



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Máster

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA AVANZADA DE NUEVOS MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D

Alumno: Delgado Orti, Jesús

Tutor/a: Prof. D. Daniel Carazo Álvarez
Dpto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Septiembre, 2022



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Don Daniel Carazo Álvarez , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado:
Caracterización mecánica avanzada de nuevos materiales para impresión 3D, que
presenta Jesús Delgado Orti, autoriza su presentación para defensa y evaluación en
la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, SEPTIEMBRE de 2022

El alumno:

JESÚS DELGADO ORTI

El tutor:

DANIEL CARAZO ÁLVAREZ

Índice

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUCCIÓN	9
2. ESTADO DEL ARTE	12
2.1 Mecanizado frente AM	12
2.2 Moldeo por inyección frente a AM	13
2.3 Resumen de las ventajas de la fabricación aditiva	14
2.4 Resumen de las desventajas de la fabricación aditiva	14
2.5 Fases comunes en todas las tecnologías de fabricación aditiva	15
2.6 Comienzos y actualidad de la fabricación aditiva	15
2.6.1 Prototipado rápido	16
2.6.2 Piezas de repuesto	17
2.6.3 Arquitectura	17
2.6.4 Decoración, joyería y moda	18
2.6.5 Aeroespacial y Aeronáutica	18
2.6.6 Industrial del automóvil	19
2.6.7 Medicina y bioimpresión	20
2.6.8 Electrónica	21
2.7 Principales tecnologías	21
2.7.1 Fused Deposition Modeling (FDM)	22
2.7.2 Estereolitografía (SLA)	23
2.7.3 Digital Light Processing (DLP)	24
2.7.4 Selective Laser Melting (SLM)/Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	24
2.7.5 Selective Laser Sintering (SLS)	26
2.7.6 Multi-jet Fusion (MJF)	26
2.7.7 Binder Jetting (BJ)	28
2.7.8 Direct Energy Deposition (DED)	29
2.8 Caracterización de materiales mediante DIC	30
2.8.1 Principios básicos de 2D DIC	31
3. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	33
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	34
4.1 Diseño de las probetas	34
4.2 Fabricación de las probetas	36
4.3 Defectos asociados a la contracción térmica del material	41
4.4 Preparación de las probetas	43

4.5 Ensayos.....	43
4.6 Obtención de las deformaciones mediante DIC	46
4.7 Fundamentos de los ensayos. Propiedades mecánicas.....	48
5. RESULTADOS.....	56
5.1 Ensayo de tracción	56
5.2 Comparación de dirección de impresión	61
5.2 Comparación con datos de fabricante.....	62
5.3 Ensayo de cortante	64
6. CONCLUSIONES.....	68
7. TRABAJOS FUTUROS	70
8. ANEXO I: Planos.....	73
Bibliografía	80

Índice de ilustraciones

Ilustración 1- Proceso de mecanizado en seco mediante CNC	12
Ilustración 2- Optimización topológica de un diseño [4]	13
Ilustración 3- Coste unitario de manera tradicional y mediante fabricación aditiva [5].....	13
Ilustración 4- Proceso genérico de fabricación aditiva [5]	15
Ilustración 5- Evolución de la impresión 3D [5]	16
Ilustración 6- Puente peatonal impreso en 3D [5]	18
Ilustración 7- Hueso impreso mediante fabricación aditiva [5]	20
Ilustración 8- Diagrama impresora FDM [5]	22
Ilustración 9- Diagrama impresora SLA [5]	23
Ilustración 10- Diagrama impresora DLP [5]	24
Ilustración 11- Tecnologías SLM/DMLS [5].....	25
Ilustración 12- Diagrama impresora SLS [5]	26
Ilustración 13- Funcionamiento de la tecnología MJF [5]	27
Ilustración 14- Diagrama impresora BJ [5].....	28
Ilustración 15- Tecnología DED [5]	29
Ilustración 16- Imagen DIC del ensayo de tracción.....	31
Ilustración 17- Grafica de deformación a lo largo de un ensayo de tracción	32
Ilustración 18- Dimensiones de las probetas de tracción	35
Ilustración 19- Requerimientos geométricos para las probetas de cortante	36
Ilustración 20- Etapas de impresión FDM de materiales metálicos [5]	37
Ilustración 21- Impresora Markforged Metal X	37
Ilustración 22- Composición del acero inoxidable 17-4 PH	38
Ilustración 23- Máquina de lavado	38
Ilustración 24- Horno <i>Sinter-1</i> y ciclo de sinterizado	39
Ilustración 25- Gases para atmósfera inerte	39
Ilustración 26- Resultado final del proceso completo de fabricación de las probetas.....	40
Ilustración 27- Probetas de tracción impresas en dirección X e Y	40
Ilustración 28- Piezas fallidas durante impresión 3D	41
Ilustración 29- Reducción de tamaño después del sinterizado	43
Ilustración 30- Montaje del ensayo de tracción.....	44
Ilustración 31- Esquema de las mordazas	45
Ilustración 32- Máquina usada para el ensayo de cortante (izquierda) y mordazas (derecha)	45
Ilustración 33- Calibración de dimensiones en VIC 2D	46
Ilustración 34- Área de interés a analizar en VIC 2D	47
Ilustración 35- Configuración del mallado en VIC 2D.....	48
Ilustración 36- Carga axial sobre sólido libre	49
Ilustración 37- Curva tensión deformación.....	51
Ilustración 38- Cálculo del módulo de Young a partir de los datos del ensayo de tracción ...	52
Ilustración 39- Cálculo del límite elástico convencional	53
Ilustración 40- Diagrama de esfuerzo cortante	54
Ilustración 41- Esquema de colocación de extensómetros para el ensayo de cortante	55
Ilustración 42- Gráficas tensión-deformación dirección X	56
Ilustración 43- Módulos de elasticidad en dirección X	57
Ilustración 44- Fractura de las probetas impresas en la dirección X	58
Ilustración 45- Gráficas tensión-deformación dirección Y	59

Ilustración 46- Módulos de elasticidad en dirección Y	60
Ilustración 47- Fractura de las probetas impresas en la dirección Y	61
Ilustración 48- Comparación de dirección de impresión.....	61
Ilustración 49- Comparativa deformación última	62
Ilustración 50- Comparativa coeficiente de Poisson	62
Ilustración 51- Comparación con datos de fabricante	63
Ilustración 52- Grafica tensión-deformación ensayos de cortante.....	64
Ilustración 53- Talonamiento en ensayos de cortante.....	65
Ilustración 54- Módulos de elasticidad transversal.....	65
Ilustración 55- Probetas de cortante ensayadas	66
Ilustración 56- Caracterización mecánicas a cortante.....	66
Ilustración 57- Propiedades mecánicas a cortante de las probetas 1 y 5.....	67

Índice de tablas

Tabla 1- Requerimientos geométricos para las probetas de tracción.....	35
Tabla 2- Dimensiones de las probetas de tracción impresas en la dirección X.....	41
Tabla 3- Dimensiones de las probetas de tracción impresas en la dirección Y	42
Tabla 4- Dimensiones de las probetas de cortante impresas en la dirección X	42
Tabla 5- Caracterización a tracción del material en la dirección X.....	58
Tabla 6- Caracterización a tracción del material en la dirección Y	60
Tabla 7- Comparación de dirección de impresión.....	61
Tabla 8- Comparativa con datos teóricos	63
Tabla 9- Diferencia de las propiedades mecánicas comparadas con la hoja de características	63
Tabla 10- Caracterización a cortante del material.....	66
Tabla 11- Resultados del ensayo de cortante.....	67

RESUMEN

El presente trabajo consiste en la caracterización avanzada de nuevos materiales metálicos para impresión 3D realizando ensayos a tracción y cortante con el fin de verificar el comportamiento elástico y plástico del material y evaluar la ortotropía y los cambios en las propiedades mecánicas que introducen tanto los aditivos como el proceso de impresión, lo cual genera problemas a la hora de analizar casos con cargas biaxiales o triaxiales. Por este motivo, la caracterización se realizó para obtener las propiedades en las tres direcciones (X, Y, Z).

La obtención de la deformación en la pieza se llevó a cabo mediante la técnica de Correlación Digital de Imágenes (DIC), que permite la obtención de mapas completos de deformación de la superficie objeto de estudio. Todos los ensayos se realizaron bajo la normativa internacional aplicable con el fin de obtener los resultados más homogéneos posibles.

El material estudiado en este trabajo fue el acero inoxidable 17-4 PH de alta resistencia, el cual es muy empleado en infinidad de aplicaciones industriales como herramientas de resistencia al desgaste, llaves y casquillos o piezas estructurales entre otras.

ABSTRACT

This project consists of the advanced characterisation of new metallic materials for 3D printing by performing tensile and shear tests in order to verify the elastic and plastic behaviour of the material and to evaluate the orthotropy and the changes in the mechanical properties introduced by both the additives and the printing process, which generates problems when analysing cases with biaxial or triaxial loads. For this reason, the characterisation was carried out to obtain the properties in all three directions (X, Y, Z).

The deformation of the part was obtained using the Digital Image Correlation (DIC) technique, which allows complete deformation maps of the surface under study to be obtained. All the tests were carried out in accordance with the applicable international standards in order to obtain the most homogeneous results possible.

The material studied in this work was high-strength 17-4 PH stainless steel, which is widely used in many industrial applications such as wear-resistant tools, spanners and bushings or structural parts, among others.

1. INTRODUCCIÓN

La industria 4.0 es el origen de una revolución, conocida como Cuarta revolución industrial y combina nuevas técnicas de producción con sistemas inteligentes de gestión. Una de estas nuevas tecnologías de producción es la fabricación aditiva o impresión 3D, la cual permite obtener piezas tridimensionales capa a capa de forma automática empleando control asistido por ordenador. Estas tecnologías han sufrido un enorme avance en los últimos años tanto a nivel usuario como a nivel industrial por la cantidad de ventajas que ofrece frente a procesos de fabricación tradicionales.

Unas de las áreas de investigación de la fabricación aditiva es la inclusión de nuevos materiales de forma constante que satisfagan las necesidades de la industria. En su origen las impresoras 3D estaban enfocadas en materiales plásticos, pero a lo largo de los años fueron surgiendo nuevos materiales, como pueden ser los materiales compuestos, caracterizados por tener fibras resistentes (fibra de carbono, fibra de vidrio o fibra de aramida) en una matriz de polímero, lo que permite obtener piezas finales con una gran resistencia mecánica y reducido peso. Además, conforme han ido surgiendo necesidades específicas como materiales con alta resistencia térmica, se ha ido implementando materiales cerámicos a estas tecnologías con las propiedades requeridas.

Dentro de las tecnologías de fabricación aditiva la de mayor crecimiento y que más se investiga, es la impresión 3D de metales mediante deposición de hilo fundido (FDM), puesto que permite geometrías que antes eran imposible de realizar, ahorrando, tanto tiempo de producción, como material usado en la pieza final y por lo tanto costes totales de producción. Por este motivo, se está estandarizado su uso en los sectores industriales más importantes de la actualidad. Esta rápida implementación industrial es, en parte, gracias al desarrollo de nuevos filamentos los cuales son compuestos metálicos a los que se le añade una base de polímero para que sean fácilmente imprimibles. El resultado tras la realización del apropiado tratamiento térmico es una pieza metálica con altas propiedades mecánicas y térmicas a un coste mucho menor si se compara con el mecanizado o incluso con otras tecnologías de fabricación aditiva de mayor coste.

En la actualidad estas tecnologías todavía no han alcanzado el desarrollo óptimo que requiere la industria porque producen piezas que presentan un comportamiento ortotropico, es decir, sus propiedades mecánicas son diferentes en cada una de las direcciones ortogonales. La caracterización de estos nuevos materiales supone un nuevo desafío a resolver ya que es totalmente necesario tener claro el comportamiento del material para poder usarlo en sus futuras aplicaciones,

Para una caracterización completa de un material es necesario realizar diferentes ensayos experimentales. Los principales ensayos mecánicos son:

- Ensayo de tracción consiste en la aplicación de esfuerzo en la misma dirección que el eje longitudinal de las probetas (carga axial). Con estos ensayos es posible extraer una grafica con los datos esfuerzo-deformación, a partir de las cuales se pueden determinar el comportamiento elástico y plástico de un material, así como cuantificar su resistencia máxima o a rotura.
- Ensayo de flexión, para determinar las propiedades mecánicas relacionadas con la resistencia ante un momento flector o soportar fuerzas aplicadas perpendicularmente a su eje longitudinal.
- Ensayo de cortante para saber cómo se comporta el material ante una cizalladura.
- Ensayo de impacto para saber cuánta energía es capaz de absorber sin romper.
- Ensayo de compresión con el objetivo de conocer el comportamiento ante un aplastamiento.
- Ensayos de fatiga para determinar la vida útil de las piezas fabricadas.
- Ensayos de dureza para conocer la resistencia que opone un material a ser rayado o penetrado.

En el presente trabajo se ha diseñado, fabricado y caracterizado, bajo la normativa estandarizada, el filamento de acero inoxidable 17-4 PH de alta resistencia de la marca Markforged. Con el fin de determinar el comportamiento elástico y plástico del material, de los ensayos anteriormente mencionados, se

realizaron los ensayos de tracción en las direcciones X e Y, y de cortante en la dirección X.

Existen diferentes métodos para la obtención de las deformaciones sufridas durante los diferentes ensayos. La extracción de información a través del estudio de imágenes es una de las áreas de mayor desarrollo en lo que a sistemas de medida no intrusiva se refiere. La Correlación Digital de Imágenes (Digital Image Correlation, DIC), ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos 20 años, siendo ahora muy empleado en mecánica experimental por ser sencillo de implementar y por dar información de forma precisa. Este método fue el usado en este trabajo y consiste en capturar imágenes cada cierto periodo de tiempo durante el ensayo con el fin de medir las deformaciones sufridas en la pieza.

2. ESTADO DEL ARTE

La industria ya ha implementado la fabricación aditiva (AM) como un proceso más de producción de piezas por sus soluciones de fabricación y otros beneficios. Estos ayudan a la industria a reducir gastos, aumentar la productividad y disminuir los tiempos de producción. De hecho, es clave en el desarrollo de productos a nivel industrial.

Tradicionalmente los procesos más empleados han sido la fabricación sustractiva (mecanizado) y el moldeo por inyección. A continuación, se podrá ver una comparativa de ambos frente a la impresión 3D.

2.1 Mecanizado frente AM

El mecanizado consiste en la fabricación de una pieza a partir de un bloque macizo de material, el cual, mediante arranque de viruta, va adoptando la forma final deseada. La principal ventaja del mecanizado es la amplia variedad de materiales disponibles por lo que es una solución empleada cuando se requieren **altas propiedades mecánicas, térmicas o químicas**.



Ilustración 1- Proceso de mecanizado en seco mediante CNC

Pero si se compara con la impresión 3D, genera un gran volumen de residuos, tanto viruta como refrigerantes (taladrina) los cuales aumentan considerablemente los costes de producción, además de que no es una tecnología especialmente rápida si se requiere buenos acabados superficiales. Además, piezas con geometrías muy complejas resultaran difícil de obtener mediante mecanizado, y la fabricación aditiva es capaz de fabricar cualquier geometría por muy compleja que sea, por lo que la optimización topológica entra en juego, haciendo a la fabricación aditiva incluso más atractiva para el sector industrial, puesto que se optimiza la cantidad de material necesario para fabricar una pieza.



Ilustración 2- Optimización topológica de un diseño [4]

2.2 Moldeo por inyección frente a AM

El moldeo por inyección como su nombre indica, consiste en la fabricación de piezas mediante el uso de moldes, en los cuales, se deposita material fundido que al enfriarse otorga la forma final deseada. Estos moldes son realmente caros de producir y necesitan mucho tiempo de preparación hasta que se puede producir de forma masiva con ellos. Por estos motivos el moldeo por inyección se emplea cuando se quieren fabricar grandes lotes de piezas. En la siguiente ilustración se puede comparar los costes de fabricar con moldes o mediante AM.

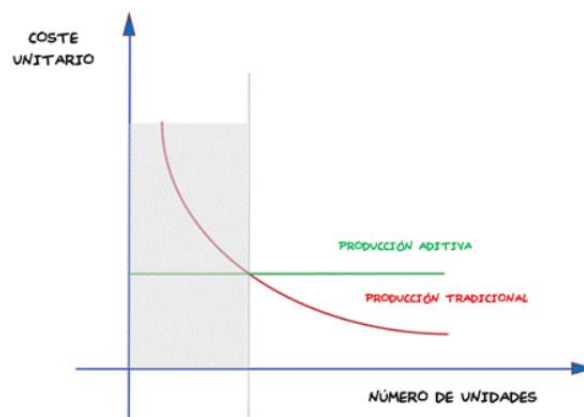


Ilustración 3- Coste unitario de manera tradicional y mediante fabricación aditiva [5]

Se puede observar cómo hasta un número de unidades la fabricación aditiva resulta mucho más interesante desde un punto de vista económico. Otro aspecto a considerar es el hecho de que surjan imprevistos o cambios de diseño en mitad del proceso productivo. Usando moldeo por inyección habría que construir de nuevo un molde y empezar casi de cero el proceso, en cambio la fabricación aditiva es mucho

más flexible y es capaz de adaptarse a cambios de diseño sin que apenas se refleje en los costes de producción.

La complejidad geométrica puede ser un problema para el moldeo por inyección, puesto que hay ciertas geometrías que resultan ser imposible de realizar, por lo que la optimización topológica también favorece a la fabricación aditiva.

2.3 Resumen de las ventajas de la fabricación aditiva

- I. **Menor residuo:** Menor coste e impacto en el medio ambiente
- II. **No necesita moldes:** Rapidez y menor coste de producción
- III. **Optimización de geometrías:** Previamente imposibles, sin ensamblado, menor peso y menos pasos de fabricación
- IV. Permite **producción de bajo volumen**
- V. **Rapidez de respuesta a variaciones** de diseño
- VI. Productos **personalizados**
- VII. Cadenas de **suministro** más cortas

2.4 Resumen de las desventajas de la fabricación aditiva

- I. **Mayores costes** de producción para **lotes de gran tamaño**.
- II. **Más costoso** para **productos simples**
- III. Posible necesidad de **soportes**.
- IV. **Anisotropía** / impredecibilidad de las tolerancias.
- V. Falta de **repetibilidad**.
- VI. **Resistencia** limitada al **calor**.
- VII. **Tiempo de impresión** puede ser alto.
- VIII. Falta de **conocimiento entre los trabajadores**.
- IX. **Nuevos competidores** en el entorno digital.

2.5 Fases comunes en todas las tecnologías de fabricación aditiva

La Fabricación Aditiva es el conjunto de tecnologías de fabricación por las que un diseño digital 3D se transforma en un objeto real, uniendo poco a poco material (o materiales) de forma controlada por un ordenador. Como se verá más adelante, existen multitud de tecnologías de fabricación aditiva, si bien es posible establecer un proceso genérico común a todas ellas, que consta de 6 fases:

1. Generación de un modelo 3D en ordenador: Herramientas CAD, modelado de malla 3D o escaneo 3D.
2. Simplificación del modelo al formato valido para la máquina de fabricación (stl).
3. Rebanado/Troceado de la pieza: generación del g-code para la maquina con los parámetros de impresión deseados.
4. Fabricación capa a capa de la pieza.
5. Extracción del producto fabricado.
6. Post-procesado: Lijado, lavado, secado, pintado, cromado...

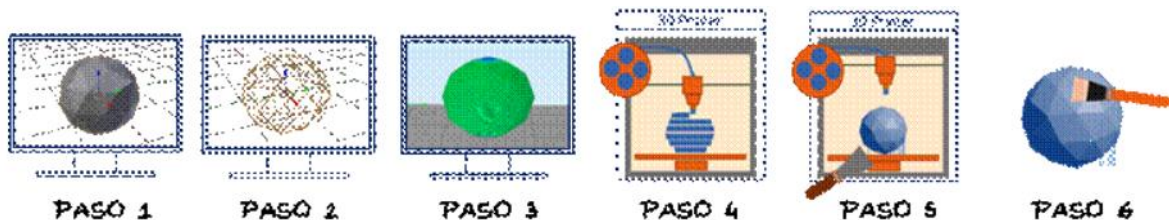


Ilustración 4- Proceso genérico de fabricación aditiva [5]

2.6 Comienzos y actualidad de la fabricación aditiva

La fabricación aditiva resulta ser bastante más antigua de lo que se podría pensar. Se piensa que es una tecnología moderna, pero en realidad surgió en **1984**, cuando el ingeniero Charles Hull inventa la estereolitografía (SLA), primera tecnología de fabricación aditiva basada en polímeros sensibles a la luz ultravioleta, siendo patentado en 1986 cuando creo la empresa 3D Systems.

La rápida expansión de la fabricación aditiva en los últimos años se debe a los siguientes motivos:

- Vencimiento de patentes que hacían a esta tecnología muy cara

- Desarrollo de nuevos materiales: resinas, compuestos, materiales cerámicos, metálicos, etc., que han permitido conseguir un producto final adecuado a cada situación
- Popularidad del movimiento “maker” en el mercado amateur
- El uso de estas tecnologías en el entorno industrial aportar grandes ventajas frente a las tecnologías tradicionales de fabricación.

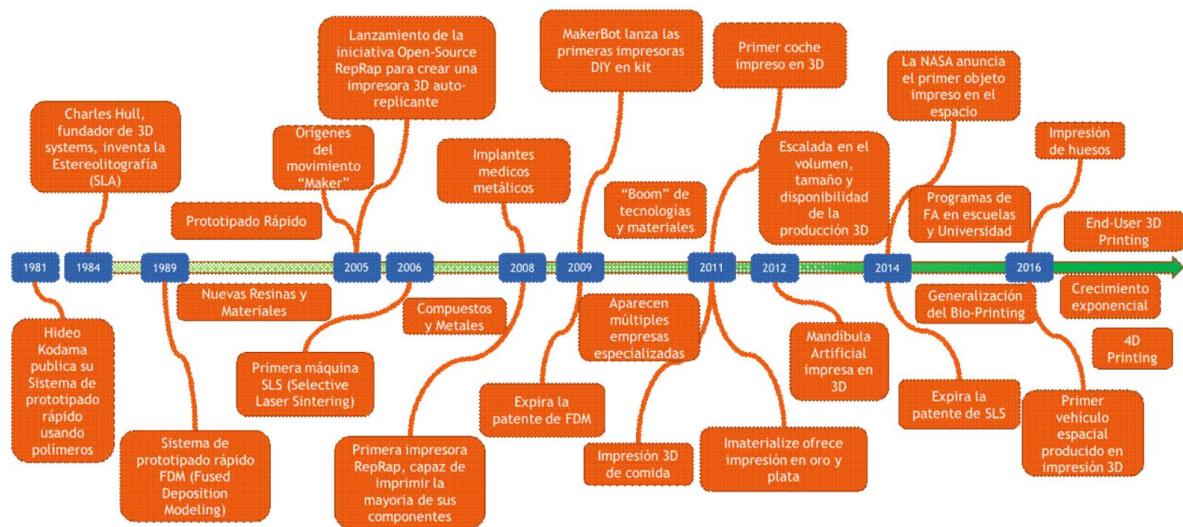


Ilustración 5- Evolución de la impresión 3D [5]

Como se puede observar, actualmente la fabricación aditiva puede encontrarse en casi todos los sectores industriales. A continuación, se expondrán aplicaciones y ejemplos en los sectores más importantes.

2.6.1 Prototipado rápido

Este fue el primer uso que se le dio a la estereolitografía, puesto que permitía producir un único objeto a bajo coste. Las resinas empleadas no eran las deseadas para el producto final, pero servían para validar diseños en unas horas en vez de en semanas. Supuso un cambio radical para la industria puesto que los ingenieros eran capaces de tener un prototipo físico en vez de digital y los clientes podían aprobar el diseño antes de pasar a la fase de fabricación masiva. Actualmente no solo se usa la estereolitografía, sino que se usan todas las tecnologías disponibles.

Los principales beneficios de usar la impresión 3D para realizar prototipos fueron: validación anticipada del diseño, reducción de errores en las fases previas a

la fabricación, mejor comunicación de ideas dentro del equipo y con el cliente final y tener la posibilidad de realizar iteraciones en el diseño hasta encontrar el mejor para cada aplicación.

2.6.2 Piezas de repuesto

Este sector es uno de los puntos fuertes para la fabricación aditiva. Permite tener un inventario digital en vez de uno físico con la diferencia importante de costes que supone. Es interesante tener máquinas directamente en fábrica capaces de fabricar las piezas de repuesto que se necesitan justo cuando se necesitan o tener un pequeño stock de aquellas que son más propensas a romperse.

Además, piezas descatalogadas pueden ser diseñadas mediante ingeniería inversa y fabricadas mediante impresión 3D en vez de tener que reemplazar la máquina por una nueva. Incluso, existen multitud de plataformas que permiten almacenar diseños y ponerlos a la disposición de la gente por lo que es posible encontrar el diseño que necesitamos sin tener que gastar recursos en diseñar la pieza deseada.

2.6.3 Arquitectura

Los arquitectos llevan ya años mostrando y validando sus diseños con sus clientes mediante maquetas impresas en 3D. De la manera tradicional podrían emplearse semanas o incluso meses, era un trabajo artesanal de personas especializadas. Ahora pasar del modelo digital a la maqueta física es cuestión de horas de impresión y totalmente automático.

Las tecnologías de fabricación aditiva son capaces de producir modelos arquitectónicos en todo tipo de materiales con mucho detalle. Esto supone una revolución en el sector, porque facilita enormemente la comunicación con los clientes y asegura con rapidez la viabilidad y cumplimiento de necesidades de cada proyecto. Además, es posible repetir el mismo modelo con pequeñas modificaciones para presentar diferentes variantes de un proyecto.

En los últimos años ya se ha empezado a indagar en la forma de fabricar directamente los proyectos de arquitectura mediante fabricación aditiva con varios casos exitosos. No es de extrañar que poco a poco se empiecen a ver grandes

máquinas de fabricación aditiva de hormigón o cemento junto a excavadoras y grúas.



Ilustración 6- Puente peatonal impreso en 3D [5]

2.6.4 Decoración, joyería y moda

En este caso, lo que busca la industria es la capacidad de hacer tiradas muy cortas y al mismo tiempo de una geometría compleja. Por un lado, podemos atender a los gustos del cliente; por el otro, podemos construir objetos de un diseño antes sólo posible en el ordenador.

Además, emplear la fabricación aditiva tiene la ventaja de poder realizar pruebas en materiales baratos (plástico, cristal, etc....) antes de fabricar el objeto final en materiales caros (oro, titanio, etc....).

En cuanto a la moda se puede ver tres grandes ventajas:

1. Fabricar complementos y vestidos con formas imposibles.
2. Fabricar vestidos y complementos completamente personalizados.
3. Fabricar maniquíes semejantes al cliente que sirva para probar la ropa directamente sobre él.

2.6.5 Aeroespacial y Aeronáutica

Cuando hablamos de fabricación aditiva en el espacio tenemos que distinguir entre fabricar dentro de una nave o fabricar directamente fuera de la misma. En el primer caso hablamos de hacerle la vida más fácil a los astronautas haciendo repuestos, herramientas, etc. En el segundo y aún más difícil caso, hablamos de la posibilidad de crear estructuras complejas en el exterior (por ejemplo, satélites). Las grandes estructuras complejas son difíciles de almacenar y llevar a bordo, y además

hay que ensamblarlas. Si podemos fabricarlas directamente donde las necesitamos se facilita mucho el trabajo.

El problema, claro, es que imprimir directamente en el espacio exterior es más complejo: hacen falta materiales e impresoras mucho más resistentes. Y hay que tener en cuenta también el tema de los residuos. Diferentes experimentos se están llevando a cabo actualmente para posibilitar la impresión en el vacío espacial.

En definitiva, la fabricación aditiva ofrece a la exploración espacial el potencial de:

- Reducir el tamaño de los vehículos de lanzamiento, al aligerar la necesidad de transportar repuestos, reduciendo su coste.
- Fabricar las estructuras en el espacio, en lugar de transportarlas.
- Posibilitar el diseño de materiales y geometrías que no han sido nunca creadas antes, que funcionen bien en un entorno de gravedad cero, pero no en la Tierra.

En cuanto a la industria aeronáutica, cada kilo de más en un avión cuesta dinero. Dicho de otra forma, cada kilo que aligeremos supone un ahorro importante. Así, una aplicación directa de la fabricación aditiva es la creación de piezas no totalmente sólidas, variando su proporción de relleno (*infill*) de forma que mantengan su forma y todas sus propiedades mecánicas, pero disminuyendo su peso. Esta estrategia se aplica especialmente en los elementos estéticos, cajetines, etc.

También es posible emplear la impresión 3D para crear objetos con menor número de piezas como forma de mejorar sus propiedades al mismo tiempo que se reduce el coste de ensamblado.

2.6.6 Industrial del automóvil

Como se puede imaginar, en un automóvil ahorrar en el peso del vehículo supone un ahorro, aunque no tan importante como en el caso anterior.

En el sector automovilístico en general se usa ya la fabricación aditiva para distintos elementos como parachoques, adornos exteriores, válvulas y bombas de fluido, etc. En un futuro es de esperar que se aplique también a elementos más estructurales como la suspensión o la electrónica.

Está aún por ver su aplicación para hacer coches individualizados a las demandas del cliente, pero parece claro que será pronto una opción, al menos en los elementos más decorativos o externos del vehículo.

2.6.7 Medicina y bioimpresión

La medicina es otro gran sector para la fabricación aditiva. La fabricación de prótesis de todo tipo, de la manera tradicional, tenían un coste muy elevado. Ahora con impresión 3D es posible crear prótesis personalizadas con un bajo coste.

La posibilidad de la personalización en la impresión 3D nos permite dar una solución específica a cada problema de cada paciente individual. Así, por ejemplo, la tecnología se emplea para la impresión de huesos artificiales, que duplican perfectamente la forma, el tamaño e incluso el peso del original, para garantizar el éxito del implante. Esto es especialmente relevante en casos para los que antes no había una solución, como puede ser implantar una nueva mandíbula. Con el tiempo, es de esperar que la práctica totalidad de implantes sean así, totalmente personalizados a cada paciente.



Ilustración 7- Hueso impreso mediante fabricación aditiva [5]

Sin terminar de salirnos del campo de la medicina, la aplicación de la fabricación aditiva a materiales biológicos nos eleva el listón de sus aplicaciones a límites casi de ciencia ficción, en el encuentro de la ingeniería y la biología.

En estos casos, lo que se emplea es el concepto de añadir material poco a poco (normalmente con tecnologías de impresión 3D *syringe extrusion*, “extrusión de jeringuilla” o similares) pero con la particularidad de que el material es biológico. Así, se ha conseguido ya la impresión de piel y tejidos en general, con el claro objetivo de “fabricar órganos” de todo tipo según sean necesarios.

2.6.8 Electrónica

Según avanzan las opciones de impresión multi-material, se hace más posible fabricar componentes electromecánicos mediante fabricación aditiva en su totalidad. Esto introduce nuevas posibilidades en el diseño y fabricación de aparatos electrónicos.

Se han ido encontrando ya varias opciones para la fabricación de conductores mediante impresión 3D, incluyendo las famosas “tintas conductoras”, basadas en nanomateriales o el uso del grafeno.

La posibilidad de hacer todo el producto, incluyendo la electrónica, en una sola fase disminuye enormemente los costes de ensamblaje de aparatos eléctricos, lo que abriría la puerta a realmente hacer una personalización a nivel de circuito de las funcionalidades de un producto. Hace también posible avanzar un paso más en la miniaturización de aparatos, al no necesitar cajas ni tornillos para la parte electrónica.

Otra alternativa muy prometedora es la opción de hacer circuitos impresos en cualquier superficie en lugar de -como hasta ahora- en el plano, lo que nos proporcionará la posibilidad de crear nuevos y complejos diseños y la optimización de las dimensiones todo tipo de aparatos.

2.7 Principales tecnologías

La Fabricación Aditiva agrupa actualmente a múltiples tecnologías diferentes, cada una de ellas con sus propias características diferenciales, sus ventajas, sus inconvenientes y su ámbito de aplicación. Conocerlas es necesario para seleccionar la mejor opción para cada necesidad, sabiendo porqué algunos diseños pueden ser óptimos en algunas tecnologías y materiales, pero no en otros.

Las tecnologías de Fabricación Aditiva más importantes son: Fused deposition modeling (FDM), estereolitografía (SLA), Digital Light Processing (DLP), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective Laser Sintering (SLS), Multi-jet fusión (MJF), Binder Jetting (BJ), Direct Energy Deposition (DED).

2.7.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

Esta es la tecnología empleada para fabricar las probetas en el presente trabajo. Aunque no fue la primera tecnología de fabricación aditiva, la extrusión de materiales es de largo la más conocida y extendida. Entre los aficionados e impresoras de sobremesa, esta tecnología supone probablemente más del 90% del mercado. Es también la más usada en el entorno profesional, con el 36% de uso en la industria en 2017.

La denominación de tecnología como FDM (*Fused Deposition Modeling*) es *copyright* de la compañía *Stratasys*, por lo que se usa normalmente el término FFF (*Fused Filament Fabrication*) para referirnos a la técnica de fabricación en la que se usa un filamento de plástico que, convenientemente controlado, se lleva a través de un extrusor que lo calienta y lo deposita poco a poco hasta construir el objeto.

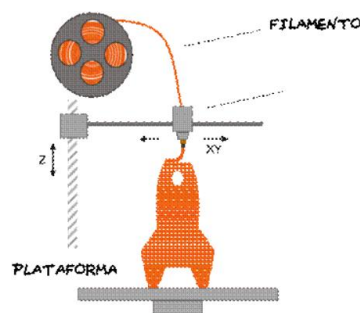


Ilustración 8- Diagrama impresora FDM [5]

En el diagrama podemos ver el funcionamiento general de esta tecnología: Por un lado, un motor paso a paso empuja el filamento desde la bobina hasta que sale por la boquilla de un extrusor. En este extrusor se calienta el material para fundirlo y ser depositado en muy pequeñas cantidades a través de la boquilla del extrusor. El extrusor tiene a su vez capacidad de moverse en todas las direcciones, x e y para depositar una capa de material sobre la plataforma. Una vez que se ha impreso la primera capa, la plataforma se mueve ligeramente hacia abajo para imprimir la

siguiente capa sobre ella. Normalmente además la impresora suele incluir tubos de guía y engranajes para asegurar el correcto movimiento del filamento durante todo el proceso de impresión.

Con el límite de la capacidad física del hardware utilizado, en esta tecnología los parámetros de impresión son normalmente ajustables mediante el software controlador de la impresora, dando al usuario una gran variedad de opciones para imprimir con más o menos calidad, en más o menos tiempo.

En cuanto a los materiales, encontramos los dos materiales por excelencia, ABS y PLA. Después encontramos materiales más ingenieriles como el nylon, y por último encontramos materiales con altas propiedades mecánicas como son los materiales compuestos, donde podemos encontrar al acero en bases de polímero. Estos últimos necesitan tratamientos térmicos para obtener todas sus propiedades térmicas y mecánicas.

2.7.2 Estereolitografía (SLA)

El funcionamiento de la estereolitografía es el siguiente: se llena un contenedor de una resina en estado líquido. Esta resina es fotosensible que reacciona ante la luz solidificándose. Dentro del contenedor se tiene una plataforma capaz de un movimiento vertical, que inicialmente está cercana a la superficie. Mediante un láser dirigido por medio de espejos se va solidificando una primera capa; una vez conseguida esta capa, se desliza hacia abajo la plataforma, la resina líquida invade el nuevo espacio libre dejado y se vuelve a empezar el proceso de solidificar con el láser la siguiente capa; así sucesivamente hasta completar el objeto en su totalidad, capa a capa.

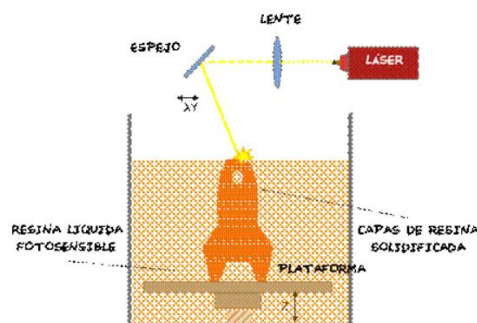


Ilustración 9- Diagrama impresora SLA [5]

Puesto que la resina llena completamente todo el compartimento, con esta tecnología sólo es posible fabricar objetos con un único material y color. Además, puesto que no hay forma de sujetar capas en el aire, esta tecnología necesita también el uso de soportes para capas que sobresalgan (*overhang*).

2.7.3 Digital Light Processing (DLP)

La tecnología *Digital Light Processing* (DLP) es otra tecnología muy similar a la estereolitografía. Su única diferencia es la forma en que se consigue la solidificación de la resina; en lugar de emplear un láser, se emplea un proyector digital de luz, lo que tiene la ventaja de que, en un único paso, se proyecta el dibujo de la capa completa a fabricar (aunque en ocasiones, si la capa es muy extensa, este paso puede hacerse en varias fases). Este hecho le da a la tecnología DLP su gran ventaja: es más rápida que la SLA. Sin embargo, carece de la precisión de un láser, por lo que es menos aconsejable para aquellos casos en que se requiere un alto nivel de detalle.

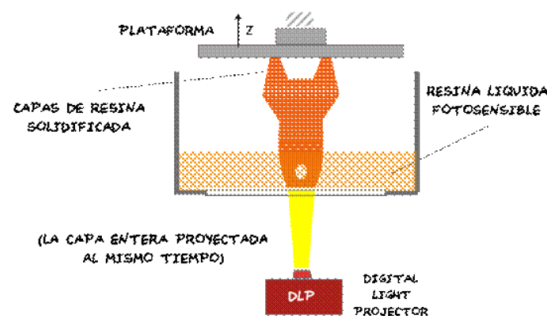


Ilustración 10- Diagrama impresora DLP [5]

Las principales ventajas del SLA y DLP son: acabados superficiales suaves, gran precisión y en el caso del DLP menor tiempo de impresión. Las principales desventajas son: Único material para toda la pieza, precio mayor de las resinas frente a filamento y problemas de resistencia a la luz solar.

2.7.4 Selective Laser Melting (SLM)/Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Selective Laser Melting (SLM) y *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) son los nombres que recibe la tecnología que emplea polvos metálicos, los cuales solidifican mediante un láser. La diferencia entre la tecnología SLM y la DMLS es que mientras la primera funde completamente el polvo metálico, la segunda emplea aleaciones (en lugar de un polvo metálico homogéneo del mismo metal) y no funde todo el

polvo, sino que consigue la unión de partículas que se funden entre sí sin que todo el metal se funda completamente. En ambos casos, el objeto fabricado es de un único material.

En una cámara llena de polvo metálico se tiene una plataforma, sobre la que inicialmente hay una mínima capa de polvo. Mediante un láser se calienta el polvo hasta alcanzar el punto de fusión del metal, dibujándose y produciendo una primera capa. A continuación, la plataforma se desliza un paso hacia abajo, un nivelador extiende una nueva capa de polvo metálico por encima de la capa ya fabricada, y se vuelve a iniciar el proceso, capa a capa hasta completar la pieza.

Para facilitar que el metal se funda fácilmente, el polvo metálico en el contenedor se mantiene a una temperatura ligeramente por debajo del punto de fusión; así, al contacto con el láser cada capa funde fácilmente, uniéndose a la anterior. Este hecho hace que sea necesario esperar un tiempo relevante para enfriar el contenedor hasta poder extraer la pieza terminada. Una vez enfriado, se extra la pieza y se limpia de restos de polvo; el polvo sobrante puede reciclarse para un siguiente trabajo en un alto porcentaje, superior al 50%.

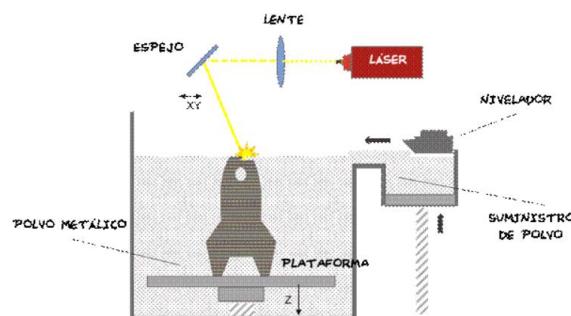


Ilustración 11- Tecnologías SLM/DMLS [5]

Los materiales disponibles con estas tecnologías son acero, titanio, cromo y aluminio. Para garantizar una mejor resistencia final, es también bastante típica una fase de tratamiento de calor posterior a la fabricación, similar a la de otros procedimientos de fabricación tradicionales, en la que se calienta y enfría la pieza de forma controlada para eliminar micro defectos y homogeneizarla completamente.

Otro de los problemas de las tecnologías DMLS/SLM es su alto coste en comparación con otras tecnologías de fabricación 3D por lo que se limita su uso a aplicaciones con un alto nivel de requerimientos.

2.7.5 Selective Laser Sintering (SLS)

Selective Laser Sintering (SLS) es el nombre de la tecnología empleada para la impresión 3D de materiales no metálicos en *Powder Bed Fusion*. Su funcionamiento es el mismo que SLM: un láser se encarga de ir fundiendo un polvo de material en la capa superficial; una vez impresa esta capa, la plataforma se mueve hacia abajo, se extiende una nueva capa de polvo mediante un nivelador (típicamente de 0,1mm de espesor) y se continúa el ciclo hasta imprimir todo el objeto.

Sin embargo, aparte de emplear materiales distintos, la tecnología SLS tiene una característica fundamental que la diferencia de otras: debido a que el polvo es capaz de sujetar a las capas superiores, esta tecnología **no necesita soportes**, lo que la hace una tecnología perfecta para para figuras geométricas complejas.

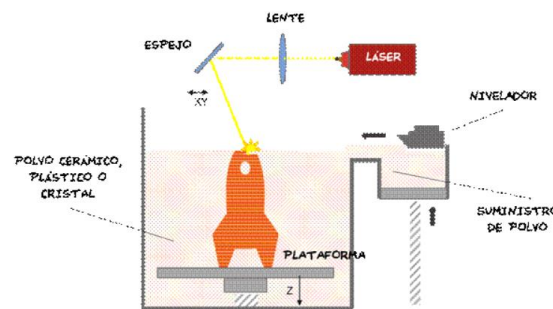


Ilustración 12- Diagrama impresora SLS [5]

Su principal problema es el alto coste de la máquina SLS, mucho más alto que otras tecnologías, y los tiempos necesarios de preparación de la máquina, calentamiento y enfriamiento del polvo.

Aunque se emplean múltiples materiales en SLS, los más usados son los termoplásticos derivados de la poliamida (PA), que tienen buenas características finales. El más conocido de todos ellos es el nylon. También se usan otros tipos de plásticos y cristales.

2.7.6 Multi-jet Fusion (MJF)

Esta tecnología desarrollada por HP es en realidad un híbrido entre la tecnología SLS y la inyección de materiales, buscando obtener lo mejor de ambos mundos.

Su funcionamiento es el siguiente: Se parte de un compartimento lleno del material a imprimir en polvo, y se extiende una primera capa sobre la plataforma mediante un nivelador, calentándolo a una temperatura cercana a la fusión. A continuación, una cabeza móvil deposita sobre el polvo dos sustancias: una de ellas deposita un “agente de fusión”, que es el que facilita que los granos de polvo se unan entre sí; la otra es un “agente de detalle”, que hace lo contrario: impedir la fusión en los límites de cada capa a imprimir, para asegurar que no se funda más que lo exactamente necesario y se obtienen bordes limpios. A continuación, se calienta el área con energía de infrarrojos, consiguiéndose la fusión únicamente en las zonas deseadas (las afectadas por el agente de fusión); se consigue así una alta precisión en la capa a generar. Una vez finalizada esta capa, como siempre, se desplaza la plataforma hacia abajo, se extiende una nueva capa de polvo y vuelta a empezar el ciclo hasta terminar el objeto a fabricar.



Ilustración 13- Funcionamiento de la tecnología MJF [5]

Multi-jet es por tanto una tecnología de alta precisión, con capas inferiores a 0,1 mm de espesor. Con la ventaja adicional de que, al igual que SLS, no necesita soportes, porque el polvo es capaz de sujetar las capas que se impriman por encima.

Sin embargo, al tener que calentar la cámara para poner el polvo cercano a la temperatura de fusión, puede tener problemas de deformaciones por calor (*warping*) y además es necesario esperar a que disminuya la temperatura para extraer y limpiar la pieza. El material usado es similar al empleado en SLS, y su acabado no es tan suave como en las tecnologías de inyección de materiales o SLA, aunque posee un grano más fino.

2.7.7 Binder Jetting (BJ)

La inyección de Aglutinante (*Binder Jetting*) es una tecnología de fabricación aditiva similar a las de fusión de lecho de polvo (*Powder Bed Fusion*) pero con la diferencia de que consigue la fusión de materiales no mediante calor, sino mediante la adición de un material aglutinante que une entre sí las distintas partículas de polvo.

El funcionamiento es muy sencillo: se extiende la capa inicial de material en polvo (normalmente plásticos, arenas o cristales, pero también existe con algunos metales); a continuación, se dibuja sobre ella la capa de material a unir con el aglutinante en forma líquida/viscosa; adicionalmente se inyecta también tinta (con la misma tecnología de inyección de tinta que las impresoras de papel) para dar un color determinado a la capa o parte de ella. Una vez finalizada una capa, se mueve la plataforma hacia abajo, y se comienza de nuevo extendiendo una nueva capa de polvo. Finalmente, suele ser bastante común añadir un paso de postproducción en forma de “baño” en el que un líquido final tapa los posibles poros de la pieza y mejora su terminación.

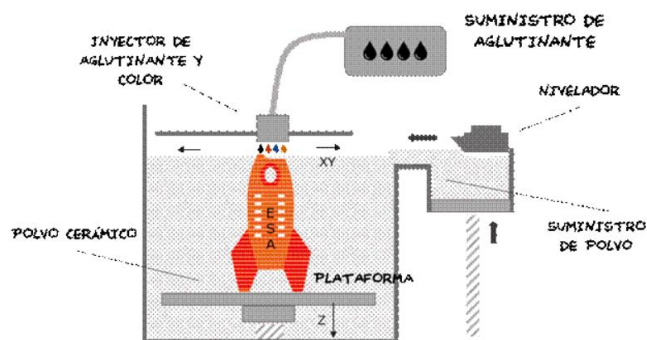


Ilustración 14- Diagrama impresora BJ [5]

Como ventajas encontramos: posibilidad de obtener piezas muy coloridas, de gran atractivo visual, no necesita soportes, no tiene problemas de deformación, velocidad similar al SLS y posibilidad de realizar objetos de gran tamaño.

Sus principales inconvenientes son: post-procesado costoso, piezas menos resistentes que con otras tecnologías, superficies porosas y menor número de materiales disponibles.

2.7.8 Direct Energy Deposition (DED)

La familia de tecnologías de deposición directa de materiales (*Directed Energy Deposition*), como su propio nombre indica, tiene la particularidad de que funcionan añadiendo pequeñas cantidades de material de forma directa en cualquier punto del espacio que se desee. Dentro de esta familia, encontramos la tecnología *Direct Metal Deposition (DMD)* o *Laser Metal Deposition (LMD)*, según los detalles de cómo se implemente, y funciona de forma genérica de la siguiente forma: sobre un brazo robótico multidimensional (capaz de moverse libremente en las 3 dimensiones) se instala una cabeza que es la responsable de depositar el material; este aparato inyecta al mismo tiempo el material en polvo y la energía para fundirlo (típicamente con un láser de alta precisión, un haz de electrones o un arco de plasma) en el mismo punto con una gran precisión.

Para evitar que el material escape o se funda sobre otro sitio que no sea el deseado, se emite además un flujo constante de un gas inerte que crea una zona neutra alrededor e impide que esto ocurra. El metal añadido se funde con el anterior en su totalidad, por lo que el resultado final es un metal denso y compacto con excelentes características mecánicas, comparables a otros métodos de fabricación tradicionales. Obviamente, el brazo robótico es controlado por un ordenador (un sistema de Control Numérico) para asegurar una total precisión.

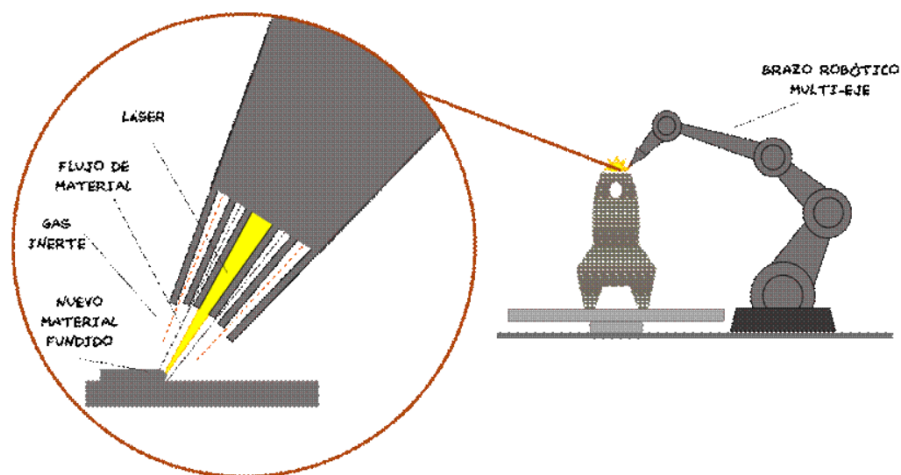


Ilustración 15- Tecnología DED [5]

Una de las grandes ventajas de esta tecnología es que es capaz de añadir material en cualquier sitio, sin necesidad de ir ordenadamente capa a capa como en el resto de las tecnologías. A este hecho, unido a su alta precisión, hace posible que

se pueda emplearse para casi cualquier aplicación. En definitiva, se trata de la única tecnología que es capaz realmente de añadir únicamente el material necesario en el sitio necesario, cumpliendo la promesa de la fabricación aditiva.

Otra ventaja añadida en comparación con otras tecnologías capaces de producir piezas metálicas es que en este caso no hay prácticamente ningún residuo, puesto que todo el material empleado termina fundiéndose en la pieza.

En cuanto al material, se puede usar cualquier tipo de polvo metálico con esta tecnología, siendo los más comunes acero, titanio, aluminio, o distintas aleaciones.

Su desventaja principal es, sobre todo, su alto precio; se trata de la tecnología de fabricación aditiva más cara actualmente. Por ello, se usa normalmente sólo en casos donde los requerimientos técnicos son tan exigentes que lo justifican. Por ejemplo, es muy empleada en la reparación de piezas de alta tecnología aeroespacial que se han dañado en algún punto por el uso (como un componente de una turbina), o para extender la vida útil de algunas herramientas de alto rendimiento. De esta forma no es necesario desensamblar una estructura compleja o volver a crearla para repararla.

2.8 Caracterización de materiales mediante DIC

La correlación digital de imágenes es un método óptico no intrusivo que usa seguimiento y registro de imágenes para obtener de forma precisa medidas de los cambios que se producen en una pieza. Este método se emplea para medir los campos de desplazamiento y tensiones durante un ensayo de tensión-deformación y es ampliamente usado en laboratorios científicos e ingenieriles. Un enfoque muy habitual es emplear patrones de recubrimiento aleatorios y comparar subregiones de la imagen para obtener un mapa completo de medida.

Se puede utilizar esta técnica tanto para medir deformaciones en superficies, que pueden ocurrir en el plano (2D DIC) o fuera de plano (3D DIC). Si se compara con el método tradicional de galgas o extensómetros, la cantidad de información detallada de deformación durante el ensayo es mayor gracias a la habilidad de obtener información local.

Para el presente trabajo se empleó la técnica de 2D DIC con el software bajo licencia llamado *VIC-2D* el cual más adelante será explicado en detalle.



Ilustración 16- Imagen DIC del ensayo de tracción

2.8.1 Principios básicos de 2D DIC

Los principios básicos del método 2D DIC es el seguimiento de cada punto (motas de pintura negra) entre las diferentes imágenes antes y después de la deformación ocurrida durante el ensayo. Es por ello por lo que la superficie de la probeta debe tener patrones aleatorios de niveles de grises, que se deforman conjuntamente en la superficie. Los métodos para evaluar la deformada debe definirse con un criterio de correlación, siendo lo más usados la correlación cruzada y la suma por diferencia al cuadrado. El proceso de rastreo finaliza mediante la identificación del nivel máximo del coeficiente de correlación entre dos puntos de la zona a analizar. La diferencia entre la posición de referencia y la deformada proporciona el vector desplazamiento en el punto analizado.

Basándose en la asunción de continuidad de los desplazamientos del sólido deformable, existe un conjunto de puntos vecinos que se mantienen tanto en la imagen de referencia como en la deformada. Así las coordenadas del punto vecino Q, puede relacionarse con el punto analizado P con los mismos puntos en la deformada Q' y P' respectivamente, mediante las funciones de forma o funciones de mapeado del desplazamiento:

$$\begin{cases} x'_i = x_i + \xi(x_i, y_j) \\ y'_j = y_j + \eta(x_i, y_j) \end{cases} \quad (i, j) = -M:M \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde ξ y η son las componentes del vector desplazamiento en el plano.

Una vez se tiene el conjunto completo de imágenes, este software es capaz de analizar las deformaciones que hay en la probeta durante todo el ensayo. Para ello se crea una malla en la probeta que genera regiones a analizar. Internamente el programa es capaz de seguir los desplazamientos a lo largo del ensayo por comparación en escalas de grises, y finalmente, mediante la inclusión de un extensómetro virtual, es posible determinar las deformaciones en la probeta.

Si solamente se produce movimiento como sólido rígido, puede emplearse una ecuación de orden cero, pero evidentemente, la función de orden cero no es suficiente por lo que se emplea la función de orden uno, la cual permite translaciones, rotaciones, cortante, deformaciones normales y sus combinaciones:

$$\begin{cases} \xi_1(x_i, y_j) = u + u_x \cdot \Delta x + u_y \cdot \Delta y \\ \eta_1(x_i, y_j) = v + v_x \cdot \Delta x + v_y \cdot \Delta y \end{cases} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Siendo $\Delta x = x_i - x_0$; $\Delta y = y_j - y_0$

Para estados de deformación más complejos será necesario emplear funciones de segundo orden. Por tanto, las coordenadas del punto (x' , y') en la deformada puede quedar localizado entre píxeles de manera que, antes de la correlación, la intensidad de estos puntos debe ser obtenida empleando un esquema de interpolación subpíxel. Los esquemas de interpolación de alto orden tienen mayor precisión a cambio de un mayor coste computacional. A continuación, se puede ver un ejemplo de una gráfica de deformación lineal de un punto a lo largo del ensayo.

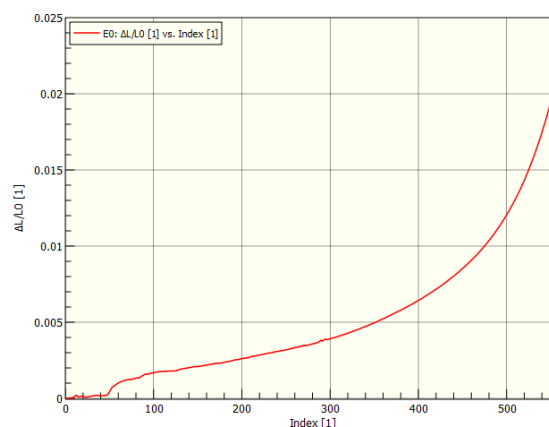


Ilustración 17- Gráfica de deformación a lo largo de un ensayo de tracción

3. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

En la actualidad se encuentra en pleno auge la fabricación aditiva dado su uso tanto para materiales plásticos como metales. Anteriormente se han explicado los beneficios de estas tecnologías, pero aún están en desarrollo. Por esta razón, es necesario contrastar la información que otorga el fabricante con los datos obtenidos en ensayos de laboratorio y obtener unas propiedades mecánicas fiables para futuras aplicaciones industriales.

Debido a ello, el presente trabajo fin de máster pretende contrastar las propiedades mecánicas de pieza impresa en acero mediante FDM realizando una caracterización mecánica avanzada y utilizando DIC para las medidas precisas de las deformaciones experimentada por los especímenes. Para ello se realizan ensayos a tracción y a cortante según los estándares internacionales.

Dado que el presente trabajo forma parte de la formación académica del autor como Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Industrial se establecen otros objetivos además del principal, de carácter académico como son:

- Aprender a buscar e interpretar normativa internacional estandarizada para diseñar un programa experimental de caracterización mecánica de un material compuesto metálico con matriz o base de polímero.
- Entender las principales tecnologías de fabricación aditiva, especialmente la empleada en este TFM.
- Realizar ensayos de caracterización mecánica avanzada en laboratorio.
- Conocer y utilizar la Correlación Digital de Imágenes (DIC) como herramienta para obtener deformaciones en piezas sometidas a esfuerzos.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para diseñar los programas experimentales se han seguido las indicaciones de las normas internacionales ASTM tanto para el ensayo de tracción como para el ensayo de cortante.

Estas normas han sido creadas y estudiadas por expertos en la materia para garantizar resultados válidos. En ellas, se definen formas y dimensiones de las probetas como condiciones del ensayo (velocidad, temperatura, etc.). Además, indican las fórmulas necesarias para realizar los cálculos de los parámetros que caracterizan a los materiales. Los programas experimentales diseñados son:

- Programa 1: Ensayo de tracción (ASTM D3039/D3039M-14).
- Programa 2: Ensayo de cortante (ASTM D7078/D7078M-12).

A continuación, se explicarán las etapas que constan ambos programas experimentales.

4.1 Diseño de las probetas

➤ Programa 1 (Tracción)

Para este programa se utilizó la norma ASTM D3039 de ensayo de tracción para materiales compuestos con matriz de polímero, la cual nos deja mucha libertad a la hora de diseñar la probeta, eso sí, comenta que es necesario un mínimo de cinco especímenes para asegurar buenos resultados.

Las probetas diseñadas son tipo hueso y se cumplieron todos los requerimientos expuestos en la siguiente tabla.

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

Tabla 1- Requerimientos geométricos para las probetas de tracción

Como se puede observar los valores de anchura y grosor de la probeta nos los deja libre, siempre y cuando la forma de esta sea rectangular. También es necesario tener una longitud mínima que sea igual a la distancia de agarre sumado a dos veces la anchura y sumado a la longitud de la galga, que en este caso no se usarán.

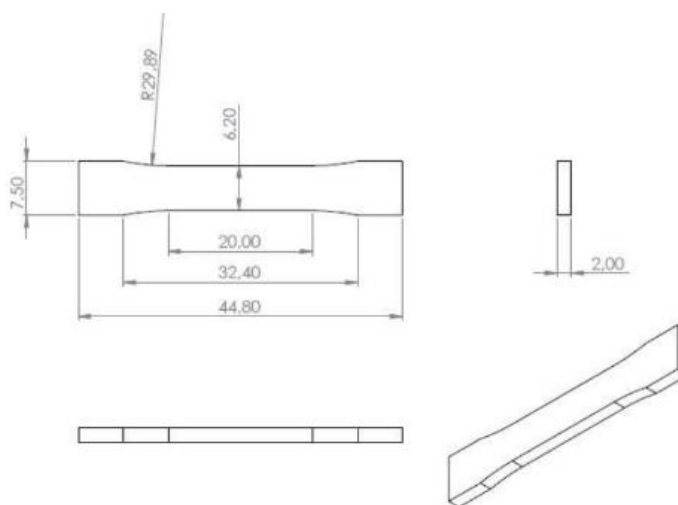


Ilustración 18- Dimensiones de las probetas de tracción

Son unas dimensiones pequeñas, pero como estamos ante un material muy caro, se intentó reducir al máximo el material necesario para su fabricación. Al área rectangular en el cuello de la probeta es de 12,4 mm².

➤ Programa 2 (Cortante)

Para las probetas de cortante la norma utilizada fue la ASTM D7078, la cual da las indicaciones necesarias para diseñar un buen ensayo de cortante en materiales compuestos.

En este caso la normativa es mucho más restrictiva con las dimensiones geométricas de las probetas dentadas.

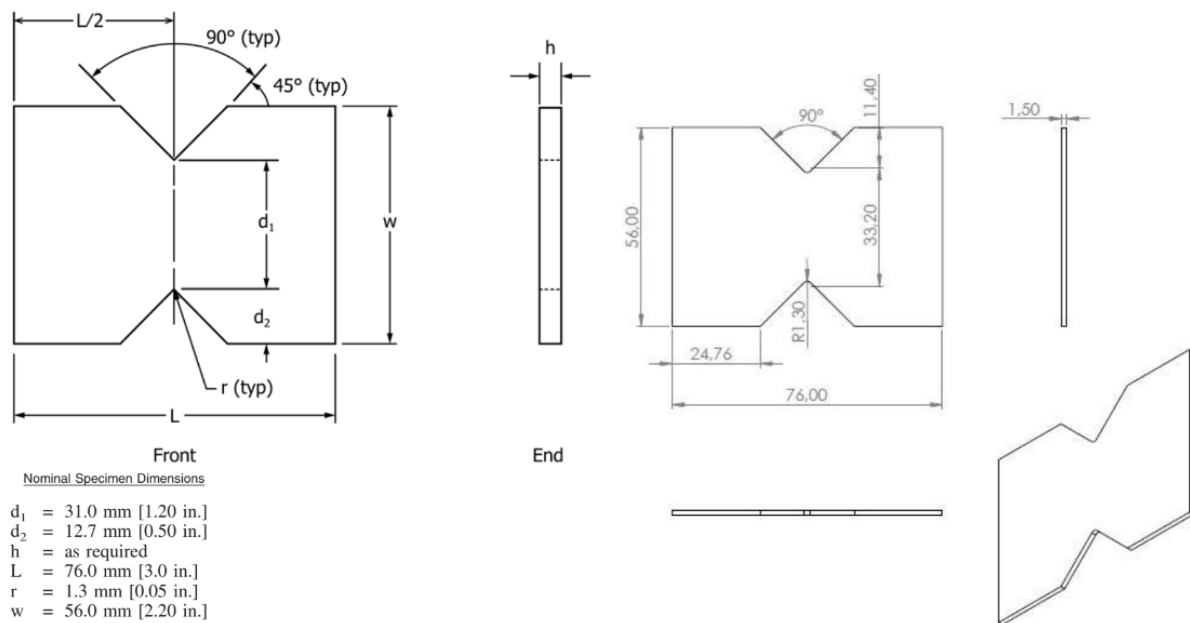


Ilustración 19- Requerimientos geométricos para las probetas de cortante

Se puede ver como el único parámetro libre es el espesor de la probeta. Para este estudio se diseñaron con un espesor de 1,5mm, puesto que estamos ante un material que tiene un precio elevado y el tamaño de las probetas es mayor que las probetas de tracción.

4.2 Fabricación de las probetas

Para la impresión y sinterizado de las probetas se contó con el sistema Markforged Metal X del que dispone la empresa INMACO ubicada en Granada la cual se dedica a la fabricación y mecanizado de piezas metálicas, el material seleccionado fue un acero de alta resistencia empleado en herramientas, concretamente el filamento de acero inoxidable 17-4 PH.

Este tipo de filamentos tiene el material metálico en forma de microesferas dentro de una base polimérica, lo que permite extruirlo con facilidad, pero manteniendo las propiedades metálicas del metal. Las etapas para obtener la pieza final son:

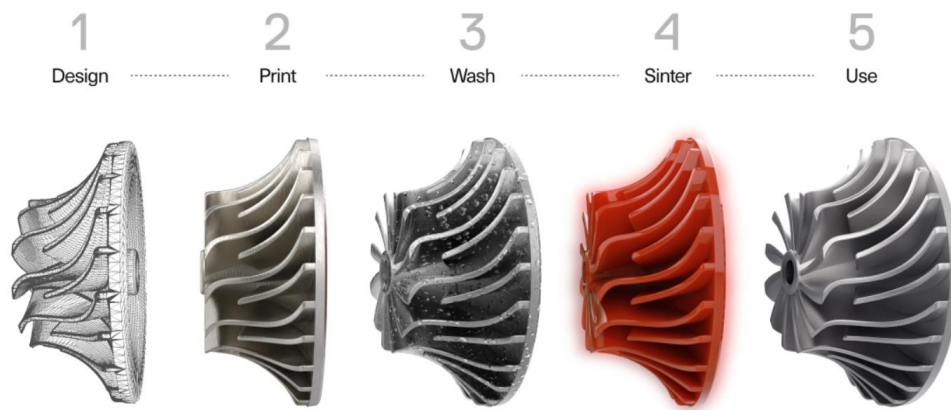


Ilustración 20- Etapas de impresión FDM de materiales metálicos [5]

➤ Impresión

Después de obtener el modelo mediante un software CAD, el primer paso es imprimir la pieza. Como se mencionó anteriormente, la impresora empleada fue la *Markforged Metal X* y el material el acero inoxidable 17-4 PH.

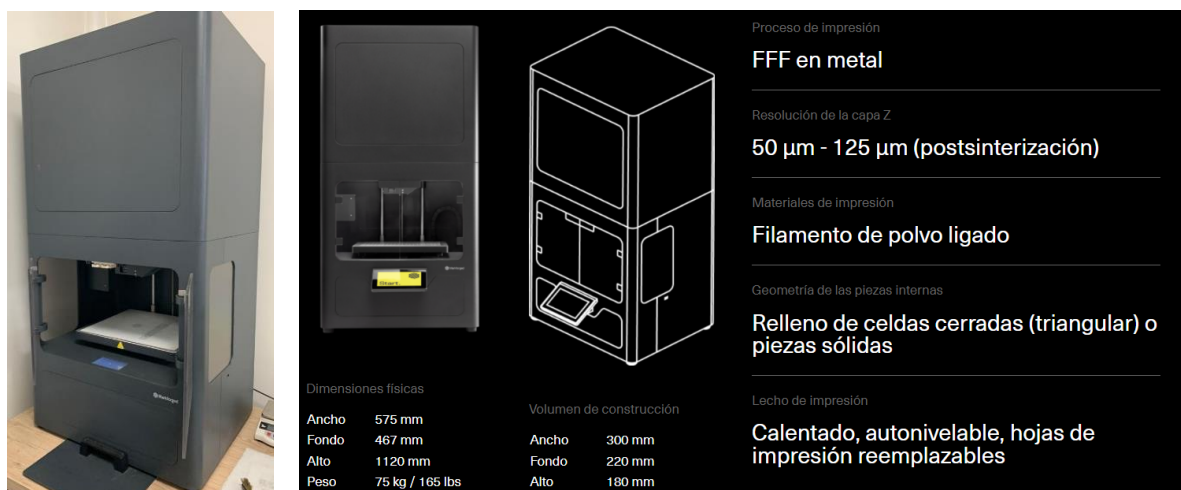


Ilustración 21- Impresora Markforged Metal X

Los parámetros de impresión utilizados fueron los estándares del fabricante, como son 0.125 mm de altura de capa, velocidad de impresión de 40mm/s, 100% de relleno de la pieza y 3 perímetros para las paredes de la pieza. Además, fue necesario usar una balsa para evitar deformaciones durante la impresión.

El tiempo empleado en esta etapa fue de 2h para las probetas de tracción y casi 6 horas para las de cortante.



Composition	Amount
Chromium	15-17.5%
Nickel	3-5%
Copper	3-5%
Silicon	1% max
Manganese	1% max
Niobium	0.15-0.45%
Carbon	0.07% max
Phosphorous	0.04% max
Sulfur	0.03% max
Iron	bal

Ilustración 22- Composición del acero inoxidable 17-4 PH

➤ Lavado

La siguiente etapa es la de lavado. En ella se usa una máquina del mismo fabricante llamada *Wash-1*. Un sistema desaglutinante basado en disolventes, principalmente el Opteon SF-79, un fluido de alto rendimiento diseñado para proporcionar una potencia de limpieza superior, mayor eficiencia y seguridad de forma sostenible con el medioambiente. La máquina cuenta con ventilación simple y es fácil de usar.

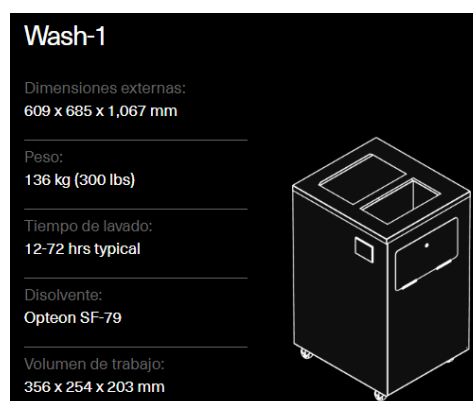


Ilustración 23- Máquina de lavado

Al final de esta etapa la mayor parte de la matriz polimérica es eliminada. El tiempo necesario para un lavado completo es de 12 horas por cesta de piezas.

➤ Sinterizado

Por último, una vez tenemos la pieza lavada, es necesario someterla a un tratamiento térmico para obtener las propiedades mecánicas finales del material. El horno empleado es el del fabricante Markforged llamado *Sinter-1*. Es un horno tubular altamente optimizado. Ofrece un sinterizado y unos tiempos de ejecución fiables y punteros, y están equipados con funciones de seguridad avanzadas.

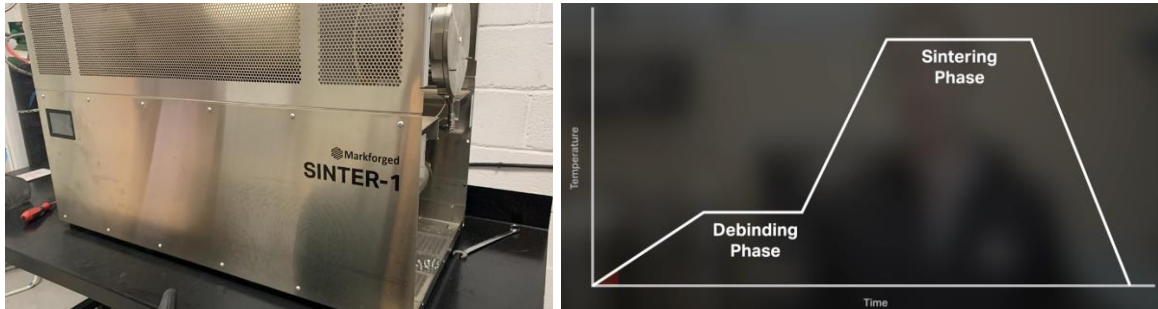


Ilustración 24- Horno Sinter-1 y ciclo de sinterizado

En la ilustración anterior se puede observar el ciclo térmico realizado a las piezas. En primer lugar, se calienta hasta una temperatura moderada para realizar el desaglomerado. Posteriormente se eleva la temperatura hasta unos 1200 °C donde se sinteriza la pieza final. El tiempo total del ciclo es de unas 26 horas por carga. No se tiene información detallada de este proceso puesto que esta patentado por la marca.

Además, es necesario que dentro del horno exista una atmosfera inerte. Para ello se emplean dos gases que son inyectados en la cámara del horno, el hidrogeno y el argón.



Ilustración 25- Gases para atmósfera inerte

El resultado final de todo este proceso se puede apreciar en la siguiente ilustración.



Ilustración 26- Resultado final del proceso completo de fabricación de las probetas

En un principio la idea era imprimir para ambos ensayos las probetas orientadas en las tres direcciones de los ejes cartesianos, pero debido a dificultades técnicas, las probetas de tracción solo se pudieron orientar en la dirección X (tumbada) y en la Y (de canto). Para las probetas de cortante solo fue posible fabricarlas en la dirección X (Tumbada).



Ilustración 27- Probetas de tracción impresas en dirección X e Y

Los problemas que ocurrieron cuando se intentaron imprimir en las demás direcciones se puede apreciar en la Ilustración 28. En la izquierda se puede ver que las piezas se deshacían en el horno, y en la derecha se puede ver que las probetas de cortante impresas en la dirección Z se deformaban durante el proceso de sinterizado, pese a haber realizado unos soportes que sirviesen para darle apoyo a la pieza durante esta etapa.

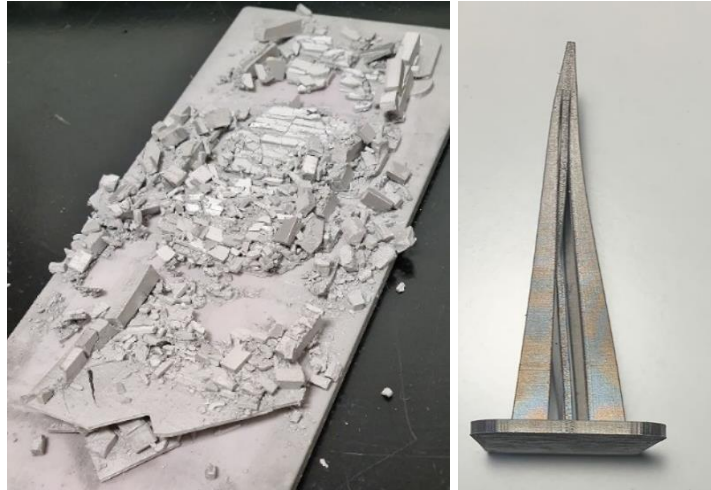


Ilustración 28- Piezas fallidas durante impresión 3D

Estos problemas de impresión fueron transmitidos al fabricante y se llegó a la conclusión que las piezas con pequeño espesor y demasiado altas son casi imposibles de imprimir correctamente.

4.3 Defectos asociados a la contracción térmica del material

A continuación, se va a comparar las dimensiones obtenidas al final del proceso de fabricación con las medidas diseñadas en el programa CAD. También se calcula en porcentaje, la diferencia que existe entre área diseñada y medida con la siguiente expresión:

$$\%error = \frac{|Área\ diseño - Área\ real|}{Área\ diseño} \cdot 100$$

➤ Programa 1 (tracción)

	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Ancho del cuello (mm)	Área (mm ²)	%Error
Diseño	44,80	2,00	6,20	12,40	-
Espécimen 1	45,51	2,38	6,38	15,18	22,45
Espécimen 2	45,50	2,43	6,45	15,67	26,40
Espécimen 3	45,50	2,35	6,40	15,04	21,29
Espécimen 4	45,30	2,15	6,38	13,72	10,62
Espécimen 5	45,30	2,13	6,41	13,65	10,11

Tabla 2- Dimensiones de las probetas de tracción impresas en la dirección X

Se pueden apreciar unos errores bastante elevados entre los valores finales y los que se diseñaron en un principio. El principal motivo de que ocurra esto es que durante la fase de sinterizado las probetas reducen su tamaño. Con el software de Markforged se compensaron estas reducciones, pero al final hay bastante error. De todas formas, esto no supondrá ningún problema puesto que en los cálculos realizados se han empleado las dimensiones reales de las probetas.

	Longitud (mm)	Espesor(mm)	Ancho del cuello(mm)	Área(mm ²)	%Error
Diseño	44,80	2,00	6,20	12,40	-
Espécimen 1	45,2	2,14	6,43	13,76	10,97
Espécimen 2	45,38	2,03	6,58	13,36	7,72
Espécimen 3	45,14	2,12	6,45	13,67	10,27
Espécimen 4	45,26	2,02	6,44	13,01	4,91
Espécimen 5	45,25	2,05	6,44	13,20	6,47

Tabla 3- Dimensiones de las probetas de tracción impresas en la dirección Y

En la dirección Y parece que el software hizo un mejor trabajo, pero sin duda este aspecto puede ser una condición limitante para el uso de esta tecnología en futuras aplicaciones industriales.

➤ Programa 2 (cortante)

	Ancho (mm)	Alto (mm)	Espesor (mm)	Cuello (mm)	Área (mm ²)	%Error
Diseño	76,00	56,00	1,50	30,60	45,90	-
Espécimen 1	76,76	56,66	1,76	31,05	54,65	19,06
Espécimen 2	77,09	56,73	1,82	31,06	56,53	23,16
Espécimen 3	76,8	56,59	1,8	31,12	56,02	22,04
Espécimen 4	76,77	56,76	1,81	31,2	56,47	23,03
Espécimen 5	76,71	56,6	1,8	30,9	55,62	21,18

Tabla 4- Dimensiones de las probetas de cortante impresas en la dirección X

De nuevo ocurre algo similar a lo que ocurría con el ensayo de tracción.

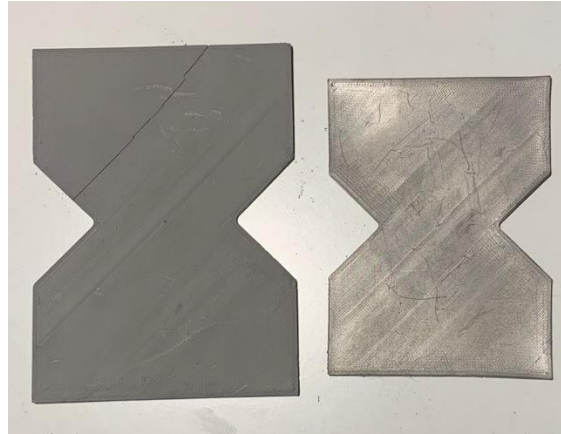


Ilustración 29- Reducción de tamaño después del sinterizado

4.4 Preparación de las probetas

Previamente a los ensayos, se tuvieron que preparar las probetas como se puede apreciar en Ilustración 16 mediante un moteado, el cual consiste en darle dos capas de pintura blanca sobre las piezas y cuando se sequen, pulverizar gotas de pintura negra para crear los patrones. Estos son necesarios para ser reconocibles en las imágenes tomadas durante los ensayos y que a posteriori el software VIC 2D sea capaz de calcular las deformaciones sufridas.

4.5 Ensayos

➤ Programa 1 (tracción)

Como ya se mencionó anteriormente la norma seguida para la realización del ensayo fue la ASTM 3039. Las condiciones ambientales del laboratorio de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad de Jaén eran temperatura y humedad ambiente (20°C y 45% de humedad).

La máquina de tracción usada para el ensayo fue la Instron 5567A con capacidad máxima de 30 kN. Además, fue necesario utilizar un ordenador de sobremesa para la recolección de datos de segundo en segundo que duro el ensayo y una cámara de alta calidad Basler ACE para la toma de las imágenes también cada segundo del ensayo, para posteriormente poder cruzar los datos de fuerza ejercida por la maquina y la deformación presentada en las probetas.



Ilustración 30- Montaje del ensayo de tracción

En la normativa ASTM dice que hay dos formas de realizar el ensayo, una mediante control de tensión y otra mediante velocidad constante del ensayo. En este caso se realizó a velocidad constante de ensayo de 2 mm/min.

También recomienda aclimatar las piezas en caso de estar almacenadas a una temperatura diferente a la del ensayo (no aplica) y la forma de colocar la probeta es la siguiente: Colocar la probeta en los amarres de la máquina, teniendo cuidado de alinearla con el eje en el que va a actuar la fuerza. Por último, apretar las mordazas lo necesario para que no resbale durante la prueba. El ensayo termina cuando la probeta rompe o falla.

➤ Programa 2 (cortante)

Para este ensayo se aplicó la normativa ASTM D7078. Las condiciones ambientales eran las mismas que las del ensayo de tracción, pero se tuvo que realizar en el laboratorio de Ciencias Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Jaén, puesto que fue necesario utilizar una máquina hidráulica de mayor potencia.

La máquina empleada para la prueba fue la MTS 810 con capacidad máxima de 500 kN. Además, fue necesario utilizar un ordenador de sobremesa para la

recolección de datos de segundo en segundo que duro el ensayo y una cámara de alta calidad Basler ACE para la toma de las imágenes también cada segundo del ensayo, para posteriormente poder cruzar los datos de fuerza ejercida por la maquina y la deformación presentada en las probetas.

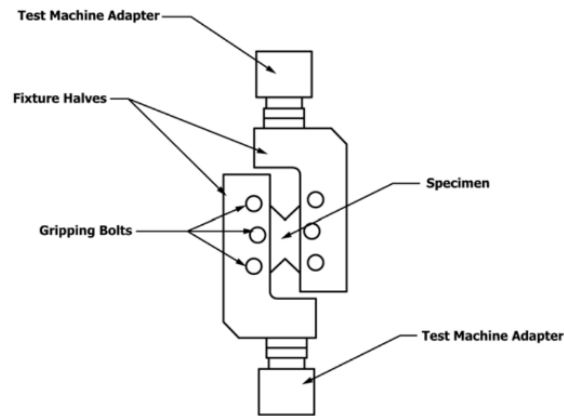


Ilustración 31- Esquema de las mordazas

En la Ilustración 31 se puede observar el esquema de las mordazas necesarias para el ensayo de cortante, el cual está regulado por la normativa ASTM previamente nombrada.



Ilustración 32- Máquina usada para el ensayo de cortante (izquierda) y mordazas (derecha)

De nuevo hay dos opciones para configurar la velocidad a la que se realizará el ensayo, controlado por tensiones o a velocidad constante. Se realizó a velocidad constante de 2 mm /min, tal y como se indica en la normativa.

4.6 Obtención de las deformaciones mediante DIC

Esta etapa del programa es la misma para ambos ensayos y se realizó de la siguiente forma:

1. **Introducción de las imágenes** en el software VIC 2D desarrollado por la empresa Correlated Solutions Inc: mediante la opción “Speckle images”, importamos las imágenes de un ensayo y generamos un nuevo proyecto.
2. **Calibración de distancia:** este paso es necesario para que el programa sea capaz de determinar distancias en las imágenes. Para ello lo más fácil es introducir de manera manual la anchura de la probeta en la primera imagen tomada, puesto que aún no se ha deformado.

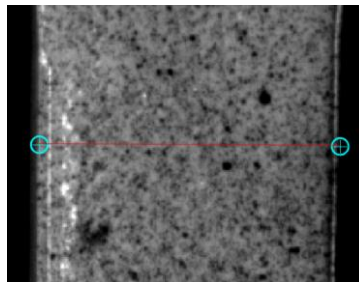


Ilustración 33- Calibración de dimensiones en VIC 2D

3. **Configuración del área a analizar:** aquí simplemente realizamos un rectángulo con el área de la probeta que queremos que el programa analice.

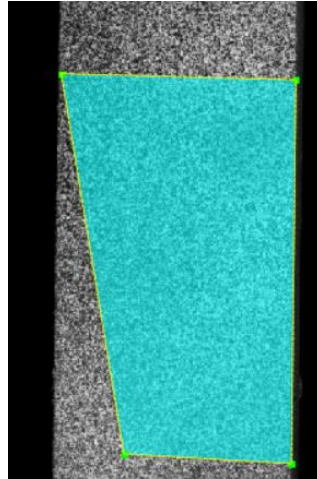


Ilustración 34- Área de interés a analizar en VIC 2D

4. **Análisis de sensibilidad:** este paso se realizó para ver la influencia que tenía la configuración del mallado del área a estudiar, por un lado, en el tiempo de computación y por otro, en el error cometido.

Los dos parámetros a controlar son el “subset” y el “step” que definen el mallado. El subset controla el área de la imagen que se usa para rastrear el desplazamiento entre imágenes. El tamaño del subconjunto debe ser lo suficientemente grande para garantizar que haya un patrón suficientemente distintivo contenido en el área utilizada para la correlación.

El step controla el espaciado de los puntos que se analizan durante la correlación. Si el Step elegido es 1, se realiza un análisis de correlación en cada píxel dentro del área de interés. Un tamaño de paso de 2 significa que se llevará a cabo una correlación en cada píxel tanto en el horizontal como en la vertical dirección. El tiempo de análisis varía inversamente con el cuadrado del tamaño del paso; es decir, un tamaño de paso de 1 tarda 25 veces más en analizarse que un tamaño de paso de 5.

Por lo tanto, en primer lugar, se fijó el step en 4, y se fue variando el subset con los siguientes valores: 25, 31, 35, 43, 47, 51. El resultado apenas varió en los diferentes cálculos, así que se escogió un subset de 47 para asegurar tener un área suficiente, ya que apenas afectaba al tiempo de computación.

Finalmente, con el subset fijado en 47, se fue variando el step con los siguientes valores: 4, 6, 8, 10, 12, 22 y se vio que conforme se iba aumentando el step, aparecía más ruido en los resultados, por lo que se dejó fijado en 4.



Ilustración 35- Configuración del mallado en VIC 2D

5. **Procesado de imágenes:** en esta etapa el programa tardaba más o menos tiempo en función de los parámetros configurados anteriormente, el número de imágenes introducidas o tipo de moteado.
6. **Postprocesado:** una vez finalizado el procesado de imágenes, había que aplicarle un filtro con la opción “Smooth” para reducir el ruido y eliminar los desplazamientos sufridos por las probetas como solido rígido con la opción “Remove rigid motion”.
7. **Cálculo de deformaciones:** mediante la función “Inspect Extensometers” se puede obtener las deformaciones usando extensómetros virtuales en las imágenes procesadas. Y con la opción “Plot Extractions” se puede graficar la deformación sufrida por la pieza segundo a segundo como se puede ver en Ilustración 17. Finalmente se exporta la información en formato “.csv” para poder cruzarlo con los datos de fuerza ejercida por la máquina.

4.7 Fundamentos de los ensayos. Propiedades mecánicas

A continuación, se van a explicar los marcos teóricos de ambos programas, es decir, se expondrán la metodología y las fórmulas empleadas para el cálculo de los parámetros característicos.

➤ **Programa 1 (tracción)**

Para el ensayo de tracción se debe tener claro cuáles son las fuerzas ejercidas sobre las probetas. Se trata un ensayo donde la fuerza se aplican de manera axial, con el fin de obtener el comportamiento a tracción del material.

En un sólido libre sometido a fuerza normal sobre un área infinitesimal, aparecen tensiones internas en la dirección contraria a la fuerza aplicada para mantener el sistema en equilibrio.

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \rightarrow dP = \sigma dA \quad (\text{Ecuación 3})$$

Integrando la ecuación 3 se obtiene:

$$P = \int \sigma dA \quad (\text{Ecuación 4})$$



Ilustración 36- Carga axial sobre sólido libre

Asumiendo distribución uniforme de tensiones sobre la sección transversal, la expresión anterior puede simplificarse a:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

σ =Tensión normal (MPa)

P =Fuerza normal (N)

A =Área transversal (mm²)

Por otro lado, la deformación causada por esta fuerza normal es adimensional puesto que se obtiene dividiendo la variación de longitud de la probeta entre su longitud inicial.

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

ε =Deformación

ΔL =Variación de longitud (mm)

L_0 =Longitud inicial (mm)

Durante el ensayo de tracción, la probeta sufre deformaciones fuera de plano o en el plano transversal, cuya magnitud se encuentra relacionada con las deformaciones longitudinales por medio del coeficiente de Poisson. Su signo negativo indica que esta magnitud tiene sentido contrario a la deformación longitudinal, provocando un estrechamiento en la probeta.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

ν =Coeficiente de Poisson

ε_x =Deformación longitudinal

$\varepsilon_{y,z}$ =Deformación transversal

El coeficiente de Poisson se relaciona con el módulo E de elasticidad y con el módulo de rigidez G, mediante la siguiente expresión:

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \rightarrow G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Al estar ensayado probetas de espesor delgado, se puede simplificar a un problema de tensión plana. Este tipo de problemas de la elasticidad plana se caracteriza por tener tensiones nulas en la dirección del espesor, aunque si existirán deformaciones en esta dirección.

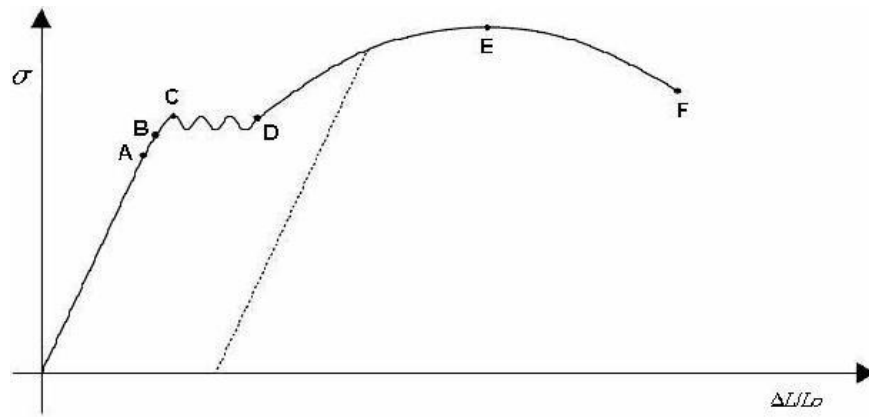


Ilustración 37- Curva tensión deformación

La Ilustración 37 muestra la curva tensión deformación típica del acero sometido a tracción. En ella se pueden ver varias regiones fundamentales, la región elástica está comprendida desde el origen hasta el punto B y la región plástica va desde el punto B hasta el punto F.

Si una pieza sólo es sometida a una tensión que se queda en la zona elástica, esta será capaz de recuperar su forma original cuando esta cese. En el caso de superar el punto B y entrar en la zona plástica, la pieza sufrirá lo que se conoce como deformaciones permanentes, es decir, la pieza quedara deformada cuando la carga cese.

La ley de Hooke relaciona las tensiones y deformaciones en la zona lineal o elástica según la siguiente expresión:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

E =Módulo de elasticidad o módulo de Young (MPa)

σ =Tensión (MPa)

ε =Deformación

Además, existen diferentes zonas en la región plástica:

- Fluencia entre B y D: se producen grandes deformaciones sin apenas variación en la carga, pudiéndose observar un comportamiento oscilatorio entre el límite de fluencia superior e inferior. Esto ocurre en acero dúctiles con bajo contenido de carbono, pudiendo ser inexistente.
- Endurecimiento por deformación entre D y E: etapa en la que se produce un endurecimiento en el material debido al incremento de la densidad de dislocaciones interna inducidas por la deformación plástica.
- Estricción entre E y F: Tras sobrepasar la carga máxima del ensayo, las deformaciones se concentran en un punto de la probeta, reduciendo su sección efectiva hasta que se produce la rotura en el punto F.

El módulo de Young se obtiene de representar la curva tensión-deformación y sacar la pendiente de la zona lineal mediante una interpolación lineal.

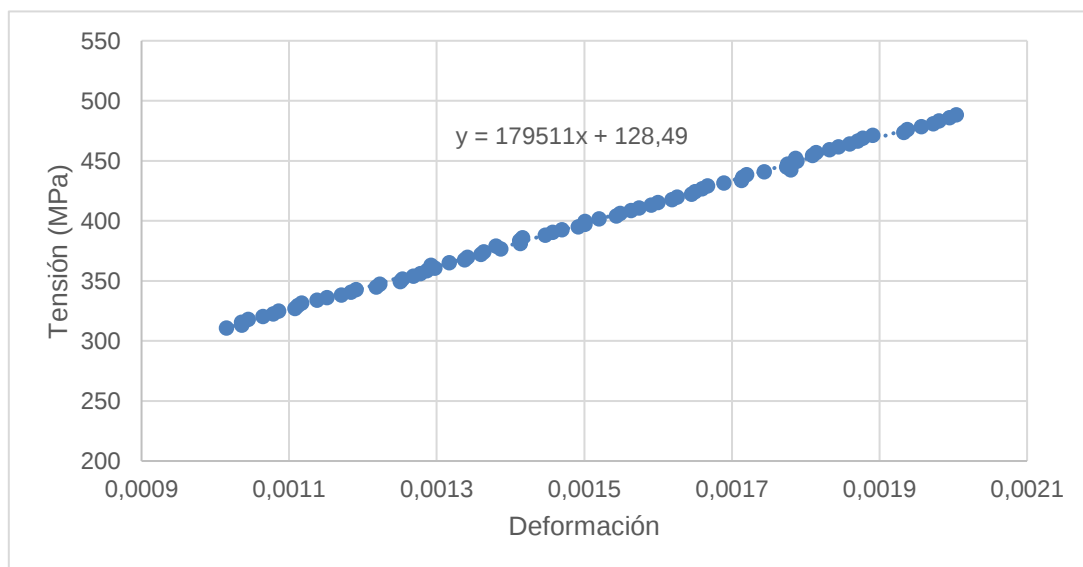


Ilustración 38- Cálculo del módulo de Young a partir de los datos del ensayo de tracción

En cuanto al límite elástico se ha empleado el método de alargamiento plástico preestablecido del 0,2%, el cual consiste en dibujar una línea recta paralela a la zona lineal de la curva tensión-deformación. La ordenada del punto de corte de dicha recta con la curva tensión-deformación determinara el límite elástico convencional.

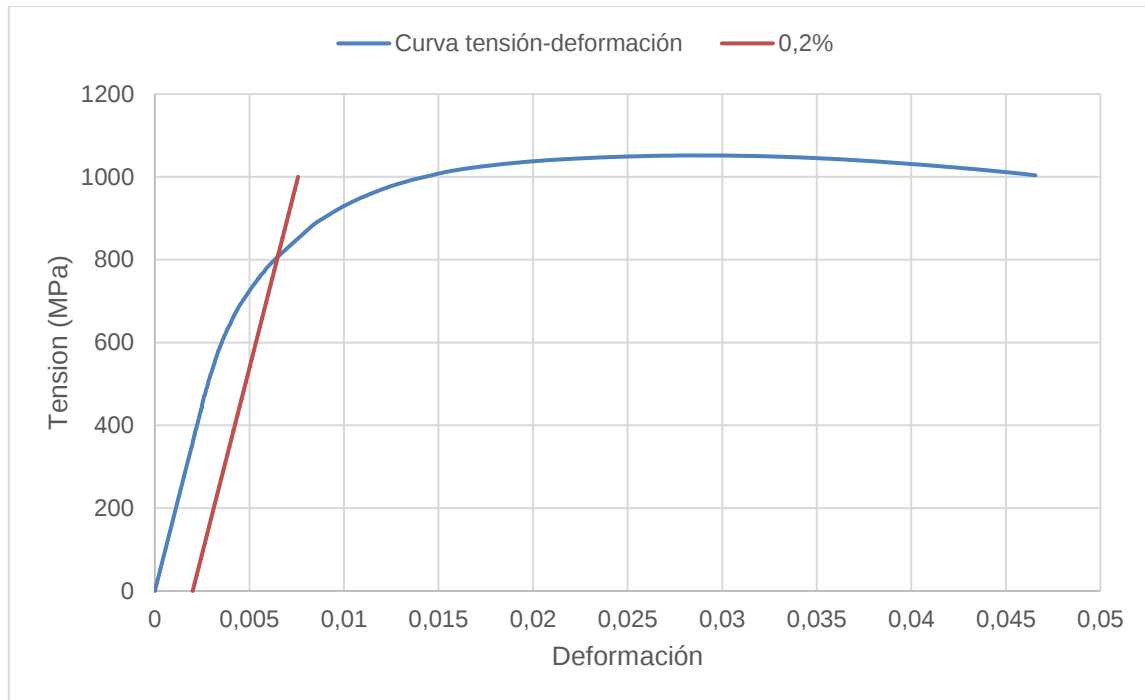


Ilustración 39- Cálculo del límite elástico convencional

Los valores de tensión máxima, tensión última de rotura y deformación última se pueden obtener directamente de la curva tensión-deformación de cada probeta. El módulo de Poisson se obtendrá empleando la *Ecuación 8*.

➤ **Programa 2 (cortante)**

El ensayo de cizallamiento se utiliza para determinar la cantidad de fuerza horizontal que un material puede soportar antes de romperse. En este ensayo se generan fuerzas tangenciales al área de aplicación. Las tensiones cortantes son paralelas al plano sobre el que actúan. Estas provocan deformaciones en el cuadrado, convirtiéndolo en un paralelogramo de aristas paralelas e iguales a dos, tal y como se puede ver en la siguiente ilustración:

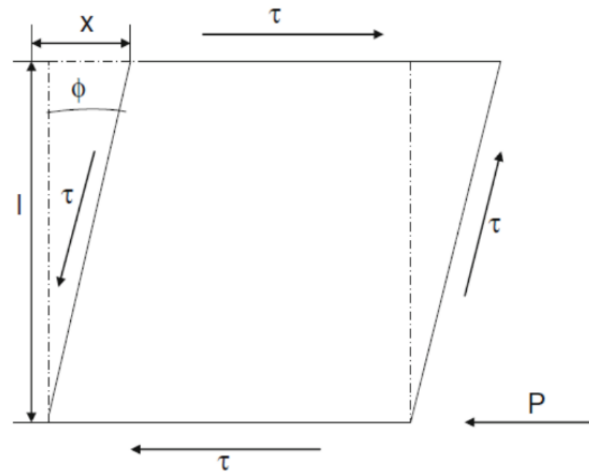


Ilustración 40- Diagrama de esfuerzo cortante

Si la distribución de tensiones es uniforme, se puede obtener las expresiones teóricas de esfuerzos cortante de manera similar a las del ensayo de tracción.

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$\gamma = \frac{x}{l} = \tan \phi \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

τ = Fuerza tangencial (N)

A = Área paralela (mm²)

γ = Deformación cortante

ϕ = Ángulo de deformación (°)

El módulo de elasticidad transversal se define como la relación entre las tensiones cortantes y las deformaciones sufridas en la zona lineal de la curva tensión-deformación.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Para poder calcular la deformación cortante, mediante el software VIC 2D hay que colocar dos extensómetros virtuales. Siguiendo la norma ASTM D7078 refleja que se deben disponer a $\pm 45^\circ$ con respecto al eje vertical de carga, tal y como se puede ver en la siguiente ilustración.

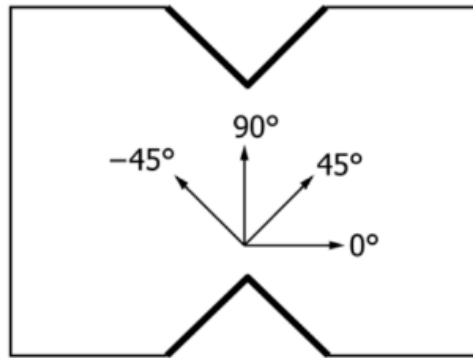


Ilustración 41- Esquema de colocación de extensómetros para el ensayo de cortante

De esta forma, la deformación cortante se obtiene con la siguiente expresión:

$$\gamma = |\varepsilon_{+45}| + |\varepsilon_{-45}| \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

γ = Deformación cortante

ε_{+45} = Deformación del extensómetro 1

ε_{-45} = Deformación del extensómetro 2

Por lo tanto, el módulo de rigidez transversal se calculará de dos formas. Una de manera experimental, es decir a partir de los datos de tensión y deformación, se calculará la pendiente de la zona lineal y otra de manera teórica, empleando la Ecuación 8.

5. RESULTADOS

En este punto se expondrá el comportamiento mecánico del acero inoxidable 17-4 ph de Markforged impreso con su máquina Metal X tanto a tracción como a cortante.

Como ya se introdujo anteriormente, del ensayo de tracción se extraerá los parámetros de módulo elástico E , límite elástico, tensión máxima, tensión de rotura, deformación última y coeficiente de Poisson, ν . Por otro lado, del ensayo de cortante se extraerá el parámetro del módulo de elasticidad transversal, G .

Finalmente se comparan los resultados obtenidos con los datos aportados por el fabricante, así como el comportamiento del material en función de la dirección de impresión escogida.

5.1 Ensayo de tracción

Los ensayos se realizaron según el programa experimental 1, diseñado en el presente trabajo. En primer lugar, se expondrán los datos de ensayar cinco probetas impresas en la dirección X y posteriormente, las cinco impresas en la dirección Y.

➤ Dirección X

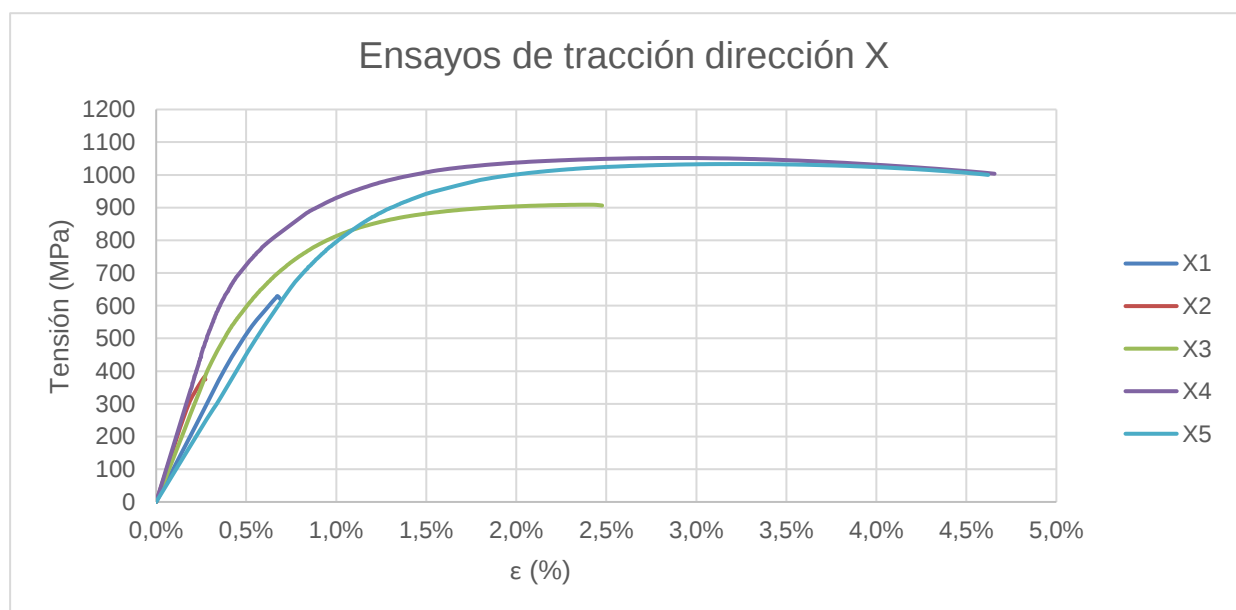


Ilustración 42- Gráficas tensión-deformación dirección X

Como se puede apreciar en la *Ilustración 42*, hay dos probetas, concretamente la X1 y la X2 que sufrieron inconvenientes durante el ensayo. La probeta X1 rompió por la zona de la cabeza, es decir, por donde se estaba sujetando. En la probeta X2 la mordaza resbaló durante el ensayo, cuando ya había sufrido deformación plástica.

Estos percances hicieron que estas dos probetas sólo sirviesen para sacar el módulo elástico porque no fueron capaces de avanzar en la zona plástica. Con el resto de las probetas, si se consiguió llegar hasta la rotura del material y caracterizarlo por completo.

En la siguiente ilustración se pueden ver representada las zonas elásticas de las cinco probetas. Además, se puede observar la ecuación de la recta cuya pendiente representa el Módulo de Young. Estos valores oscilan desde 90 a 179 GPa.

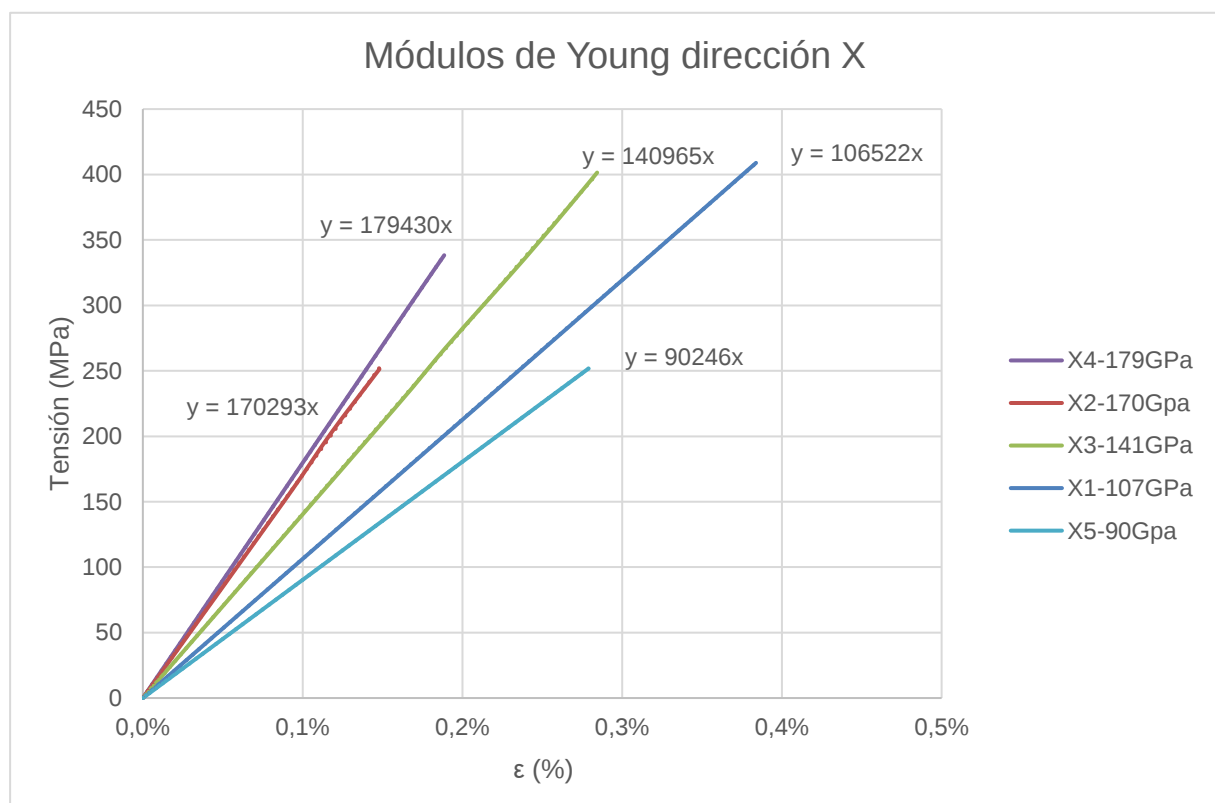


Ilustración 43- Módulos de elasticidad en dirección X

Recogiendo todos los resultados de las gráficas anteriores en una tabla se puede observar los siguientes resultados:

Ensayos de tracción en dirección X

	Módulo de Young (GPa)	Límite elástico (Mpa)	Tensión máxima (Mpa)	Tensión de rotura (Mpa)	Deformación última (%)	Coefficiente de Poisson
<i>Probeta 1</i>	107	-	629	605	0,69	-
<i>Probeta 2</i>	170	-	383	360	0,27	0,276
<i>Probeta 3</i>	141	712	909	900	2,47	0,222
<i>Probeta 4</i>	179	800	1052	1003	4,65	0,323
<i>Probeta 5</i>	90	851	1033	1000	4,7	0,235
<i>Desv. típica (%)</i>	25,2	7,3	25,9	26,1	47,7	15,2
Media	136,7	787,7	998,0	967,7	3,9	0,264

Tabla 5- Caracterización a tracción del material en la dirección X

Se pueden observar unos valores medios similares a los dados por el fabricante, aunque se comparan en siguientes apartados.

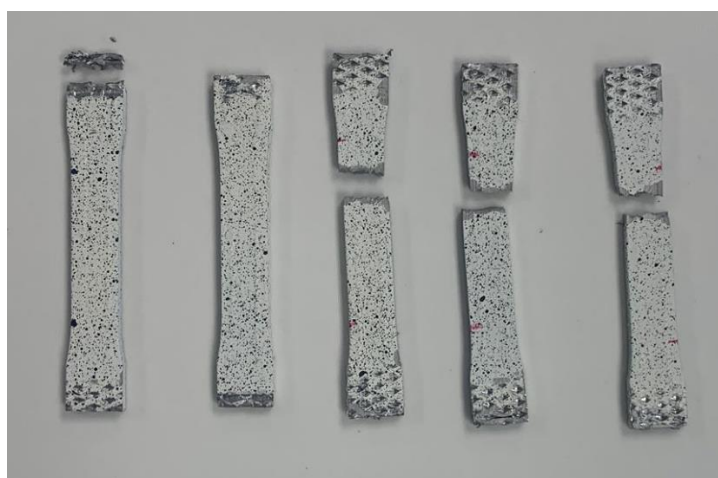


Ilustración 44- Fractura de las probetas impresas en la dirección X

➤ Dirección Y

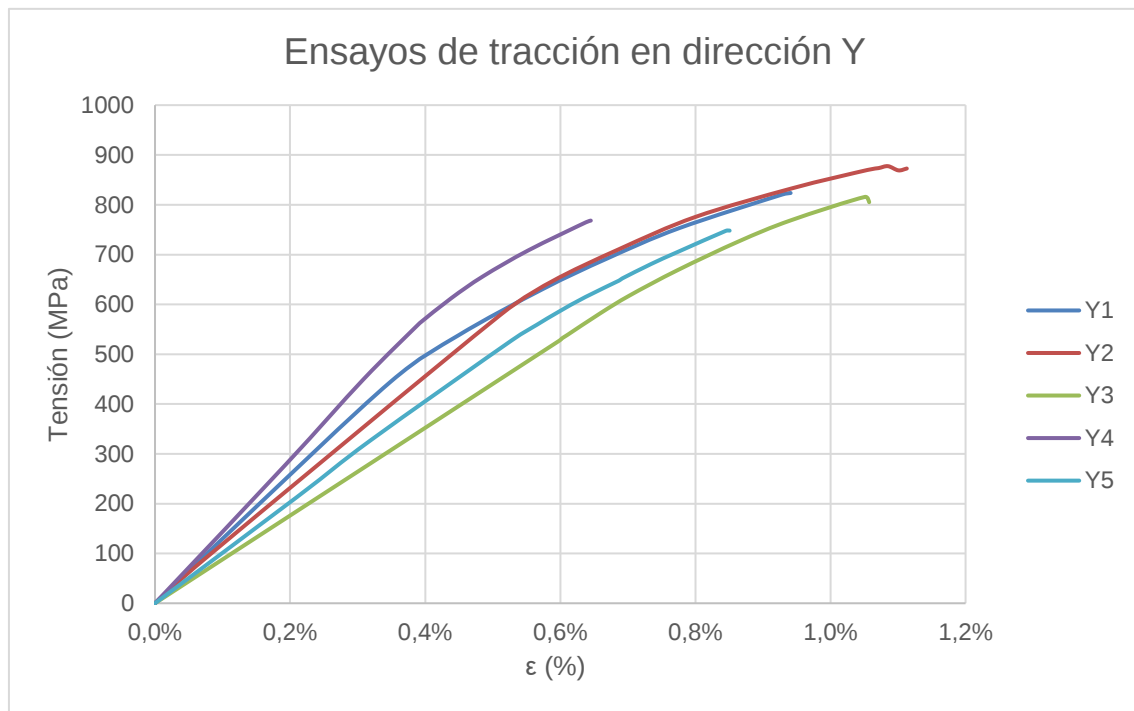


Ilustración 45- Gráficas tensión-deformación dirección Y

En estos ensayos se obtuvieron unos resultados semejantes en las 5 probetas. Todas ellas rompieron por la zona donde se estaban sujetando en vez de romper por el cuello de la probeta, que es la zona con menor sección y lugar donde teóricamente rompería. El motivo por el que sucedió esto, pudo haber sido que hubo que imprimirlas con soportes, y estos al final del proceso de fabricación se quitaron mediante mecanizado el cual seguramente creara micro fisuras que actuaron como concentradores de tensiones, disminuyendo la zona plástica del material. Por tanto, rompieron antes por fisura que por plasticidad del material.

Al igual que en la dirección X, en la siguiente ilustración se pueden ver representadas las zonas elásticas de las cinco probetas. Los módulos de Young van desde 88 a 145 GPa.

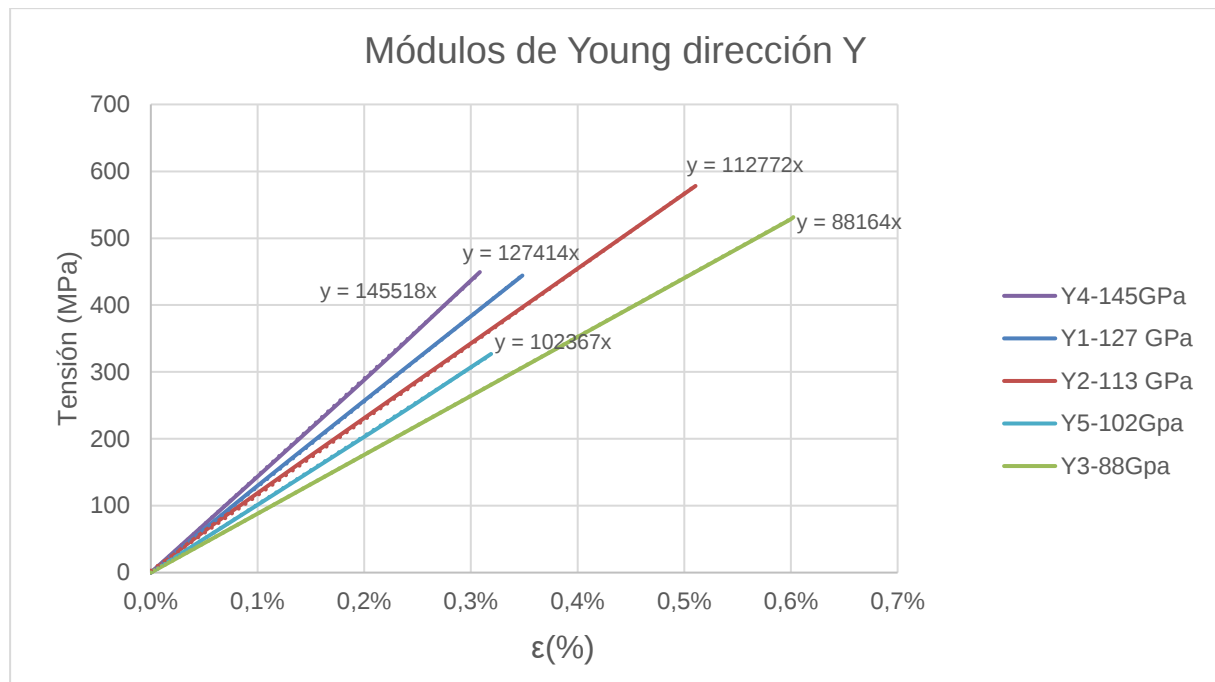


Ilustración 46- Módulos de elasticidad en dirección Y

A continuación, en la Tabla 6 se recogen los resultados obtenidos de los ensayos de tracción en las probetas impresas en la dirección Y.

Ensayos de tracción en dirección y

	Módulo de Young (GPa)	Límite elástico (Mpa)	Tensión máxima (Mpa)	Tensión de rotura (Mpa)	Deformación última (%)	Coefficiente de Poisson
<i>Probeta 1</i>	127	752	823	823	0,9	0,433
<i>Probeta 2</i>	113	833	877	869	1,1	0,234
<i>Probeta 3</i>	88	750	815	805	1,05	0,242
<i>Probeta 4</i>	145	700	768	768	0,64	0,533
<i>Probeta 5</i>	102	755	748	748	0,85	-
Desv. típica (%)	17,2	5,6	5,6	5,3	17,9	35,3
Media	115	758	806	802	0,91	0,361

Tabla 6- Caracterización a tracción del material en la dirección Y



Ilustración 47- Fractura de las probetas impresas en la dirección Y

5.2 Comparación de dirección de impresión

Comparación de dirección de impresión

	Módulo de Young (GPa)	Límite elástico (Mpa)	Tensión máxima (Mpa)	Tensión de rotura (Mpa)	Deformación última (%)	Coefficiente de Poisson
<i>Dirección X</i>	136,7	787,7	998,0	967,7	3,9	0,264
<i>Dirección Y</i>	115	758	806	802	0,91	0,361
<i>Desv. Típica (%)</i>	8,6	1,9	10,6	9,4	62,3	15,6
Media	125,9	772,9	902	884,9	2,4	0,31

Tabla 7- Comparación de dirección de impresión

A continuación, se pueden ver diferentes graficas que comparan directamente las propiedades obtenidas tanto en X como en Y.

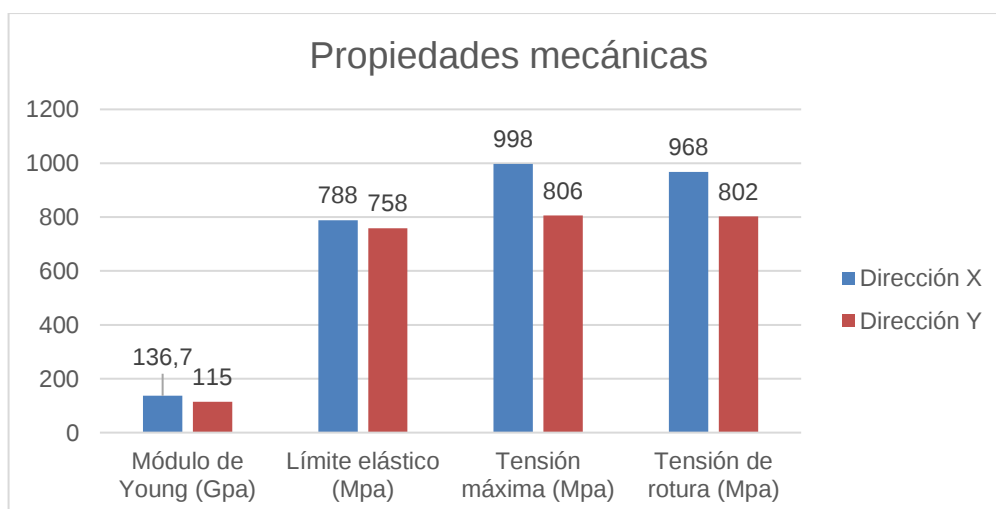


Ilustración 48- Comparación de dirección de impresión

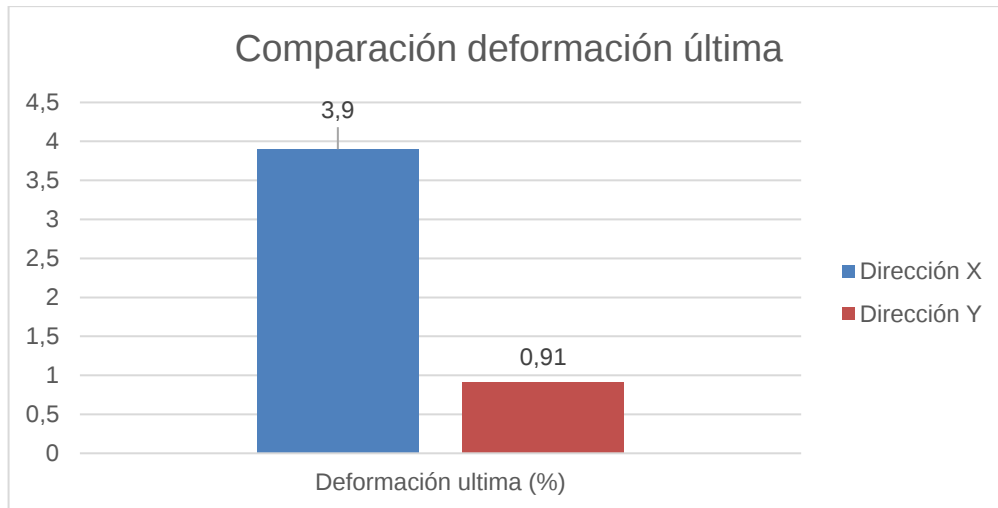


Ilustración 49- Comparativa deformación última

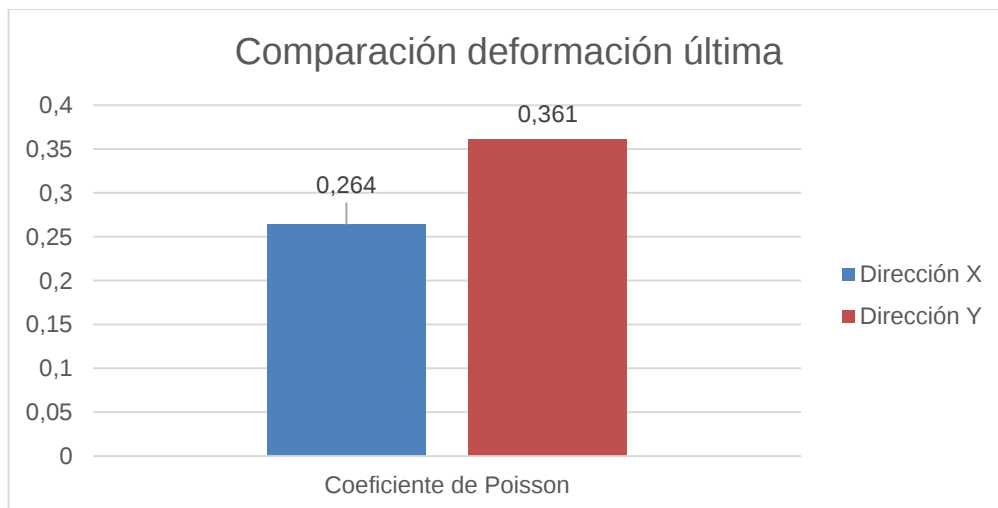


Ilustración 50- Comparativa coeficiente de Poisson

En la Ilustración 48 y en la Ilustración 49, se puede apreciar un decremento de las propiedades mecánicas. El motivo de este decremento puede deberse a que las probetas fabricadas en la dirección Y necesitaron soportes que tuvieron que ser retirados mediante un mecanizado, el cual pudo influir en la integridad estructural de las piezas. En cambio, en la Ilustración 50 se puede observar un módulo de Poisson mayor en la dirección Y.

5.2 Comparación con datos de fabricante

A partir de los datos obtenidos en la Tabla 5 y en la Tabla 6, se va a realizar una comparación con los datos facilitados por Markforged. Este da las mismas propiedades en ambas direcciones, es decir, anticipa un comportamiento isótropo en

X e Y, pero como hemos visto anteriormente esto no sucede. A continuación, se expone una tabla que compara directamente las propiedades del proveedor con obtenidos de manera experimental en el presente trabajo.

	Módulo de Young (GPa)	Límite elástico (Mpa)	Tensión máxima (Mpa)	Deformación última (%)
<i>Dirección X</i>	136,7	787,7	998,0	3,9
<i>Dirección Y</i>	115	758	806	0,91
<i>Markforged</i>	140	800	1050	5

Tabla 8- Comparativa con datos teóricos

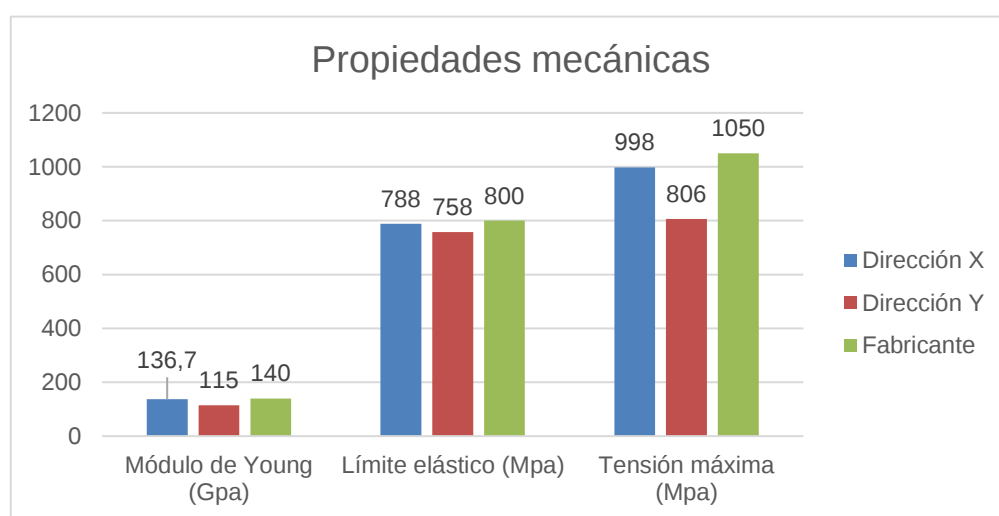


Ilustración 51- Comparación con datos de fabricante

Se puede apreciar como los datos teóricos están más próximos a los valores obtenidos en los ensayos en la dirección X. Esto podría indicar que el fabricante caracterizó el material con las probetas completamente tumbadas en la zona de impresión.

	Diferencia con X (%)	Diferencia con Y (%)
<i>Módulo de Young</i>	2,3	17,8
<i>Límite elástico</i>	1,5	5,2
<i>Tensión máxima</i>	4,9	23,2

Tabla 9- Diferencia de las propiedades mecánicas comparadas con la hoja de características

Tras la comparación directa con los datos teóricos parece lógico que el proveedor facilite las propiedades mecánicas en la dirección óptima de impresión. Por esta razón es muy importante tener en cuenta la anisotropía del material por estar impreso mediante FDM. El problema viene cuando se tienen pieza sometida a

estado de carga biaxiales o triaxial pues a la hora de realizar una simulación mediante elementos finitos estaríamos sobreestimando la resistencia del material al considerar la pieza isótropa.

5.3 Ensayo de cortante

Los ensayos de cortante se realizaron según el programa experimental 2, diseñado en el *apartado 4* del presente trabajo.

En este ensayo solo se pudo imprimir en la dirección X, es decir, con las piezas totalmente tumbadas. Durante este se pudo observar que a en torno a misma magnitud de fuerza (22-23 kN) la probeta resbalaba y se giraba en vez de continuar deformándose plásticamente. Por este motivo, los resultados obtenidos son solo pertenecientes a la zona elástica, es decir, solo se pudo obtener el módulo de elasticidad transversal.

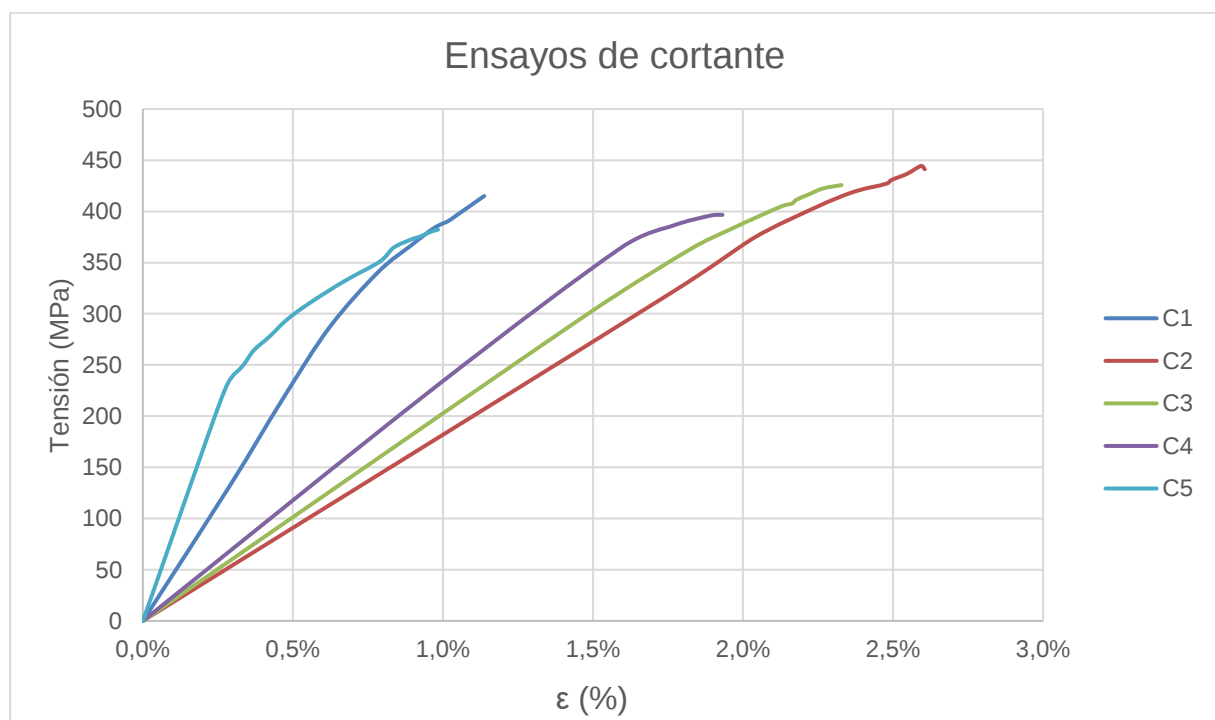


Ilustración 52- Grafica tensión-deformación ensayos de cortante

La gráfica tensión-deformación obtenidas de las cinco probetas ensayadas a cortante se puede ver en la Ilustración 52. Se puede observar que no hay repetitividad en los datos, esto es debido a que el fenómeno de talonamiento ocurrió muy tarde en algunos ensayos, concretamente en el C2, C3 y C4. La consecuencia de este fenómeno fue la dificultad de caracterizar el comportamiento elástico del

material puesto que ya existía plasticidad cuando talonó la pieza en la máquina, como se puede apreciar en la siguiente ilustración:

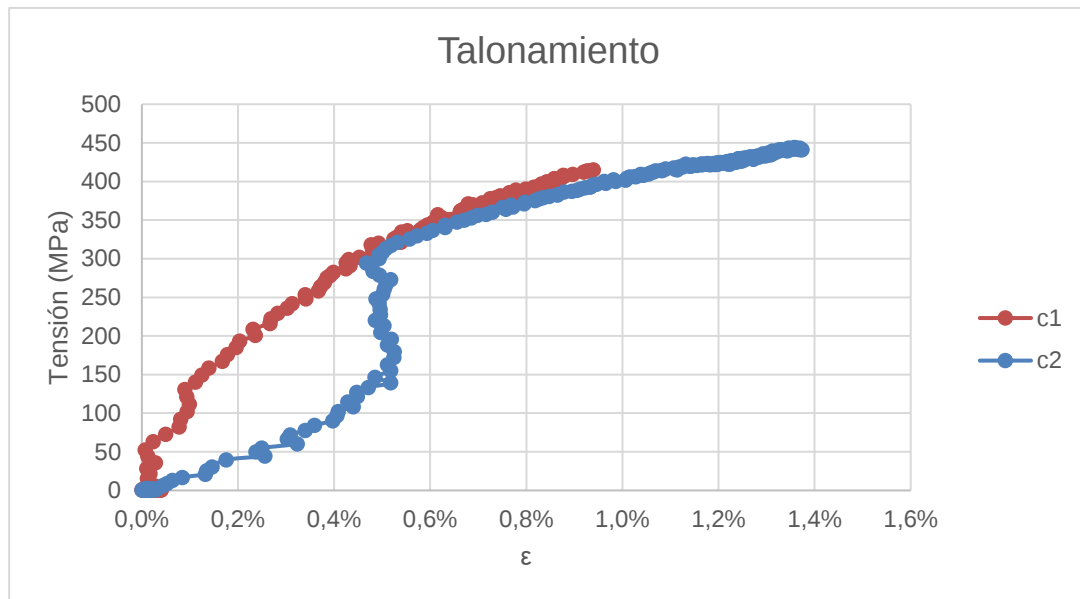


Ilustración 53- Talonamiento en ensayos de cortante

Pese a lo mencionado anteriormente, los módulos de elasticidad transversal obtenidos de graficar la zona lineal del ensayo se pueden apreciar en la Ilustración 54. Los módulos varían desde 18 GPa hasta 83 GPa.

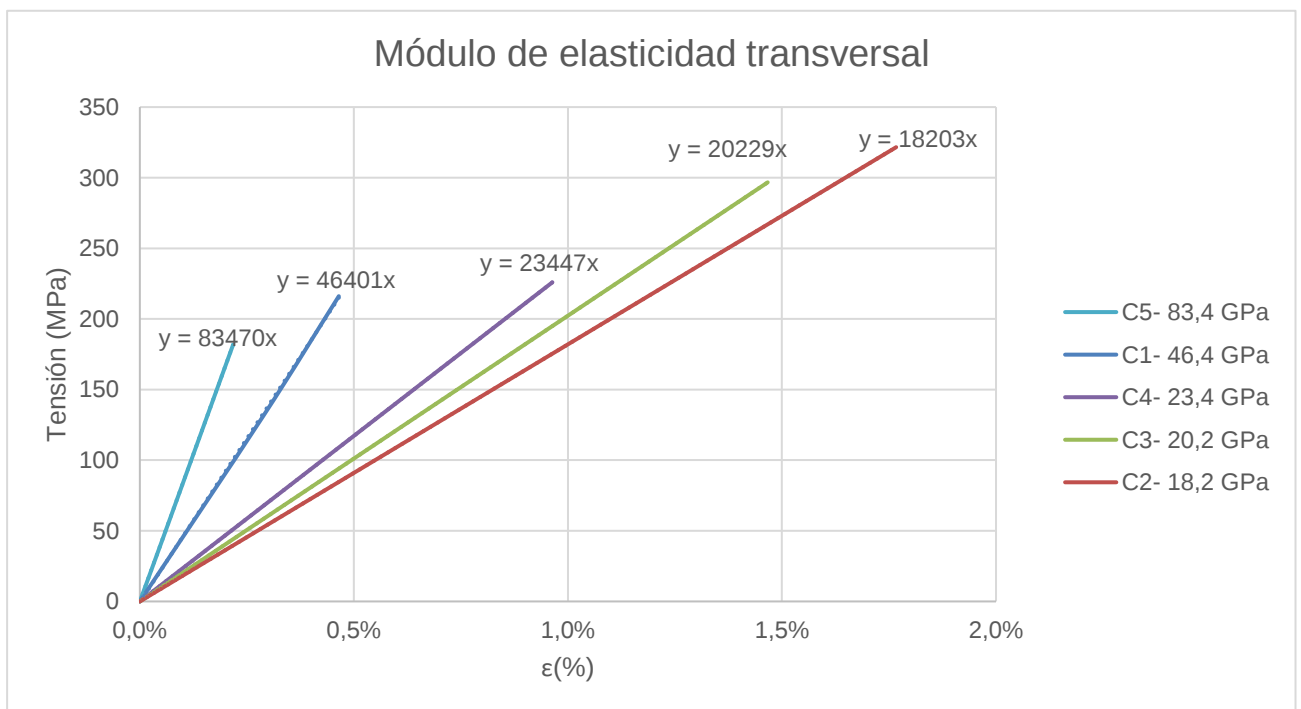


Ilustración 54- Módulos de elasticidad transversal

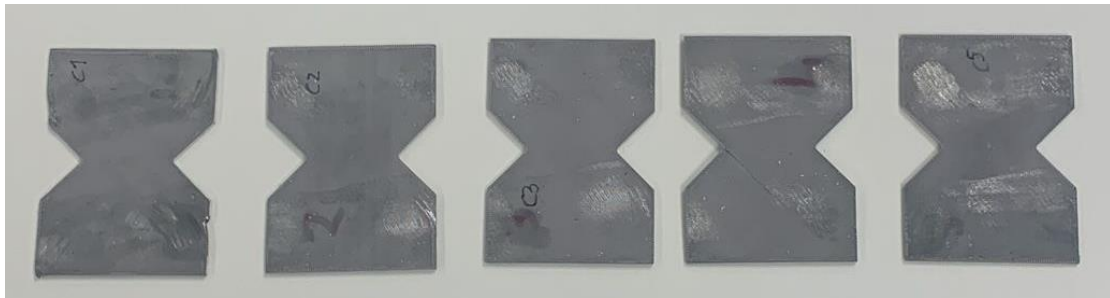


Ilustración 55- Probetas de cortante ensayadas

Los resultados obtenidos de los ensayos de cortante se pueden ver resumidos en la siguiente tabla. También, se calculó de manera teórica el módulo de rigidez transversal a partir de la Ecuación 6.

	Módulo de rigidez transversal (GPa)	Teórico (GPa)	Diferencia (%)
<i>Probeta 1</i>	46,4	54,07	14,19
<i>Probeta 2</i>	18,2		66,34
<i>Probeta 3</i>	20,2		62,64
<i>Probeta 4</i>	23,4		56,73
<i>Probeta 5</i>	83,4		54,23
Desv. Típica (%)	64,5		64,5
Media	38,32		29,13

Tabla 10- Caracterización a cortante del material

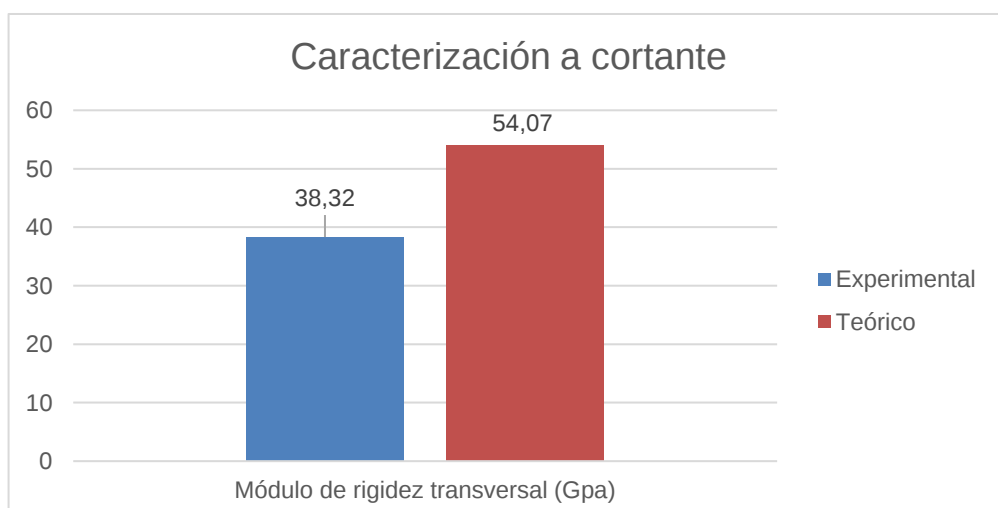


Ilustración 56- Caracterización mecánicas a cortante

De las cinco probetas si se considera el inconveniente observado durante el procesado de los datos, los resultados de las probetas 1 y 5 seria:

	Módulo de rigidez transversal (GPa)	Teórico (GPa)	Diferencia (%)
<i>Probeta 1</i>	46,4	54,07	14,19
<i>Probeta 5</i>	83,4		54,23
<i>Desv. Típica (%)</i>	28,5		
Media	64,9		20,02

Tabla 11- Resultados del ensayo de cortante

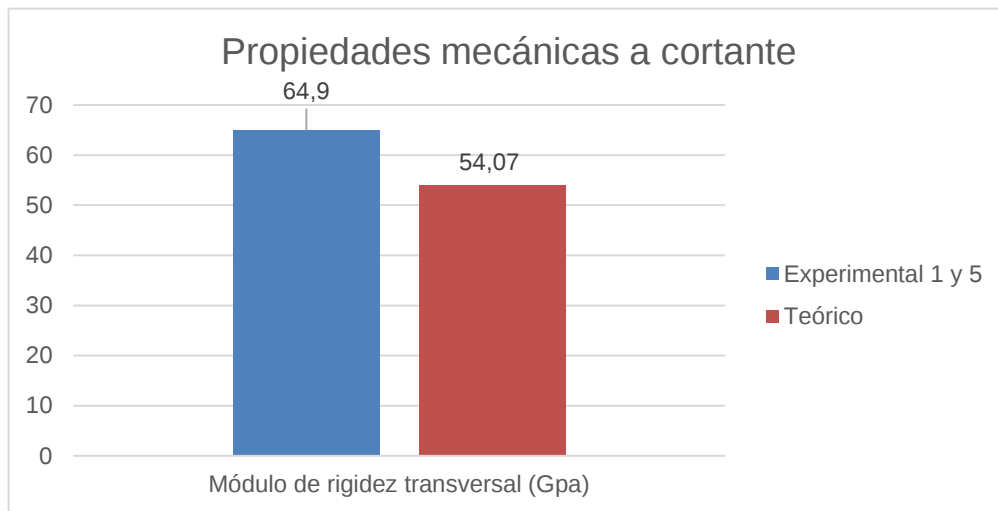


Ilustración 57- Propiedades mecánicas a cortante de las probetas 1 y 5

Se puede apreciar un módulo de rigidez transversal un 16% mayor al valor teórico esperado. Sería interesante poder contar con información del fabricante, pero Markforged no facilita este tipo de información en su hoja de características.

6. CONCLUSIONES

Tras el trabajo experimental realizado y el análisis de los resultados obtenidos se indican a continuación las conclusiones alcanzadas:

- En primer lugar, se ha culminado la caracterización mecánica de probetas de acero inoxidable 17-4 PH obtenidas mediante fabricación aditiva (AM) comercializado por la marca Markforged. Mediante ensayos de tracción (ASTM 3039) se han obtenido las curvas tensión-deformación según dos direcciones de impresión, y se han cuantificado las propiedades mecánicas más significativas (módulo de la elasticidad, límite elástico, tensión máxima, deformación última y tensión de rotura). Los ensayos de cortante (ASTM 7078) han permitido cuantificar el módulo de la actividad transversal y el coeficiente de Poisson.
- Para la caracterización mecánica se han considerado de inicio que el material podría presentar un comportamiento anisótropo, debido al procedimiento de impresión de las probetas. Por tanto, se diseñaron probetas según las direcciones X, Y Z, siendo esta última la perpendicular a las capas de impresión y por lo tanto la que presenta peores propiedades mecánicas. De hecho, no fue posible obtener las propiedades según la dirección Z pues por esbeltez no soportaron el proceso de sinterizado. Este tema se trató con Markforged directamente y se llegó a la conclusión de que piezas demasiado esbeltas, como las de este trabajo, resultan difícil de fabricar ya que no soportan la etapa de sinterizado. Para la impresión según las direcciones X e Y se han seguido los parámetros recomendados por el fabricante [3] Y se han obtenido piezas sólidas, sin grietas ni aristas deformadas ni otros defectos.
- Se ha registrado una contracción significativa de la probeta, motivada por la retracción térmica que experimenta el material. aunque el sistema del fabricante se supone que compensa automáticamente este efecto, se han registrado diferencias de hasta un 26% de aumento de la sección de la probeta. Este error geométrico puede deberse a que la forma de las capas era más sencilla cuando se imprimieron en la dirección Y que

en la dirección X, la cual presentaba curvas y radios de giro más pronunciados, o incluso, que la maquina no estuviera perfectamente calibrada.

- El análisis de las propiedades mecánicas obtenidas denota diferencias significativas entre las impresas según la dirección X (dirección del filamento) y según Y (perpendicular al filamento en el plano de impresión), sobre todo en lo referente al comportamiento plástico, puesto que las probetas impresas según Y no resultan tan dúctiles. Las probetas impresas según X presentan propiedades mecánicas similares a las proporcionadas por el fabricante, mientras que las probetas según Y presentan un módulo de Young un 15% inferior, un límite elástico un 4% por debajo, una tensión máxima un 19% más pequeña, y una deformación última un 76% inferior. El motivo por el cual estos resultados son peores en la dirección Y puede deberse a la estrategia de fabricación empleada. Las probetas impresas en la dirección Y necesitaron material de soporte en la zona de las cabezas que hubo que mecanizar antes de ensayarlas. El mecanizado pudo provocar grietas en dichas zonas que, además, fueron por donde rompieron.
- Estas diferencias en las propiedades mecánicas, junto a los problemas con las probetas según Z y a los valores registrados del coeficiente de Poisson, denotan un comportamiento claramente ortotrópico, justificado por el método de fabricación, pero que debe ser considerado en problemas donde las piezas sean sometidas a estados tensionales biaxiales o triaxiales, casos en los que resulta necesarias caracterizaciones mecánicas como lo aquí expuesta. En todo caso, es de resaltar que este método de impresión de acero (con Sinterizado posterior) permite obtener piezas que, según su dirección más resistente, presentan propiedades similares a las de un acero de alta resistencia

Además de las conclusiones indicadas, referentes al trabajo de investigación realizado, se han culminado también los objetivos académicos establecidos en el apartado 3, dado que el autor:

- Ha diseñado, preparado y ejecutado el programa experimental planteado, lo que implica la interpretación de normativa internacional, el diseño y preparación de especímenes, el manejo de distintas máquinas de tensión universal, y la obtención e interpretación de resultados.
- Ha profundizado sobre la fabricación aditiva la impresión 3D y en concreto la impresión de metales, como tecnologías emergentes
- Ha conocido la técnica de Correlación Digital de Imágenes (DIC) y la ha empleado para la medida desde formaciones durante los ensayos realizados, lo que permite un registro más preciso de las deformaciones experimentadas por las probetas.

7. TRABAJOS FUTUROS

Una vez vistas las conclusiones arrojadas por el presente trabajo, se expondrán posibles líneas de investigación complementarias, tanto para verificar el trabajo expuesto como para ampliarlo.

➤ **Verificación de resultados obtenidos**

Los datos obtenidos son totalmente experimentales. Sería interesante realizar análisis numéricos, empleando elementos finitos a partir de los datos obtenidos (curva tensión-deformación). Y no sólo se podría verificar los parámetros obtenidos en este trabajo, sino realizar simulaciones donde ver que influencia tiene la anisotropía característica de este material impreso mediante FDM.

Además, sería interesante comparar los ensayos con los realizados por otra entidad profesional para verificar los resultados obtenidos.

➤ **Caracterización mecánica completa mediante la obtención de más parámetros característicos.**

En este trabajo se ha estudiado cual es el comportamiento del material cuando se someten a esfuerzos de tracción y cortante, pero sería interesante complementar esto con más análisis mecánicos. Una lista de posibles futuras líneas de experimentación podría ser:

- Ensayos de flexión, donde se podría caracterizar el Módulo en flexión y la tensión máxima a flexión que el material puede soportar.
- Ensayos de impacto, mediante ensayo Charpy o Izod para tener conocimiento de la resistencia al impacto del material. Este ensayo es especialmente interesante si el material va a tener que soportar impactos en su futura aplicación industrial.
- Ensayos de vibraciones, puesto que las piezas fabricadas mediante capas presentan pequeños concentradores de tensiones. Sería interesante analizar la influencia de vibraciones sobre piezas impresas con acero inoxidable 17-4 ph de Markforged.
- Ensayos de cargas cíclicas. Al igual que con los ensayos anteriores, otra área donde investigar sería, la vida a fatiga de piezas impresas con este material y esta tecnología. De nuevo sería interesante ver que influencia tiene la dirección de impresión en la vida útil de las piezas.
- Ensayo de dureza.

➤ **Estudio de variación del proceso de fabricación**

Las probetas que se han ensayado en el presente trabajo se han fabricado según las recomendaciones del fabricante, tanto para la etapa de impresión como para la etapa de sinterizado. Por lo tanto, resultaría de gran interés analizar la influencia que tiene variar parámetros en la etapa de impresión (altura de capa, velocidad de impresión ...) en los resultados obtenidos y ver si se podría llegar a mejorar las propiedades del material.

Por otro lado, ha sido difícil saber cuál es el ciclo térmico que se ha realizado durante la etapa de sinterizado, puesto que este se encuentra patentado por la marca. Por ello se propone para trabajos futuros, diseñar y comparar diferentes ciclos térmicos sobre las piezas recién impresas (verdes) y ver si se podría optimizar esta etapa de fabricación para obtener mejores propiedades mecánicas del material.

➤ **Estudio de más materiales y diferentes tecnologías de fabricación aditiva**

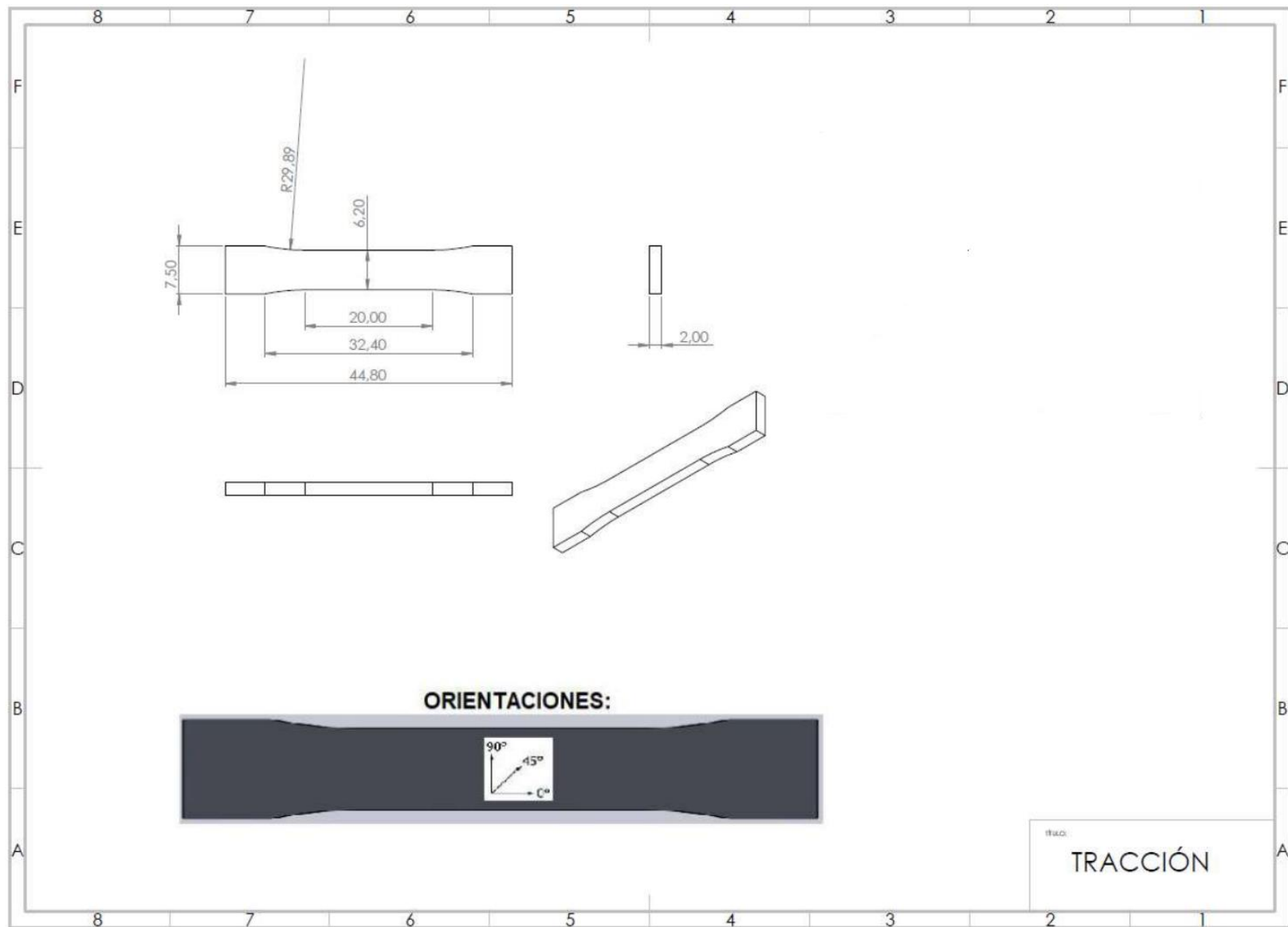
El Acero inoxidable 17-4 PH es uno de la amplia gama de materiales que presenta el fabricante Markforged. Otros materiales metálicos interesante a estudiar de manera similar podrían ser: Cobre (metal conductor ideal para aplicaciones eléctricas y térmicas), Inconel 625 (resistencia a la corrosión a altas temperaturas), acero para herramientas H13 (más duro que el 17-4) o acero para herramientas A2 y D2 (más duros que el H13 y con gran resistencia al desgaste).

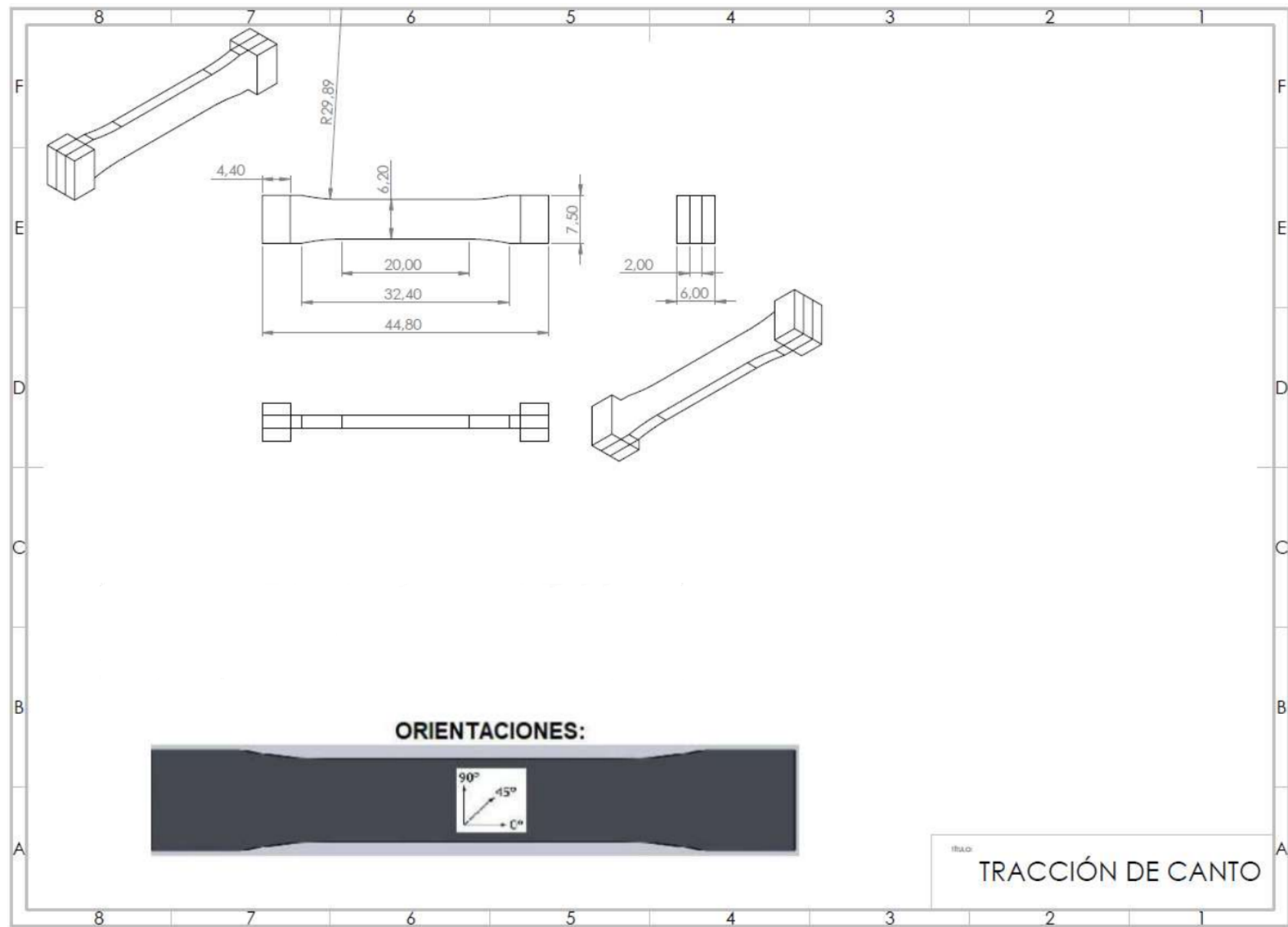
Otro amplio campo de investigación sería la comparación directa de aceros fabricados con diferentes tecnologías de fabricación aditiva. Las tecnologías de DMLS o SLS están en auge y presentan una amplia gama de materiales en sus catálogos)

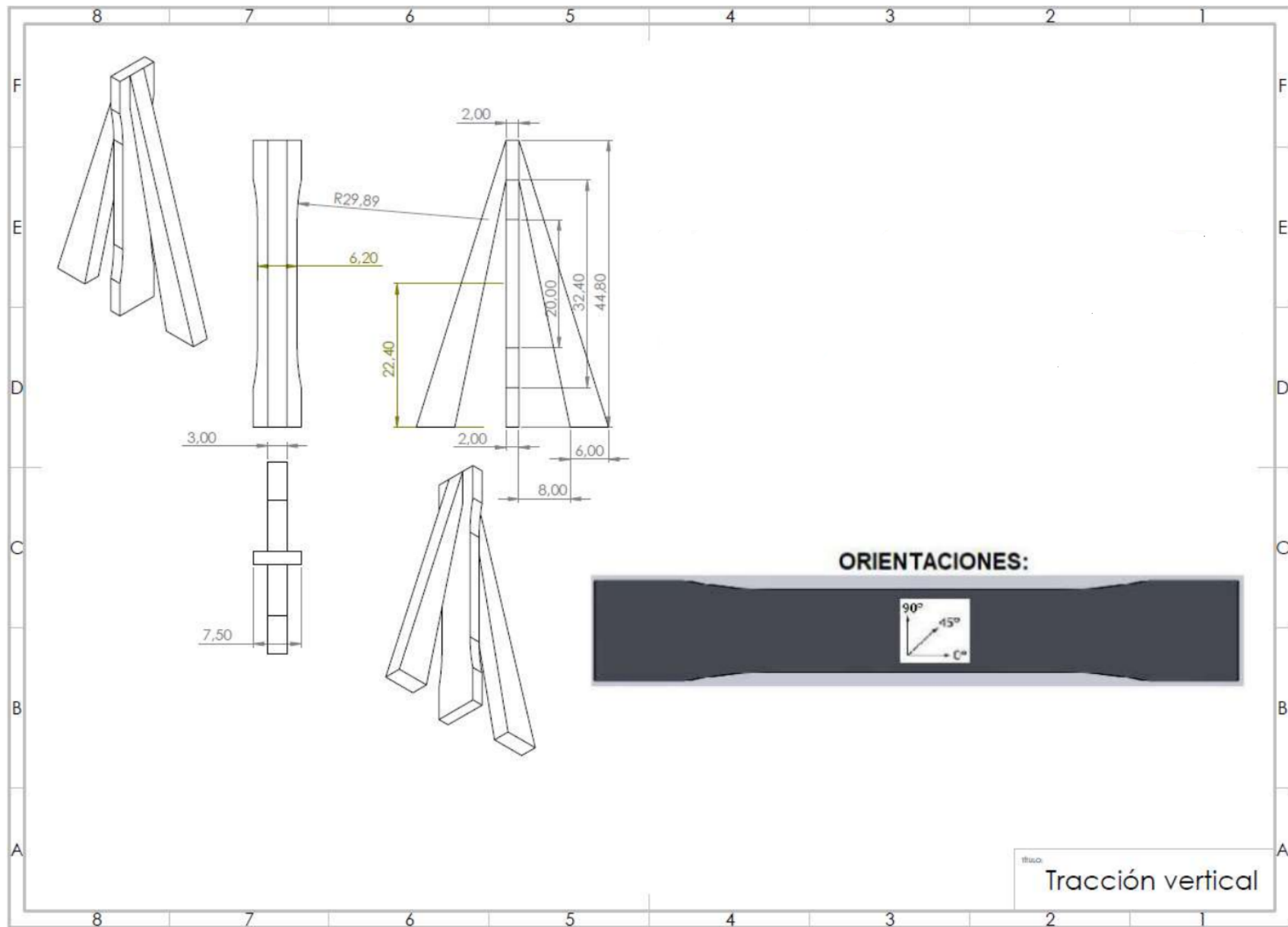
Finalmente, también sería interesante estudiar las tecnologías de MJF de polímeros que, aunque actualmente no son capaces de imprimir con metales, presenta una gran ventaja frente a las demás tecnologías en cuanto a tiempos de impresión y necesidad de postproceso en las piezas finales.

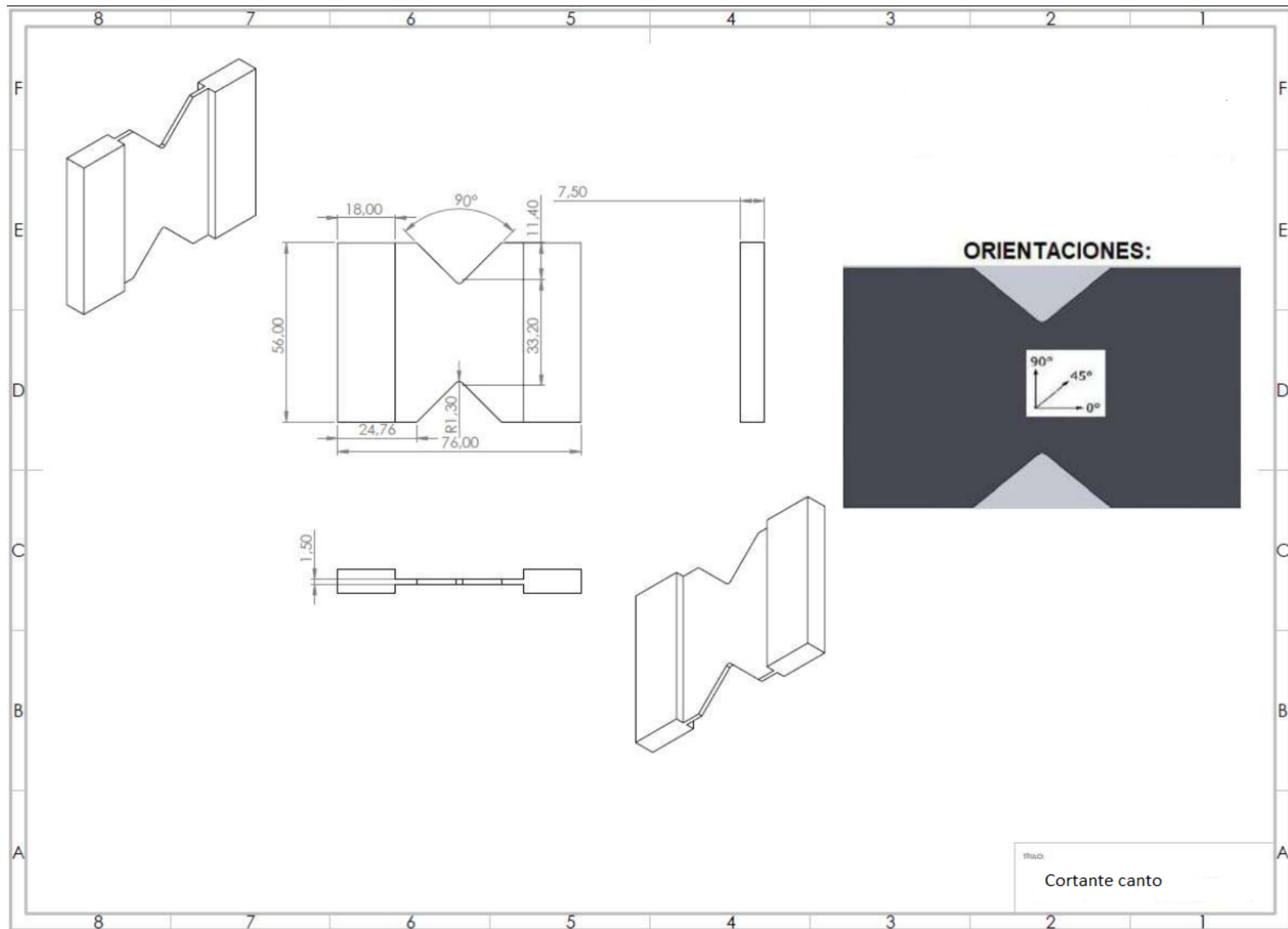
➤ **Estudio de la variación de las propiedades mecánicas bajo diferentes temperaturas de trabajo**

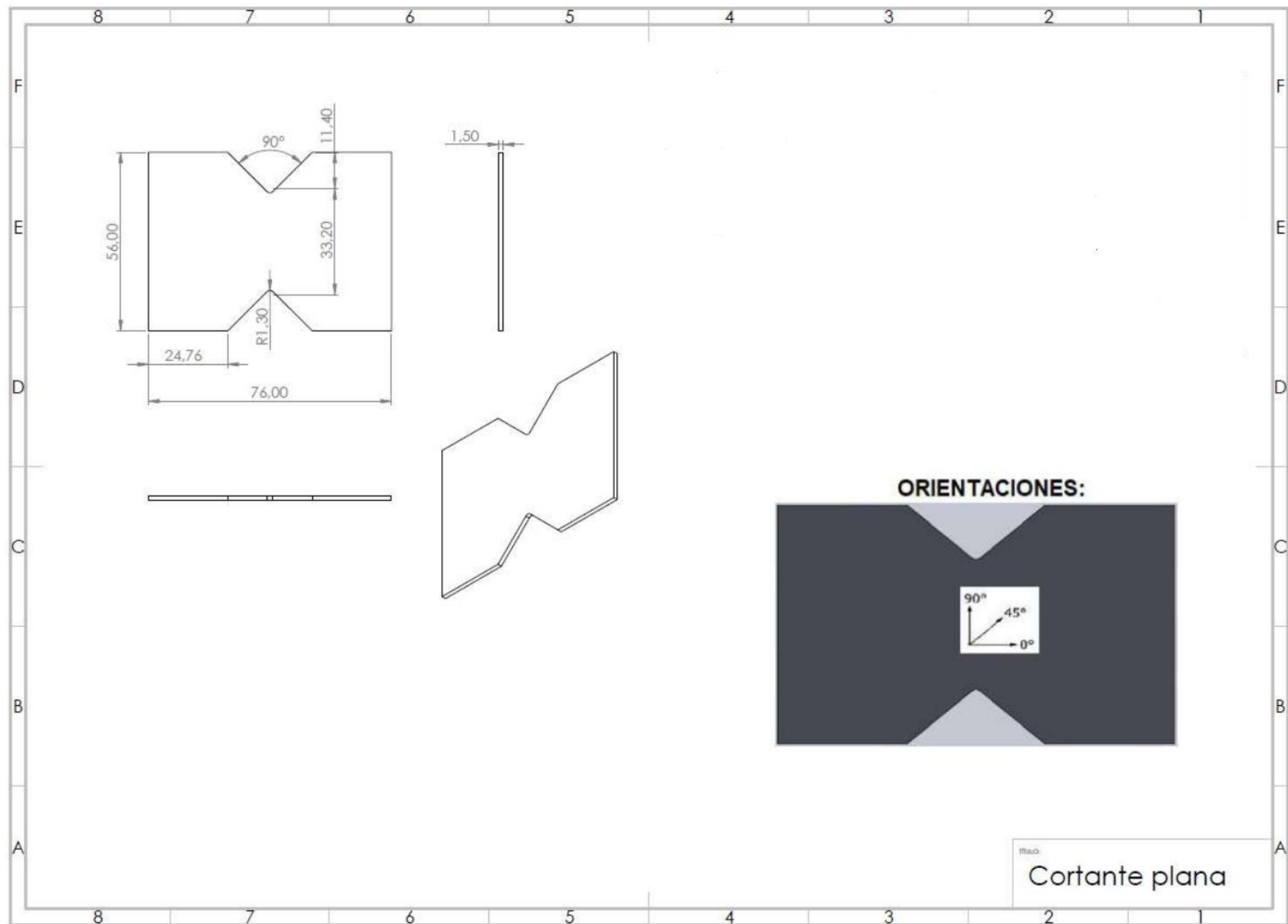
8. ANEXO I: Planos

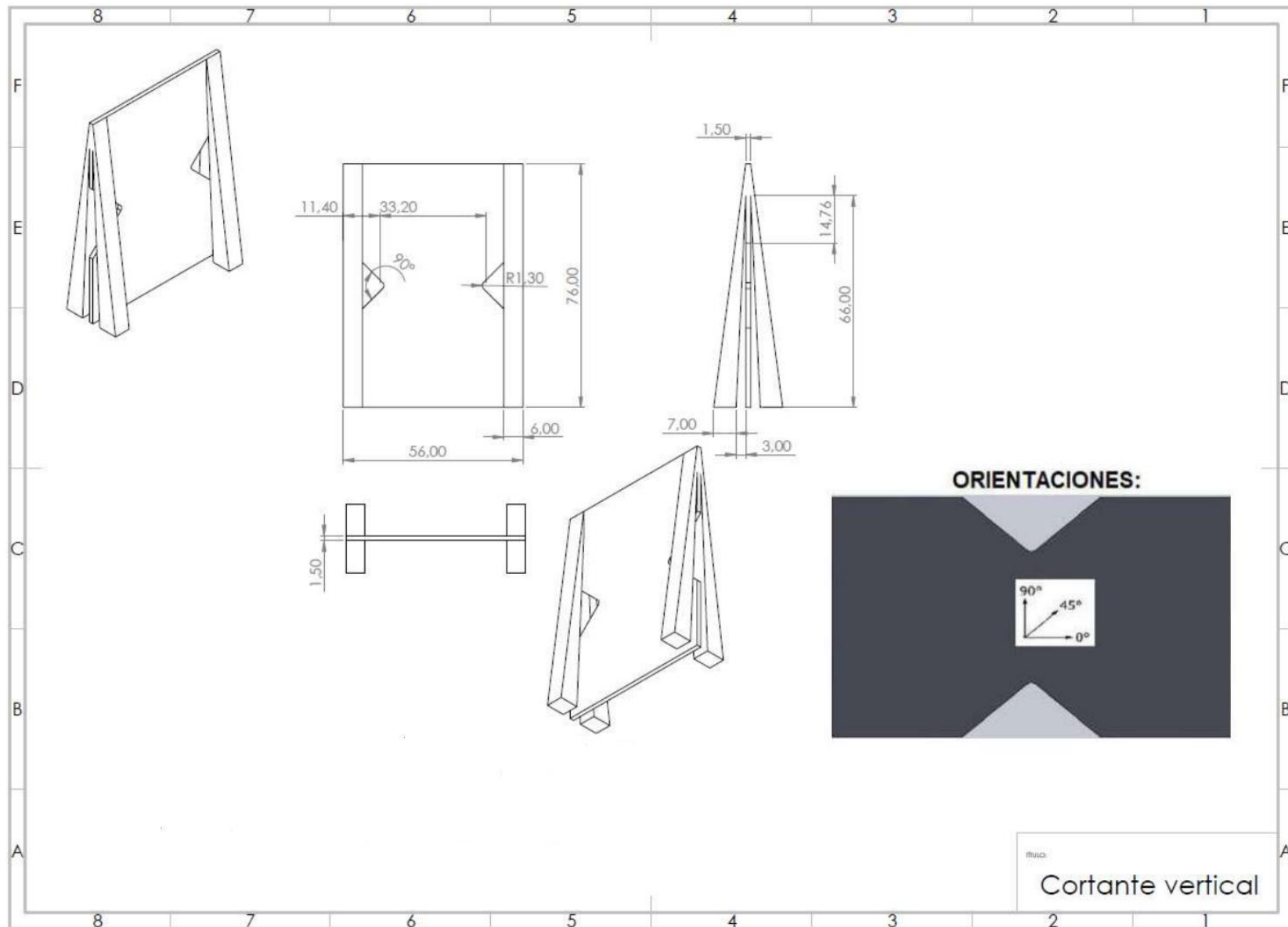












Bibliografía

- [1] American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Test method for shear properties of composites materials by v-notched rail Shear method, D7078/D7078M, 2012.
- [2] American Society for Testing and Materials (ASTM), Standard Test method for Tensile properties of Polymer Matrix Composites Materials, D3039/D3039M, 2014.
- [3] Markforged S.L. <https://support.markforged.com/portal/s/article/17-4PH-Stainless-Steel-v2>
- [4] I. González Lozano, *TFM Caracterización mecánica de probetas impresas con material de alto módulo elástico*, Escuela Politécnica Superior de Jaén. 2021
- [5] Fabricación Aditiva. www.fabricacionaditiva.online/contenido.htm
- [6] Correlated Solutions INC., <Vic-2D Reference Manual>. <http://www.correlatedsolutions.com/installs/Vic-2D-2009-Manual.pdf>.
- [7] D. Carazo Álvarez, Tesis doctoral *Estudio de uniones T-Stub en estructuras metálicas utilizando métodos ópticos para la medida de tensiones y deformaciones*, Escuela Politécnica Superior de Jaén, 2012.
- [8] A.G. Ruiz, *Análisis mecánico de probetas fabricadas en FDM mediante fibra de vidrio continua*, Escuela Politécnica Superior de Jaén, 2020
- [9] J.M.G. Zapata, *Caracterización mecánica avanzada de nuevos materiales para impresión 3D*, Escuela Politécnica Superior de Jaén, 2019
- [10] Asociación Española de normalización (UNE), *Materiales metálicos Ensayo de tracción Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente*, UNE-EN ISO 6892-1, 2020
- [11] B. Liu, Y.Wanga,Z.Lim yT.Zhang, *Creating metal parts by fused deposition modeling and sintering*, ELSEVIER,p.4,2019
- [12] Markforged. 17-4 PH Stainless Steel datasheet. [17-4-ph-stainless-steel.pdf](https://www.markforged.com/17-4-ph-stainless-steel.pdf) ([markforged.com](https://www.markforged.com))