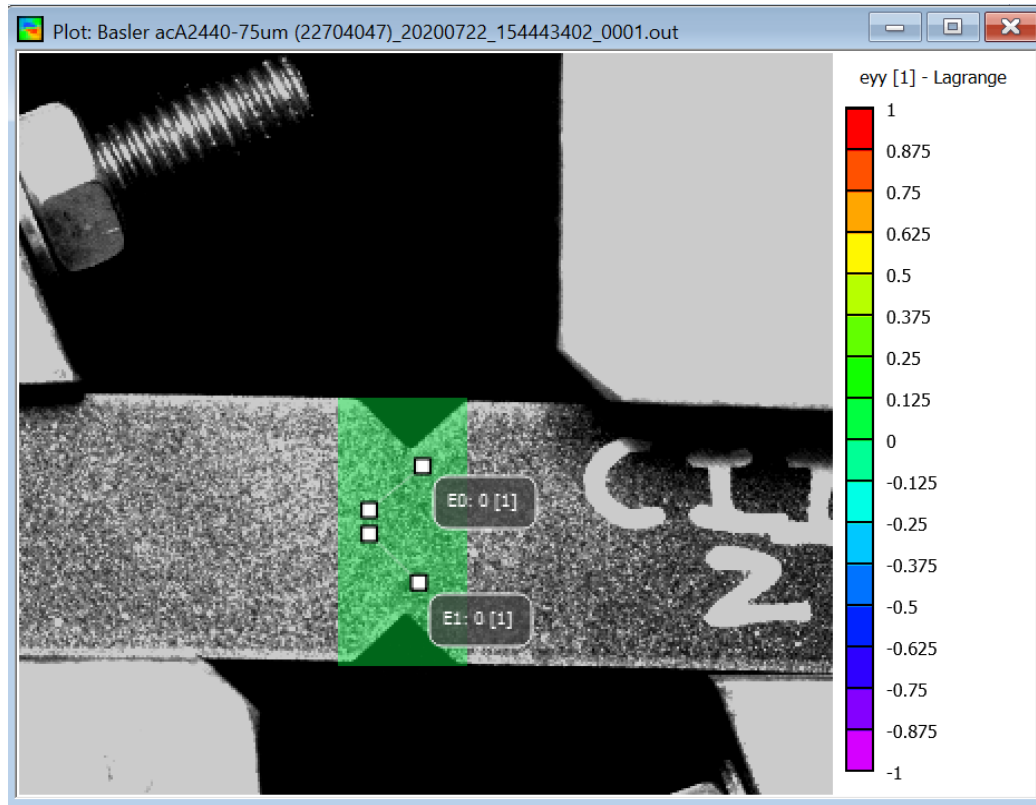
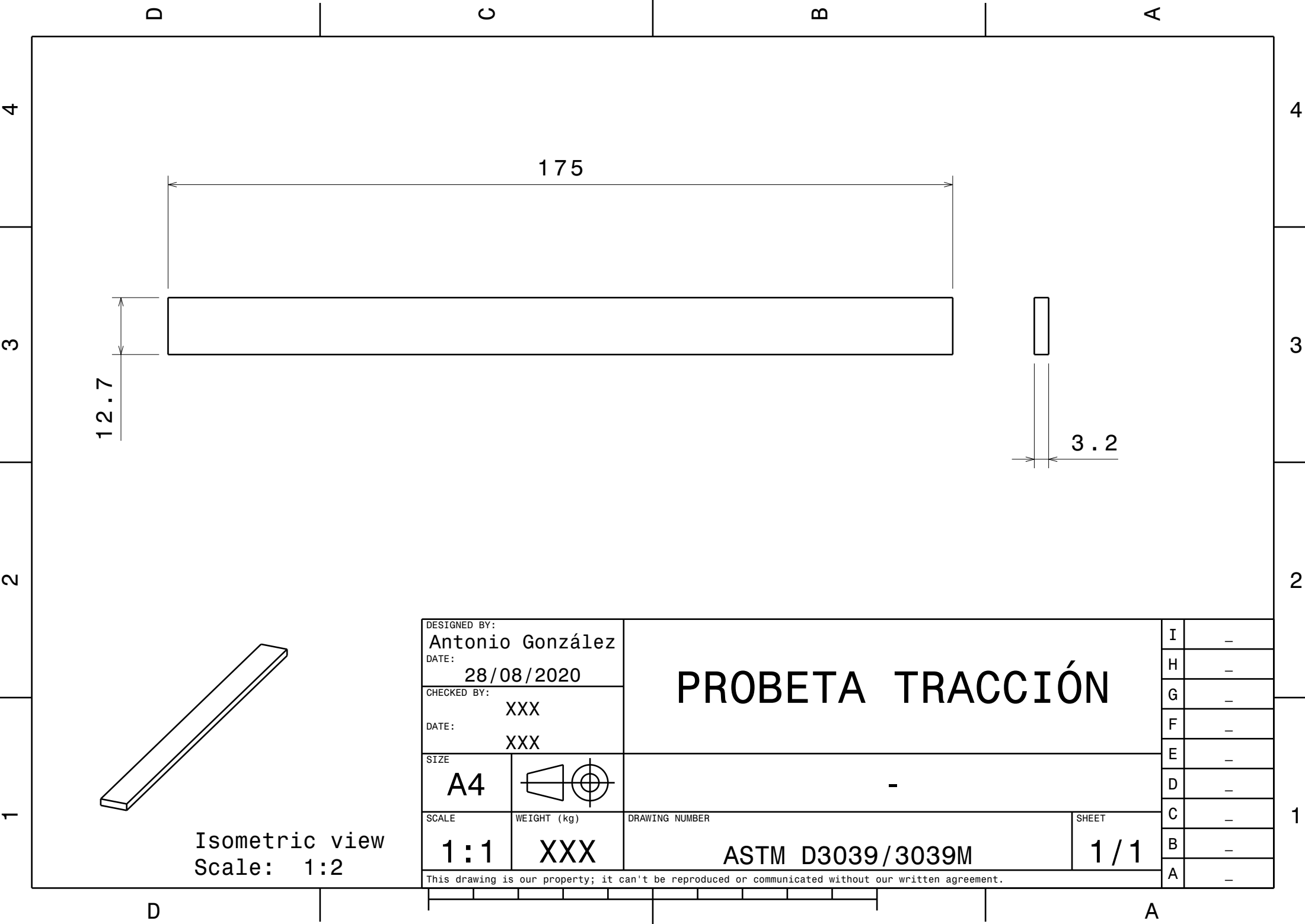


Ilustración 145: Extensómetros virtuales.

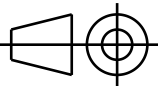


Finalmente, clicando podremos extraer todas las gráficas que genera el software.



DESIGNED BY:
Antonio González
DATE:
28/08/2020
CHECKED BY:
XXX
DATE:
XXX

SIZE
A4



SCALE
1:1

WEIGHT (kg)
XXX

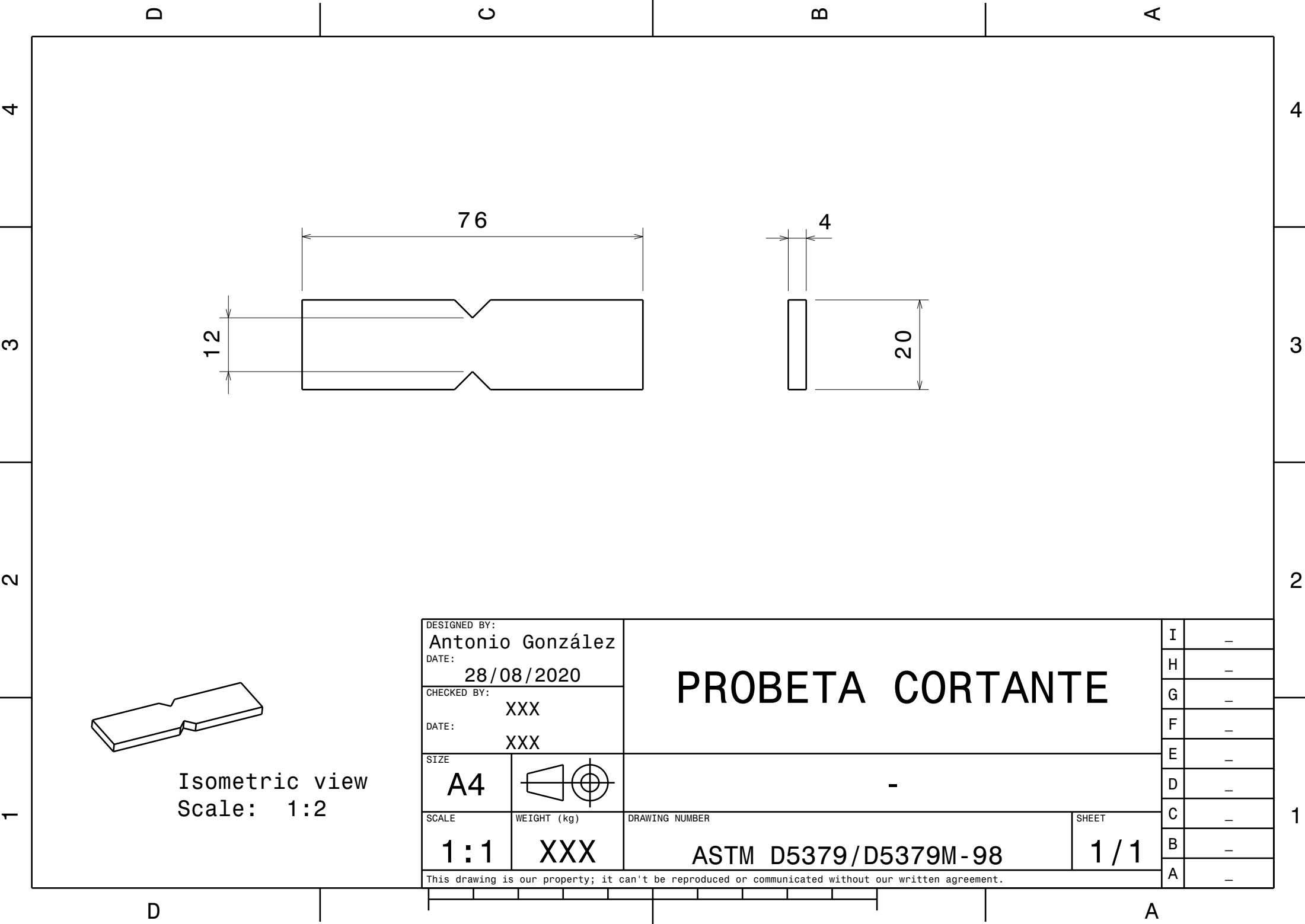
PROBETA TRACCIÓN

DRAWING NUMBER
ASTM D3039/3039M

SHEET
1 / 1

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.



DESIGNED BY:
Antonio González
DATE:
28/08/2020
CHECKED BY:
XXX
DATE:
XXX

SIZE
A4
SCALE
1:1
WEIGHT (kg)
XXX

PROBETA CORTANTE
-
DRAWING NUMBER
ASTM D5379/D5379M-98
SHEET
1 / 1

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.