



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Estudio del comportamiento mecánico de piezas realizadas
por tecnología FDM mediante la validación de modelos de
simulación por Elementos Finitos**

Autor:

Mulas González, Daniel

Tutor:

Mansilla Gallo, Alberto

Dpto. Ciencia de los Materiales e Ingeniería
Metalúrgica, Expresión Gráfica en la Ingeniería,
Ingeniería Cartográfica, Geodesia y
Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e Ingeniería
de los Procesos de Fabricación

Valladolid, julio del 2019.



RESUMEN

El Modelado por Deposición Fundida (FDM) está en auge en muchos campos de la tecnología por su reducido coste y la posibilidad de realizar geometrías complejas.

Este trabajo, además de estudiar la influencia del porcentaje de relleno en las propiedades del material, tiene el objetivo principal de estudiar el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas con esta tecnología mediante herramientas de simulación numérica, concretamente mediante el Método de Elementos Finitos (FEM). Para ello, se han realizado modelos para intentar validar las propiedades mecánicas del material utilizado, comparando los resultados de las simulaciones con los obtenidos en ensayos de tracción y flexión a 3 puntos.

Se ha concluido que estos modelos numéricos aplicados a la tecnología FDM son una herramienta útil para orientar el diseño de los prototipos, pero no deben utilizarse como única herramienta de validación, debido a la gran anisotropía que presentan las piezas impresas en 3D.

PALABRAS CLAVE

- Método de los Elementos Finitos
- Modelado por deposición fundida
- Impresión 3D
- Ensayos mecánicos
- PETG



ÍNDICE

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	3
PALABRAS CLAVE	3
ÍNDICE	5
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	9
1. TECNOLOGÍAS	13
1.1. Fabricación aditiva. Tecnología FDM	13
1.2. Material utilizado: PETG	18
1.3. Método de los elementos finitos	19
1.4. Ensayos	22
2. VALIDACIÓN DE MODELOS FEM	25
2.1. Validación del modelo de viga empotrada	25
Metodología	25
Resultados	27
Análisis y discusión de resultados	28
2.2. Validación del modelo de ensayo a flexión según ISO 178	29
Metodología	29
Resultados	31
Análisis y discusión de resultados	31
3. ENSAYO DE FLEXIÓN A 3 PUNTOS PARA PROBETAS DE PETG	33
3.1. Modelo 1	33
Metodología	33
Resultados	39
Análisis y discusión de resultados	44
3.2. Modelo 2	45
Metodología	45
Resultados	47
Análisis y discusión de resultados	48
3.3. Ensayo de probetas reales	49
Norma UNE-EN ISO 178	49
Montaje	50
Probetas	53
Resultados	54



Análisis y discusión de resultados	55
4. APLICACIÓN AL DESARROLLO DE UNA FÉRULA DE MUÑECA	57
4.1. Ensayos de las férulas	58
Montaje	58
Resultados	60
4.2. Modelo FEM del ensayo de la férula	63
Modelo	63
Resultados	65
4.3. Análisis y discusión de resultados	67
5. CONCLUSIONES	69
5.1. Líneas de trabajo futuras	70
BIBLIOGRAFÍA	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Las figuras no referenciadas son de elaboración propia

Figura 1. Etapas en el proceso general de fabricación aditiva. (Thompson A. 2009)	10
Figura 2. Esquema de las etapas del proyecto.	10
Figura 3. Diagrama del proceso FDM (Rafael, I. 2012)	14
Figura 4. Posibles orientaciones de impresión (Knoop F, et al. 2015)	15
Figura 5. Distintos porcentajes de densidad de relleno. (Impresoras 3D, 2018)	15
Figura 6. Distintos patrones de relleno. (Impresoras 3D, 2018)	16
Figura 7. Máximo esfuerzo de tracción en función del porcentaje de relleno. (Álvarez K L et al. 2016)	16
Figura 8. Modelado de filamentos. (Martínez J. 2014) arriba y (Baich L. 2016) debajo.	17
Figura 9. Proceso de discretización. (García J L, s.f.)	19
Figura 10. Ejemplo de error de conversión discreta. (Budynas R, et al. 2008)	21
Figura 11. Ensayo de tracción (elaboración propia)	22
Figura 12. Ensayo de flexión a 3 puntos. (Instron, s. f.)	23
Figura 13. Férula a ensayar.	23
Figura 14. Viga en voladizo cargada puntualmente en el extremo. Budynas R, et al. (2008)	25
Figura 15. Condiciones de contorno de la viga empotrada	26
Figura 17. Desplazamientos en dirección transversal (mm)	27
Figura 16. Tensión equivalente de Von Mises (MPa)	27
Figura 18. Geometría del ensayo de flexión a 3 puntos.	30

Figura 19. Malla y condiciones de contorno del ensayo de flexión a 3 puntos.....	30
Figura 20. Tensión equivalente de Von Mises (MPa).....	31
Figura 21. Corte diagonal a las probetas con porcentaje de relleno creciente de arriba a abajo	35
Figura 22. Mallado de las probetas con pared y relleno.	36
Figura 23. Detalle de tensión equivalente de Von-Mises máxima por concentración de tensiones .	41
Figura 24. Modelo de probeta maciza, sin representar el relleno	45
Figura 25. Probeta para ensayo de tracción (10% relleno) en el entorno de Ultimaker Cura.....	45
Figura 26. Ensayo de flexión a 3 puntos (UNE-EN-ISO-178).....	49
Figura 41. Piezas del utillaje del ensayo de flexiónCarro móvil	50
Figura 28. Máquina de ensayos	50
Figura 29. Piezas del utillaje del ensayo de flexión	51
Figura 30. Montaje del utillaje para el ensayo a flexión	52
Figura 31. Vista de las capas interiores de la probeta en el entorno de Ultimaker Cura	53
Figura 32. Ensayo de flexión en el entorno de GOM	54
Figura 33. Férulas de muñeca impresas en PETG	57
Figura 34. Estructura del ensayo y detalle de las piezas guía.....	58
Figura 35. Pieza para sujeción de la férula (Primer diseño).....	59
Figura 36. Pieza para sujeción de la férula (Segundo diseño).....	59
Figura 37. Sujeción de la férula (Diseño final)	60
Figura 38. Medición simultanea de fuerza y desplazamiento.....	61
Figura 39. Zona de rotura de la férula	62
Figura 40. Condiciones de contorno sobre la pieza superior de la férula	63
Figura 41. Mallado de la pieza inferior de la férula	64
Figura 42. Distribución de tensiones equivalentes de Von-Mises (MPa) para la pieza inferior y dirección de impresión Y.....	66
Figura 43. Distribución de tensiones equivalentes de Von-Mises (MPa) para la pieza inferior y dirección de impresión Z.....	66

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Variación de los valores de tensión en el ancho de la sección.....	28
Gráfica 2. Curva tensión-deformación verdadera para probeta de 100% de relleno	38
Gráfica 3. Curva tensión-deformación simplificada para probeta de 100% de relleno.....	38
Gráfica 4. Módulo de flexión en función del porcentaje de relleno y el espesor de la pared (Datos de Smart Materials 3D).....	40
Gráfica 5. Tensiones máximas en la probeta al aplicar una fuerza de 20 N, en función del porcentaje de relleno y el espesor de la pared. (Datos de Smart Materials 3D)	42



Gráfica 6. Módulo de flexión en función del porcentaje de relleno para pared de 0,9 (Modelo 1-Datos experimentales).....	43
Gráfica 7. Tensiones máximas en la probeta al aplicar una fuerza de 6 N. (Modelo 1 -Datos experimentales).....	43
Gráfica 8. Curvas Fuerza- desplazamiento según ensayo de flexión obtenidas por FEM para el Modelo 1-Datos experimentales	44
Gráfica 9. Curvas tensión-deformación verdaderas para probetas con distintos porcentajes de relleno	46
Gráfica 10. Curva tensión-deformación simplificada para probeta don distintos porcentajes de relleno	46
Gráfica 11. Módulo de flexión en función del porcentaje de relleno para pared de 0,9 (Modelo 2)..	47
Gráfica 12. Tensiones máximas en la probeta al aplicar una fuerza de 6 N. (Modelo 2)	47
Gráfica 13. Curvas Fuerza-desplazamiento según ensayo de flexión obtenidas por FEM para el Modelo 2.....	48
Gráfica 14. Curvas Fuerza-desplazamiento obtenidas en los ensayos a flexión	55
Gráfica 15. Módulo de flexión en función del porcentaje de relleno obtenido en el ensayo de flexión a 3 puntos y comparación con los modelos de simulación.....	55
Gráfica 16. Fuerza- Desplazamiento de cada una de las piezas ensayadas	62
Gráfica 17. Curva tensión-deformación para diferentes direcciones de impresión.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales propiedades físicas y mecánicas del PETG. (Ficha técnica de Smart Materials 3D).....	18
Tabla 2. Resumen del resultado de simulación.	31
Tabla 3. Ensayo de flexión para probeta de 0,6 mm de pared	39
Tabla 4. Ensayo de flexión para probeta de 1, 2 mm de pared	40
Tabla 5. Ensayo de flexión para probeta de 0,9 mm de pared	42
Tabla 6. Parámetros destacables de impresión de las probetas para el ensayo de flexión	53

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Contextualización del proyecto

Este trabajo, llevado a cabo en el entorno de trabajo del ecosistema de innovación 4Inn en el edificio LUCIA de la Universidad de Valladolid, se enmarca dentro del proyecto de la realización de una férula para inmovilización de la muñeca mediante tecnología de Fabricación Aditiva, lo que se conoce popularmente como Impresión 3D (Gibson et al., 2009).

En los últimos tiempos, uno de los ámbitos más beneficiados por el desarrollo de la tecnología de fabricación aditiva es el de la medicina. Una de las razones de este potencial, es la posibilidad de generar soluciones individualizadas a cada persona. En concreto, en el caso de la férula de muñeca que nos ocupa, además de adaptarse mejor al cuerpo del paciente que otras férulas prefabricadas, resulta más ligera y funcional que una escayola, y además, las aperturas de que dispone permiten una mayor transpiración y posibilitan realizar terapias de electroestimulación para una más rápida recuperación de la lesión.

Según Gibson et al. (2009), el proceso de fabricación aditiva contempla, de manera genérica, las siguientes etapas (Figura 1):

1. Generación del fichero CAD
2. Conversión a formato STL
3. Manipulación del archivo con el software de impresión
4. Configuración de los parámetros de la impresora
5. Construcción
6. Retirada de la pieza de la impresora
7. Posprocesado
8. Aplicación

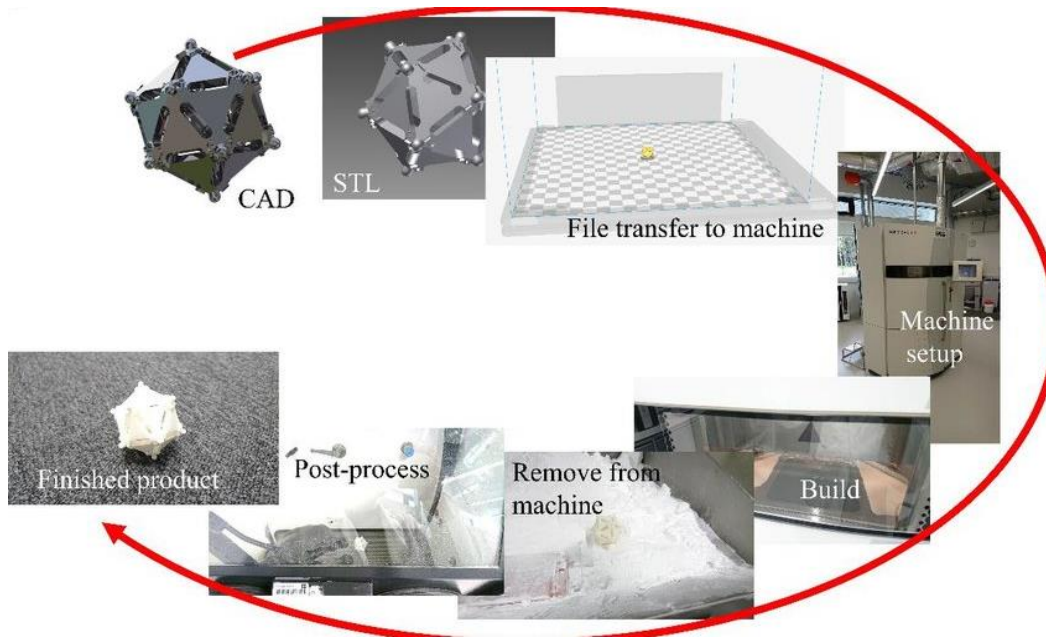


Figura 1. Etapas en el proceso general de fabricación aditiva. (Thompson A. 2009)

Además, en un proceso de fabricación de piezas que van a tener un requerimiento mecánico, la utilización de simulación numérica se ha vuelto una herramienta importante para el estudio de su comportamiento, consiguiéndose así una reducción de costes a la hora de la construcción y ensayo de prototipos.

Concretamente, para la realización de la férula, podemos esquematizar el proceso de trabajo como se muestra en la Figura 2:

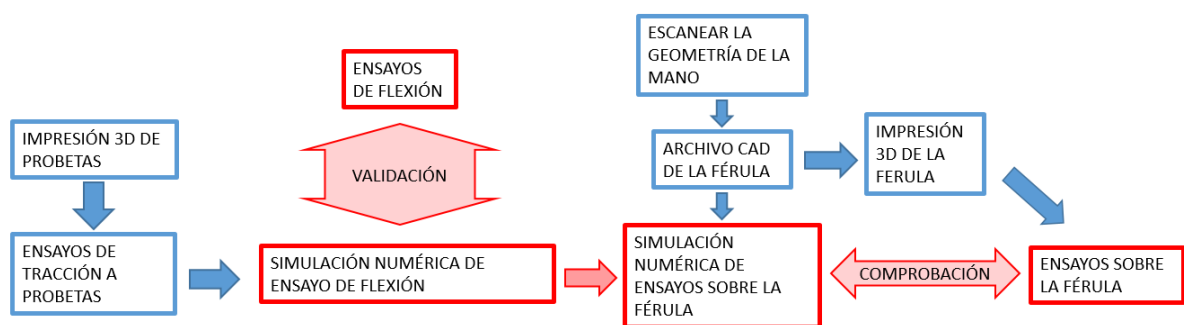


Figura 2. Esquema de las etapas del proyecto de fabricación de la férula.

Objetivos

Volviendo al esquema de la figura anterior, este trabajo se centra en aquellas etapas resaltadas en color rojo.

Ante la dificultad que presenta el conocimiento del comportamiento mecánico de las piezas obtenidas por Fabricación Aditiva, el objetivo es el de desarrollar, mediante la herramienta de Elementos Finitos, un modelo del comportamiento del material que pueda ser utilizado para la posterior simulación del modelo de la férula, el cual permita analizar los requisitos mecánicos que necesitará cumplir.

Asociado a lo anterior, este proyecto también tiene como objetivo el investigar la influencia que puede tener la densidad de relleno utilizada en la fabricación de piezas por impresión 3D sobre sus propiedades mecánicas.



1. TECNOLOGÍAS

En este capítulo se trata de dar un breve marco teórico a los diferentes ámbitos de la ingeniería que conforman este proyecto.

1.1. Fabricación aditiva. Tecnología FDM

La Fabricación Aditiva consiste en la generación de un modelo, previamente diseñado por algún sistema CAD, mediante la acumulación de capas de material. Esto implica que la resolución de la pieza dependerá del espesor de dichas capas.

El proceso de Fabricación Aditiva no es único, sino que existen diversas técnicas, siendo las más relevantes (Orain Industri4.0, s.f.):

- **Estereolitografía (SLA):** se basa en el curado de una resina fotosensible inicialmente en estado líquido, que se lleva a cabo mediante la aplicación por capas de un haz de luz.
- **Sinterizado selectivo por láser (SLS):** consiste en la aplicación de un láser de alta potencia al material en forma de polvo causando su fundición y adhesión.
- **Laser Material Deposition (LMD):** en este caso también se basa en la fusión mediante láser de material en forma de polvo, pero el proceso de fundición y aporte se realiza directamente sobre la zona fundida.
- **Modelado por deposición fundida (FDM):** esta técnica ha sido la utilizada en el proyecto, por lo que a continuación se explica con más detalle.

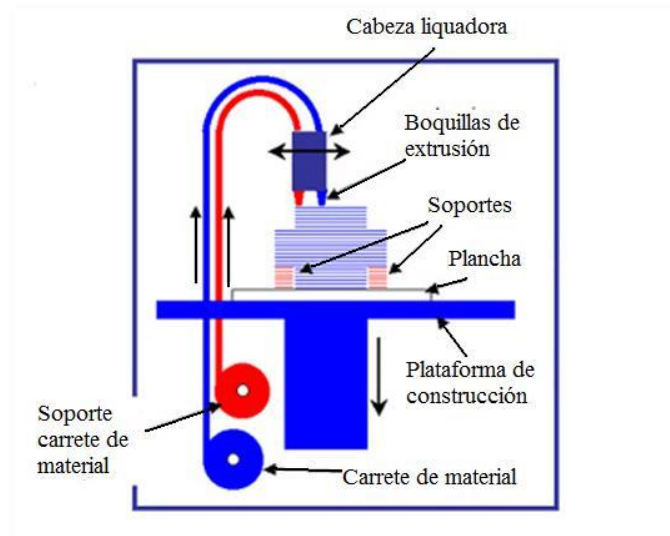


Figura 3. Diagrama del proceso FDM (Infante, 2012)

El fundamento de la impresión por deposición de material fundido, más conocido por sus siglas en inglés FDM (Fused Deposition Modeling) puede apreciarse en la Figura 3, y consiste en lo siguiente: el material fundido se hace pasar por un extrusor, donde se calienta a una temperatura próxima al punto de fusión. Desde la boquilla del extrusor, el material se deposita en forma de hilo formando secciones en el plano horizontal. Una vez que una sección se completa, la placa soporte se posiciona para comenzar a dibujar la siguiente capa. De esta forma, mediante la superposición de capas se consigue llegar a la forma final de la pieza.

Entre las ventajas de este proceso de fabricación se pueden destacar una precisión dimensional aceptable, a un coste económico moderado; así como su facilidad de uso y la posibilidad de realizar diseños complejos.

Sin embargo, uno de los principales problemas que presenta es la incertidumbre a la hora de conocer las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas, debido a la amplia cantidad de factores implicados en el proceso: altura y ancho de capa, velocidad de impresión, temperatura a la que se calienta, tensiones residuales debidas a la contracción al enfriarse la pieza... Entre estos factores, cabe destacar los siguientes:

- Dirección de impresión: estudios como los realizados por Knoop et al. (2015), muestran que la orientación en la que se imprime la pieza (Figura 4) afecta a su resistencia ante tracción o flexión, viéndose reducida de

forma significativa cuando se utiliza la dirección Z. Esta anisotropía se debe a que, en estos casos, los hilos de material no están orientados en la dirección del esfuerzo axial, sino de forma perpendicular, de modo que los esfuerzos de tracción tienden a separar unas capas de otras.

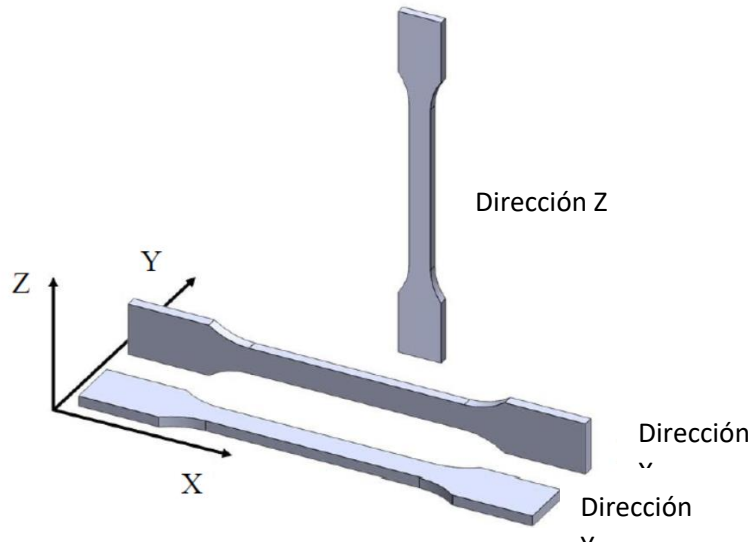


Figura 4. Posibles orientaciones de impresión (Knoop et al., 2015)

- Densidad de relleno: es fácil de ver que las propiedades mecánicas se van a ver afectadas por la densidad del relleno de las piezas (Figura 5) y en menor medida por el patrón de relleno (Figura 6).

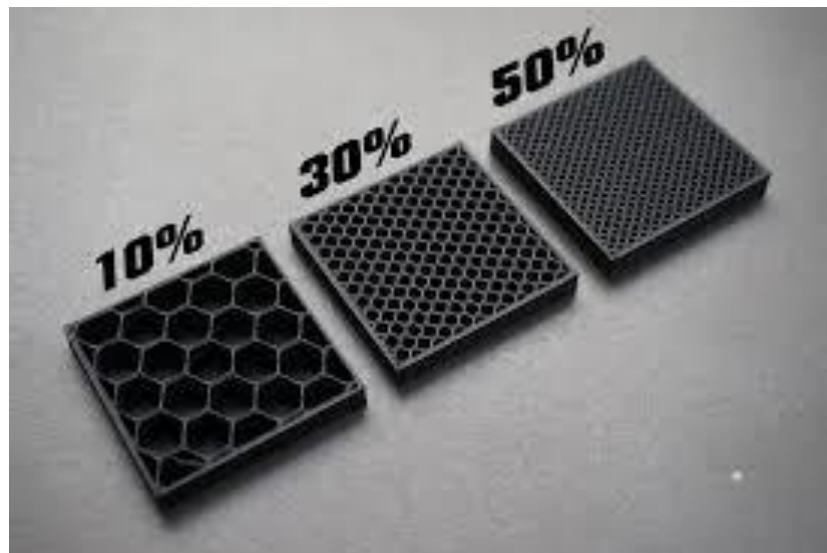


Figura 5. Distintos porcentajes de densidad de relleno. (Impresoras 3D, 2018)

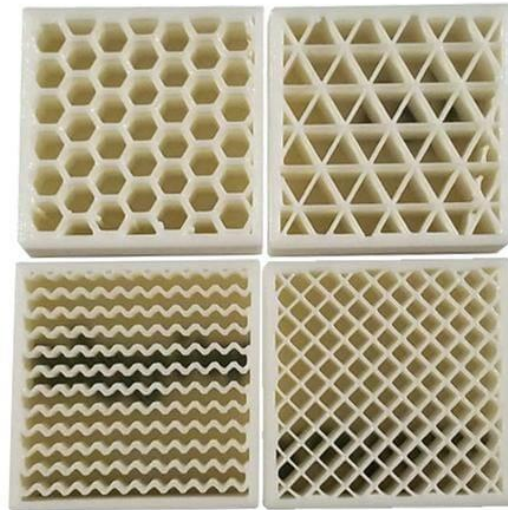


Figura 6. Distintos patrones de relleno. (Impresoras 3D, 2018)

Sin embargo, no está tan claro si la relación entre las propiedades mecánicas y el porcentaje de relleno es lineal o tiene un comportamiento más complejo.

Hay estudios que sostienen que esta relación sí que es lineal (Porter et al., 2019) mientras que otros (Álvarez et al., 2016) sostienen que, para rangos de densidades bajas (hasta 50% de relleno), la relación se puede aproximar bastante a una lineal, pero que para densidades mayores, el ritmo de crecimiento de la resistencia se hace menor (Figura 7). Llevado a la práctica, esto significa que no compensa imprimir con altas densidades de relleno, ya que se va a incrementar el tiempo de impresión, el gasto de material, y el peso de la pieza y, sin embargo, no va a suponer un incremento notable en su resistencia.

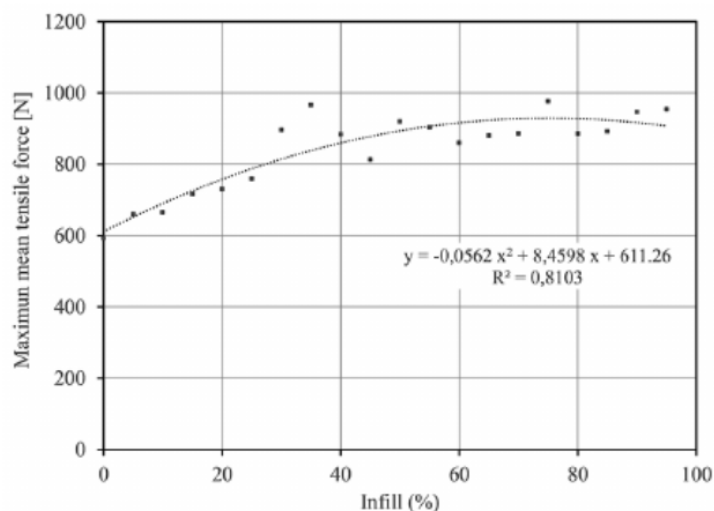


Figura 7. Máximo esfuerzo de tracción en función del porcentaje de relleno. (Álvarez et al., 2016)

Tratando de resolver los problemas ocasionados por estas fuentes de incertidumbre a la hora de estudiar las piezas de impresión 3D mediante un análisis de elementos finitos, hay autores como Martínez (2014) o Baich (2016) que han optado por realizar diseños CAD modelando directamente los filamentos de material fundido (Figura 8).

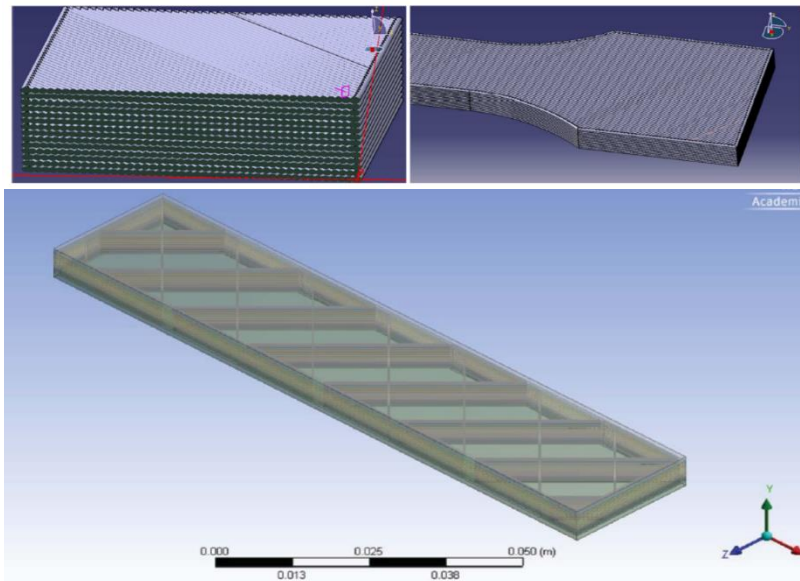


Figura 8. Modelado de filamentos. Arriba: Martínez (2014); abajo: Baich (2016).

Estos modelos tienen el inconveniente de tener un coste computacional elevado, y a la hora de modelar piezas más complejas, en vez de probetas, pueden llegar a resultar inviables.



1.2. Material utilizado: PETG

El material que se ha usado para realizar las piezas estudiadas en este proyecto es el Tereftalato de Polietileno modificado con Glicol (PETG). Según Trapero (2017), este plástico es una variante del PET, el cual es el plástico más producido a nivel mundial. Esta variación, que modifica su estructura química, lo hace menos frágil, más transparente y más fácil de manipular para el uso en la impresión 3D.

Al igual que el PET es el plástico más común, en el entorno de la tecnología FDM, el PETG también es de los más utilizados, junto al Ácido Poliláctico (PLA) y el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS). Las principales características por las que se ha elegido por delante de los otros materiales mencionados son:

- Es más elástico y más resistente que el PLA y el ABS.
- Mayor resistencia a la temperatura que el PLA.
- Más sencillo de imprimir que el ABS
- Puede usarse para el sector de la alimentación.
- Tiene una buena resistencia química

Como referencia, se muestran en la Tabla 1 las principales propiedades de este material (Ficha técnica de Smart Materials 3D).

Tabla 1. Principales propiedades físicas y mecánicas del PETG. (Ficha técnica de Smart Materials 3D)

Densidad	1230 kg/m ³
Módulo de flexión	2100 MPa
Resistencia a flexión	69 MPa
Resistencia a tracción	50 MPa

1.3. Método de los elementos finitos

Son pocas las veces en que los componentes mecánicos y estructuras tienen una geometría tan simple (o lo suficientemente para que puedan ser aproximados a una de estas geometrías) que permiten analizar su comportamiento mecánico por medio de métodos básicos de la mecánica.

Es por esto que para analizar geometrías complejas se han desarrollado, a lo largo de décadas, métodos de cálculo computacional. Para el cálculo de sólidos, el método por excelencia es el de los Elementos Finitos, más conocido por sus siglas en inglés: FEM (Finite Element Method).

Este método se fundamenta en la transformación de sistemas continuos en sistemas discretos, es decir, la división de la estructura real en pequeñas subestructuras (elementos) de carácter finito, que se unen por medio de nodos (Figura 9).



Figura 9. Proceso de discretización. (García, s.f.)

El procedimiento de cálculo numérico es análogo al análisis matricial de estructuras de barras, por lo que las etapas básicas de cálculo son (Oñate, 1995):

- Etapa 1: seleccionar un modelo matemático apropiado para describir el comportamiento de la estructura.
- Etapa 2: discretizar la estructura, formando la malla, que es como se conoce al conjunto de elementos.
- Etapa 3: aplicar el Principio de los Trabajos Virtuales para obtener las matrices de rigidez y los vectores de cargas.
- Etapa 4: ensamblar las matrices de rigidez y los vectores de carga.



- Etapa 5: resolver el sistema de ecuaciones resultante, obteniéndose los desplazamientos en los nodos.
- Etapa 6: cálculo de deformaciones, esfuerzos y reacciones.
- Etapa 7: interpretación y presentación de los resultados.

Según el profesor Sierra (2018), la generación de la malla es una de las etapas más importantes en el proceso. Hay que tener en cuenta que:

- Debe ajustarse a la capacidad computacional, pues a mayor número de elementos, mayor será el esfuerzo de cálculo.
- Tiene que ser lo más regular posible en todo el dominio, evitando tener elementos muy deformados.
- En las zonas de mayor gradiente de cualquier variable, la malla debe tener más resolución.

Atendiendo a cómo se conectan unos elementos con otros, podemos diferenciar mallas estructuradas y no estructuradas. En sólidos tridimensionales, las mallas estructuradas están formadas por elementos hexaédricos, mientras que las no estructuradas lo están por tetraedros.

Los elementos hexaédricos aportan mayor precisión de cálculo, pero en muchas ocasiones se necesitan utilizar los elementos tetraédricos, pues se adaptan mucho mejor a las geometrías complejas. Hoy en día, los softwares de análisis FEM tienen herramientas para realizar el mallado de forma automática, aunque el usuario sigue teniendo la capacidad de modificar los parámetros que entienda oportunos.

Budynas et al., (2008) señalan que, al ser análisis FEM una técnica numérica en la que se transforma un dominio continuo en otro discreto, lleva asociados unos errores de precisión. Por un lado, aparecen errores computacionales, ya que se utilizan métodos de cálculo iterativos, por lo que no se obtienen resultados exactos sino aproximaciones que tienden al valor exacto a medida que se aumenta el número de iteraciones. Por otro lado, aparecen errores de conversión discreta, al aproximar la geometría y la distribución de desplazamientos del modelo ideal por

un número finito de elementos. En la Figura 10, se puede apreciar un ejemplo de este último tipo de error.

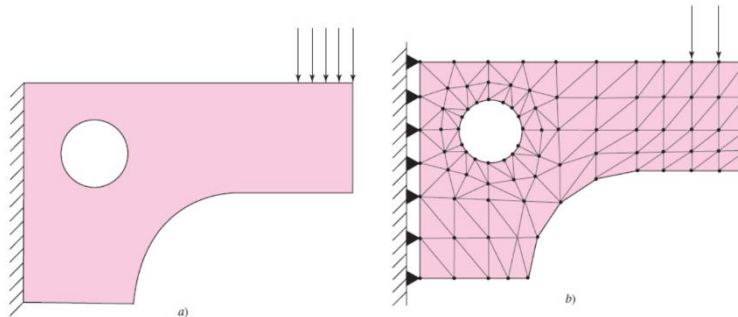


Figura 10. Ejemplo de error de conversión discreta. (Budynas et al., 2008)

Además de estos tipos de errores, se podrían añadir los errores que aparecen cuando las condiciones de contorno que hay que imponer no son claras o, aun siéndolo, no son fáciles de aplicar. Y es que junto con la generación y elección de una malla apropiada, la otra gran dificultad que aparece a la hora de trabajar con software de FEM, es la imposición de las condiciones de contorno.

Para los análisis realizados en este proyecto se ha utilizado el módulo *Static Structural* de la versión educacional de ANSYS 19.1. Esta versión educacional limita el tamaño de la malla a 32000 nodos o elementos, por lo que cabría la posibilidad de que la precisión de algún resultado estuviera condicionada por esta restricción.

1.4. Ensayos

Los ensayos de materiales sirven para la determinación de sus propiedades con el fin de caracterizarlos o de controlar la calidad en la fabricación (Blanco, 2018). Se pueden distinguir varias clasificaciones de los ensayos, atendiendo a diferentes criterios:

- Según la propiedad que se quiera estudiar: químicos, físicos, metalúrgicos, mecánicos...
- Según el estado final de la pieza ensayada: destructivos y no destructivos
- Según la utilidad del ensayo: científicos o tecnológicos

En este trabajo se han realizado ensayos mecánicos. Éstos son los que tratan de caracterizar la resistencia mecánica de los materiales. Concretamente, los tres ensayos mecánicos que se han realizados han sido:

- Ensayo de tracción según marca la norma UNE-EN ISO 527. Se trata de un ensayo destructivo y se realiza para estudiar el comportamiento a tracción pura del material (Módulo de Young, límite elástico, resistencia a rotura...). Se realiza estirando axialmente una probeta normalizada sujeta por sus extremos (Figura 11).



Figura 11. Ensayo de tracción

- Ensayo de flexión a 3 puntos según marca la norma UNE-EN ISO 178. Se trata de un ensayo destructivo y se utiliza para estudiar el comportamiento a flexión (módulo de flexión, resistencia a la flexión...) en materiales plásticos. Se realiza sobre una probeta soportada por apoyos simples y a la que se le aplica una carga en su punto medio (Figura 12).



Figura 12. Ensayo de flexión a 3 puntos. (Instron, s. f.)

- Ensayo específico para estudiar una férula de muñeca. En el Capítulo 4 se muestra el diseño experimental elegido para el estudio del comportamiento mecánico de dicha pieza (Figura 13).



Figura 13. Férula a ensayar.



2. VALIDACIÓN DE MODELOS FEM

2.1. Validación del modelo de viga empotrada

Metodología

El primer paso en la utilización de ANSYS para realizar análisis FEM, fue la validación de un modelo de viga empotrada y cargada puntualmente en el extremo libre, con el objetivo de poner a prueba los conocimientos técnicos necesarios para utilizar este software. Éste es un caso ampliamente estudiado, por lo que es fácil comprobar si se está realizando un modelo adecuado comparando los resultados de tensión y desplazamiento máximos con los teóricos. El caso teórico (Figura 14) se ha extraído de Budynas et al. (2008).

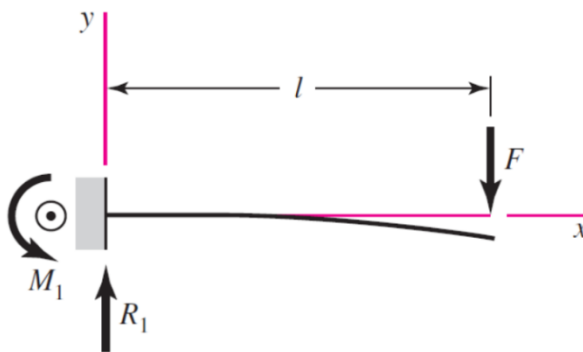


Figura 14. Viga en voladizo cargada puntualmente en el extremo. Budynas et al. (2008)

Para este caso, se muestra el desplazamiento máximo, y la tensión normal máxima en las ecuaciones (Eq. 1) y (Eq. 2):

$$y_{\text{máx}} = \frac{-F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{|M_{\text{máx}}|}{I} \cdot \frac{h}{2} = \frac{|-F \cdot l|}{I} \cdot \frac{h}{2} \quad (\text{Eq. 2})$$

Siendo:

- E: Módulo de Young
- I: Momento de inercia
- h: Canto de la sección

Los datos dimensionales y propiedades mecánicas de la viga que se ha estudiado son los siguientes:

- Material: aluminio ($E = 71 \cdot 10^3 \text{ MPa}$)
- Ancho de la sección: $b = 0,010 \text{ m}$
- $h = 0,004 \text{ m}$
- $I = 5,33 \cdot 10^{-11} \text{ m}^4$
- $L = 0,080 \text{ m}$
- $F = 10 \text{ N}$

Sustituyendo en las ecuaciones (Eq. 1) y (Eq. 2), se obtienen los siguientes desplazamientos y tensiones máximas:

$$y_{m\acute{a}x} = -0,4507 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 30 \text{ MPa} \quad (\text{Eq. 4})$$

En cuanto al modelo realizado en ANSYS podemos destacar que ante la simplicidad de la geometría, el programa fue capaz de crear automáticamente una malla cartesiana de elementos hexaédricos.

En cuanto a las condiciones de contorno (Figura 15), se han restringido todos los grados de libertad en el empotramiento y se ha aplicado una fuerza de 10 N en la cara del extremo libre.

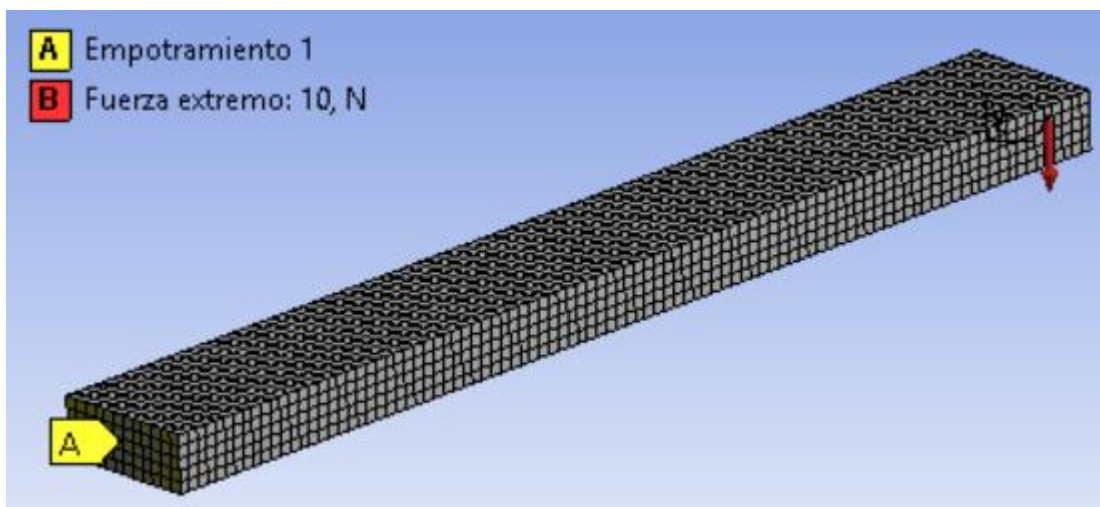


Figura 15. Condiciones de contorno de la viga empotrada

Resultados

Se muestran a continuación los resultados que se obtuvieron con estas condiciones. Las Figuras 16 y 17 muestran respectivamente el resultado de tensiones normales y desplazamientos en todo el dominio.

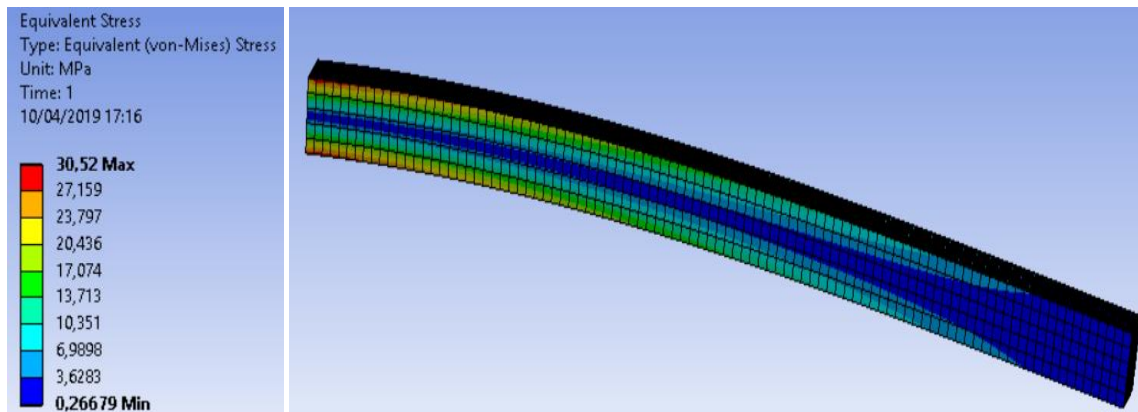


Figura 16. Tensión equivalente de Von Mises (MPa).

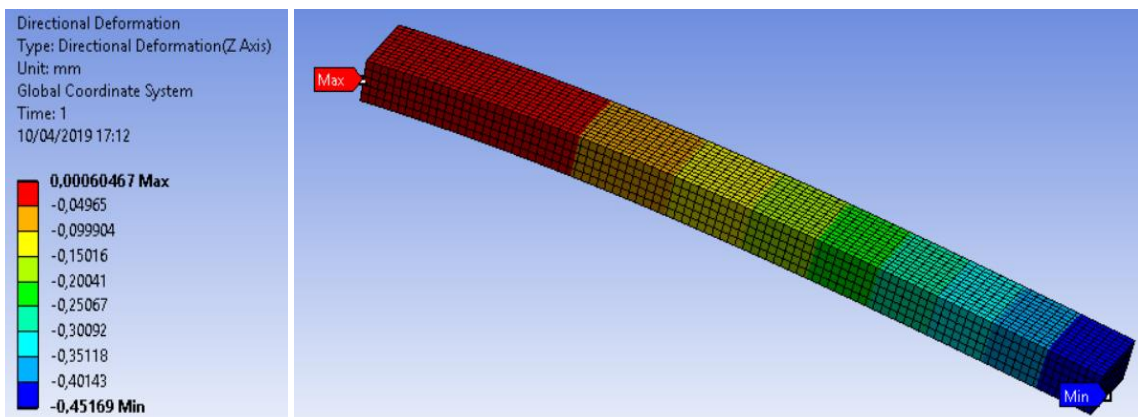


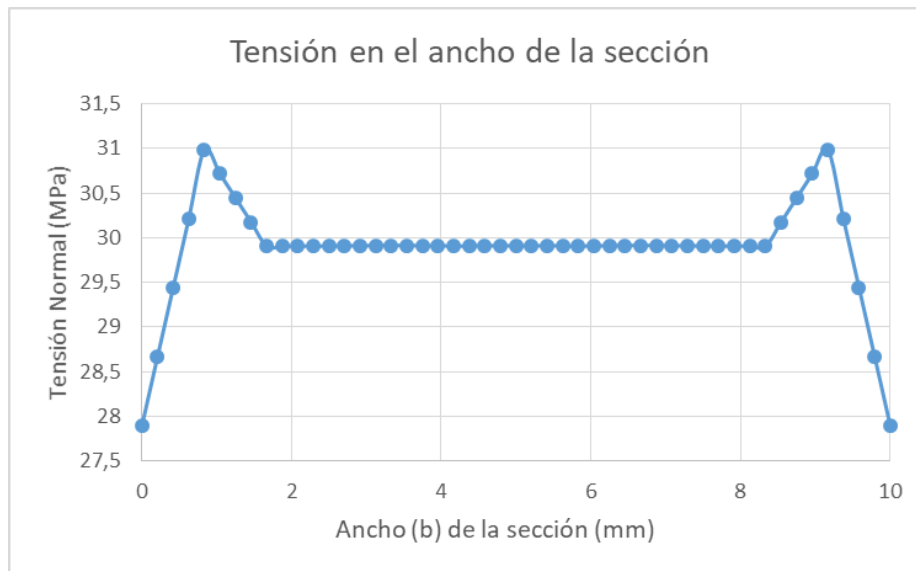
Figura 17. Desplazamientos en dirección transversal (mm)

Los resultados, cualitativamente, se corresponden con el comportamiento real de las magnitudes estudiadas. Cuantitativamente, los valores máximos obtenidos para las tensiones normales y desplazamientos fueron:

$$y_{\text{máx}} = -0,4517 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 29,9 \text{ MPa} \quad (\text{Eq. 6})$$

El resultado de tensión máxima se dio en los extremos de la sección empotrada, como era de esperar. Sin embargo, según la teoría, este valor debería mantenerse constante en todo el ancho (b) de la sección, mientras que los valores que se obtuvieron se muestran en el la Gráfica 1.



Gráfica 1. Variación de los valores de tensión en el ancho de la sección

Análisis y discusión de resultados

Como muestran las Figuras 16 y 17, el comportamiento de la viga es el esperado; si nos fijamos en los resultados de desplazamientos y tensión normal máxima se obtienen respectivamente unos errores relativos del 0,22% y 0,33%, de modo que podemos concluir que el modelo elegido representa fielmente el modelo teórico.

Por otro lado, en cuanto a la tensión a lo largo del ancho de la sección se puede observar (Gráfica 1) que el valor se mantiene en la zona central mientras que en los extremos de la dimensión b, los resultados oscilan ligeramente, aunque en un rango aceptable según los criterios ingenieriles (La oscilación máxima es del 7% entre el extremo y la zona central).

2.2. Validación del modelo de ensayo a flexión según ISO 178

Metodología

El siguiente paso fue la construcción del modelo de ensayo de flexión a 3 puntos, según marca la norma UNE-EN ISO 178, que en etapas posteriores se utilizaría para el estudio de las propiedades mecánicas del PETG.

Utilizando un material conocido, de nuevo el aluminio, se aplicaron las ecuaciones pertinentes según la norma (Eq. 7 , Eq. 8 y Eq. 9) para comprobar si el valor obtenido del Módulo a flexión (equivalente en este caso al Módulo de Young por tratarse de un material isótropo) se correspondía con el valor esperado de $71 \cdot 10^3$ MPa. De esta forma podríamos asegurarnos de que la aplicación de las condiciones de contorno es aceptable y, por lo tanto, no debería condicionar el resultado a la hora de estudiar las probetas de PETG.

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot s \cdot h}{L^2} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$E_f = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (\text{Eq. 9})$$

Siendo:

- L: distancia entre apoyos
- s: desplazamiento máximo o flecha
- σ : Tensión
- ε : Deformación
- E_f : Módulo a flexión

El primer paso fue la generación de la geometría por CAD, y la posterior asignación de los materiales: aluminio para la probeta (la cual es idéntica a la del apartado anterior), y acero para los apoyos (a una distancia de 64 mm entre ellos) y el cilindro a través del cual se aplica la carga. (Figura 18).

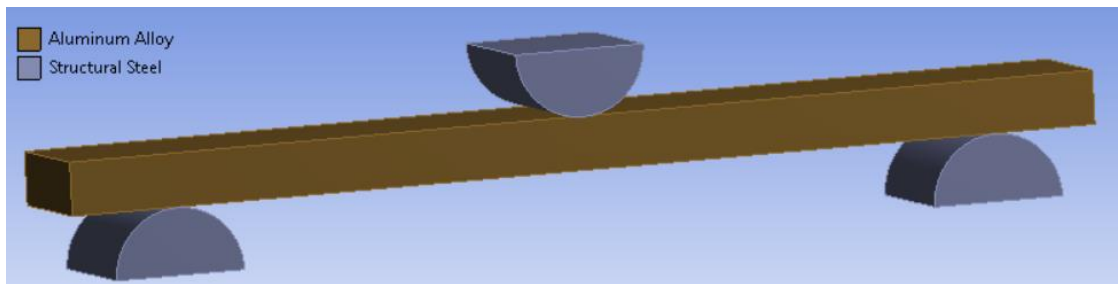


Figura 18. Geometría del ensayo de flexión a 3 puntos.

Al cargar la geometría en ANSYS, se generan automáticamente las condiciones de contacto entre cada uno de los cuerpos. El programa interpreta por defecto los contactos como uniones rígidas, como si los sólidos estuviesen soldados. Sin embargo, en muchos casos, entre ellos éste, que dos sólidos estén en contacto no significa que no se muevan. Por lo tanto, el cambiar el tipo de contacto, para que un cuerpo pueda deslizarse sobre otro, es fundamental para obtener resultados coherentes.

Como se puede ver en la Figura 19, en este caso la malla sigue siendo de elementos hexaédricos, pero en este caso es menos estructurada, ya en las zonas de contacto se consideró oportuno reducir el tamaño de las celdas, para obtener resultados más precisos ya que en estas zonas puede existir concentración de tensiones.

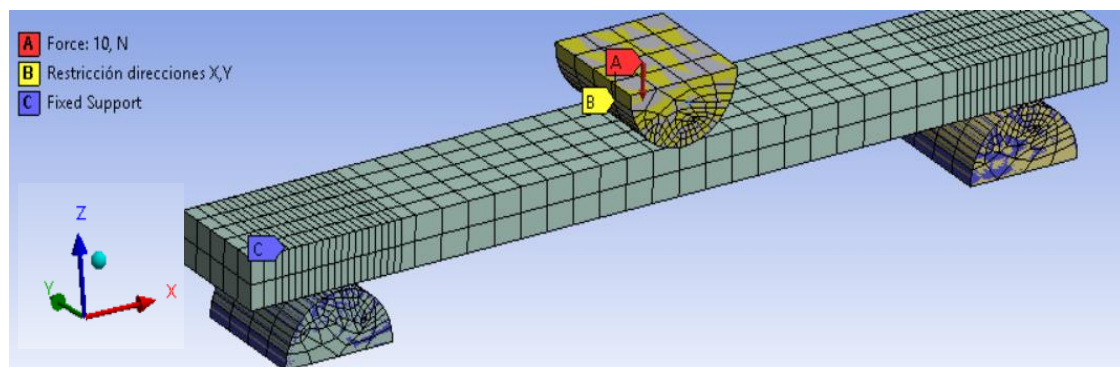


Figura 19. Malla y condiciones de contorno del ensayo de flexión a 3 puntos.

En la Figura 19 también se pueden observar las condiciones de contorno que se consideraron apropiadas para realizar la simulación: se restringieron todos los grados de libertad en los apoyos, mientras que en el cilindro de carga se permitió

únicamente el desplazamiento en la dirección Z. Se aplicaron dos estados de carga, 5 N y 10 N, para posteriormente poder calcular el Módulo de flexión (Eq. 9).

Resultados

Una vez impuestas las condiciones de contorno se procedió a calcular la solución, cuyo resumen se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2. Resumen del resultado de simulación.

Estado de carga	F (N)	s (m)	σ (MPa)	ε (m/m)
1	5	$7,27 \cdot 10^{-6}$	3	$4,26 \cdot 10^{-5}$
2	10	$1,45 \cdot 10^{-5}$	6	$8,52 \cdot 10^{-5}$

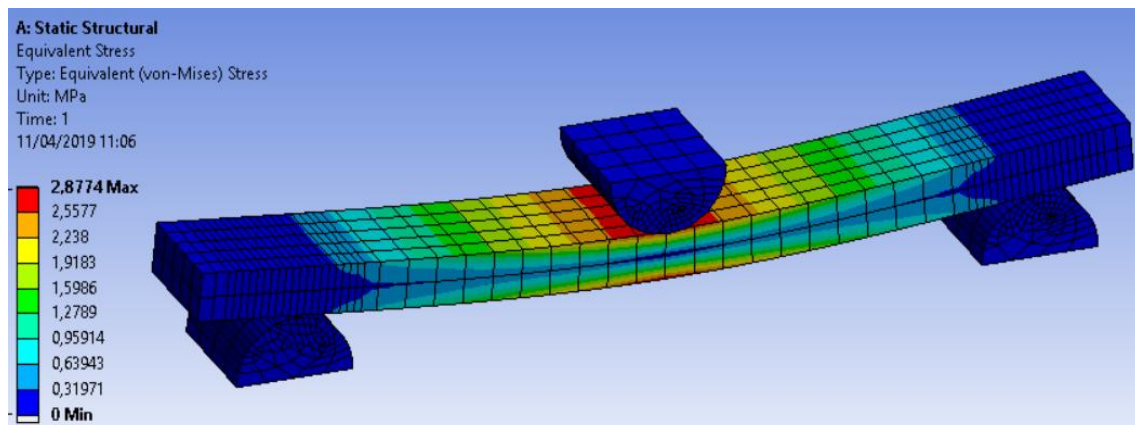


Figura 20. Tensión equivalente de Von Mises (MPa).

De modo que aplicando la Eq. 9, se obtuvo un Módulo de flexión (Equivalente al módulo de Young) de:

$$E_f = 70362 \text{ MPa} \quad (\text{Eq. 10})$$

Análisis y discusión de resultados

Comparando el resultado del Módulo de flexión según la norma, con el módulo de Young que utiliza ANSYS para el aluminio (71000 MPa), se ha obtenido un error relativo del 0,9%.



Con esto queda demostrado que el modelo, con el que posteriormente se ha estudiado el comportamiento mecánico del material de impresión 3D, se ajusta considerablemente bien a la realidad física de un ensayo de flexión a 3 puntos.

3. ENSAYO DE FLEXIÓN A 3 PUNTOS PARA PROBETAS DE PETG

En este capítulo se ha tratado de estudiar la influencia del porcentaje de relleno en el comportamiento mecánico del material, y con qué grado de fidelidad el modelo de simulación, validado anteriormente, reproduce los resultados empíricos obtenidos mediante el ensayo de flexión de las probetas impresas con tecnología FDM (por lo tanto acompañadas de incertidumbre por la acumulación de parámetros de impresión).

En el capítulo anterior, a la hora de simular las probetas de aluminio disponíamos de datos sobradamente contrastados sobre el comportamiento mecánico del material. En este caso, al tratarse de probetas de PETG, no disponemos de estos.

Por lo tanto, para caracterizar el material se han tomado, bien los datos de Smart Materials, o bien los datos empíricos obtenidos en el propio laboratorio por Valentín (2019), quien ha realizado ensayos a tracción de probetas de PETG según la norma ISO 527.

Por otro lado, las piezas fabricadas con tecnología de impresión 3D se caracterizan por tener dos zonas diferenciadas: pared y relleno. Por ello, se han realizado dos modelos de simulación en los que se intenta reflejar, mediante dos soluciones diferentes, esta característica de la geometría.

3.1. Modelo 1

Metodología

Este modelo consiste en utilizar únicamente los datos del comportamiento del material para una pieza con un relleno del 100%. A partir de este dato, se intenta modificar la geometría para representar los diferentes porcentajes de relleno, y poder comparar posteriormente los resultados.

Para la representación de los distintos porcentajes, no se ha podido realizar modelos como los de Martínez (2014) o Baich (2016) (Figura 8), en los que se



representan los filamentos de material fundido, debido al elevado coste computacional que suponen.

En su lugar, se ha optado por plasmar el patrón de relleno mediante láminas continuas que unen las caras superior e inferior de la probeta. Se ha elegido un patrón de relleno en rejilla a 45° , y se han diseñado las probetas de esta forma para los siguientes porcentajes de relleno: 10, 20, 30, 40 y 50% (Figura 21). No se han realizado para porcentajes mayores, ya que, como se ha comentado anteriormente, habitualmente no resulta rentable imprimir con densidades de relleno más elevadas.

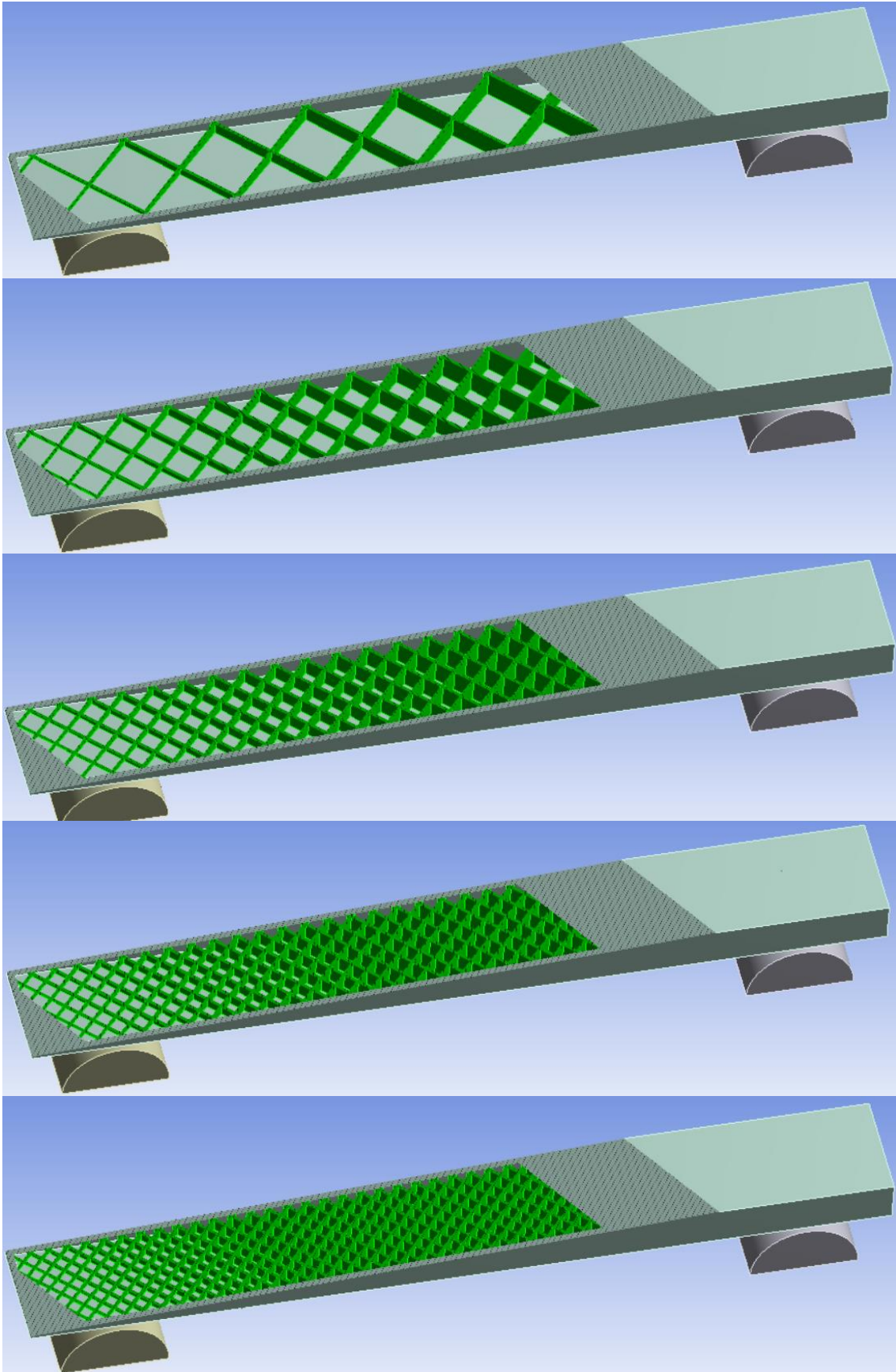


Figura 21. Corte diagonal a las probetas con porcentaje de relleno creciente de arriba a abajo (ver texto)

Además de los porcentajes anteriormente comentados, se realizaron las simulaciones para una probeta sin relleno (0%) y para una probeta maciza (100%).

Con respecto a la geometría de las probetas, las dimensiones exteriores son las utilizadas en apartados anteriores (80 mm x 10 mm x 4 mm), y se han utilizado dos espesores de las paredes: 1,2 mm y 0,6 mm, de modo que los porcentajes del área de la sección de la probeta que supone el relleno son del 30,4% en el caso de la pared de 1,2 mm y del 61,6% para la pared de 0,6 mm.

En cuanto a las propiedades físicas y mecánicas del material, a la espera de conocer los resultados de los ensayos realizados por el compañero en el laboratorio, en primer lugar se tomó el valor del Módulo de flexión proporcionado por Smart Materials 3D: 2100 MPa.

Para caracterizar la elasticidad del material se necesita otro parámetro. En este caso se definió el Coeficiente de Poisson, que caracteriza el estrechamiento de la sección ante esfuerzos longitudinales. Al no contar con un valor de este coeficiente en el caso del PETG, se decidió utilizar el valor que dispone ANSYS en su base de datos para el PET ($\nu = 0,389$), ya que el PETG se trata de una modificación de este material.

Una vez definida la geometría y las propiedades del material, se generó el mallado. Como se puede apreciar en la Figura 22, en esta ocasión la geometría es más compleja, por lo que automáticamente se generan elementos tetraédricos en vez de hexaédricos, lo que implica una pérdida de precisión. También se observa que en las zonas de contacto se reduce el tamaño del elemento.

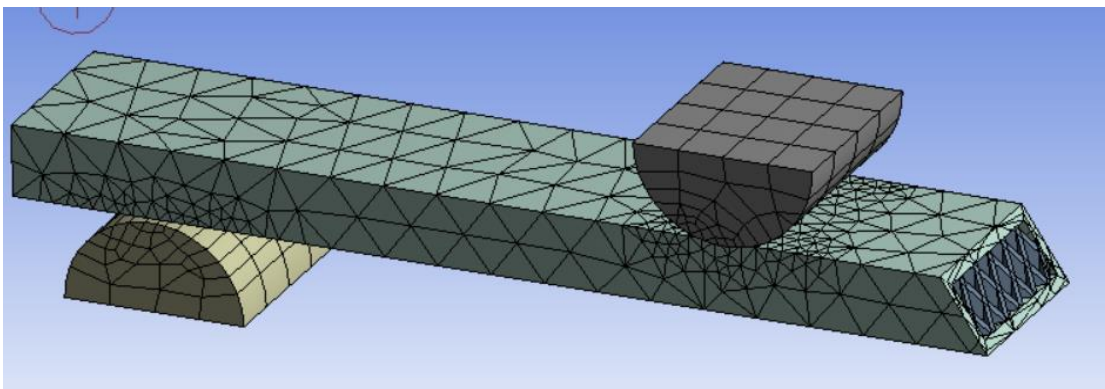


Figura 22. Mallado de las probetas con pared y relleno.

Posteriormente hay que imponer las condiciones de contorno. Dado que se trata del mismo ensayo a flexión, las restricciones del movimiento coincidieron con las del apartado anterior.

Sin embargo, para este caso, la carga aplicada se cambió quedando de esta forma:

- Situación de carga 1: 10 N hacia abajo
- Situación de carga 2: 20 N hacia abajo

Una vez impuestas las condiciones de contorno se realizaron las simulaciones para cada uno de los porcentajes de relleno y espesores de pared propuestos.

Después de obtener los resultados con el Módulo de flexión proporcionado por Smart Materials 3D, se repitieron las simulaciones, pero esta vez con las características del material obtenidas por Valentín (2019) en el laboratorio realizando ensayos de tracción.

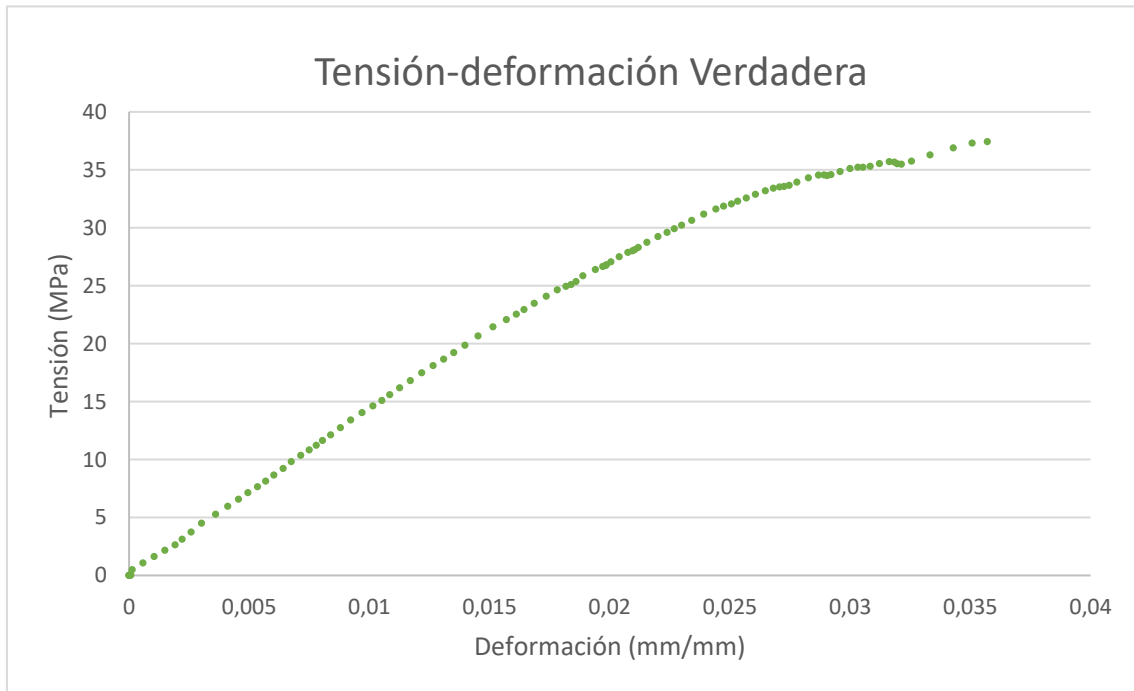
Estos resultados corresponden a una curva tensión-deformación ingenieril, pues no se ha tenido en cuenta el estrechamiento de la sección en la zona de rotura. Por lo tanto, es necesario transformar estos datos para obtener una curva tensión-deformación verdadera, para lo que es necesario las siguientes ecuaciones (Loaeza, 2014):

$$\sigma_T = \sigma_E(1 + \varepsilon_E) \quad (\text{Eq. 11})$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon_E) \quad (\text{Eq. 12})$$

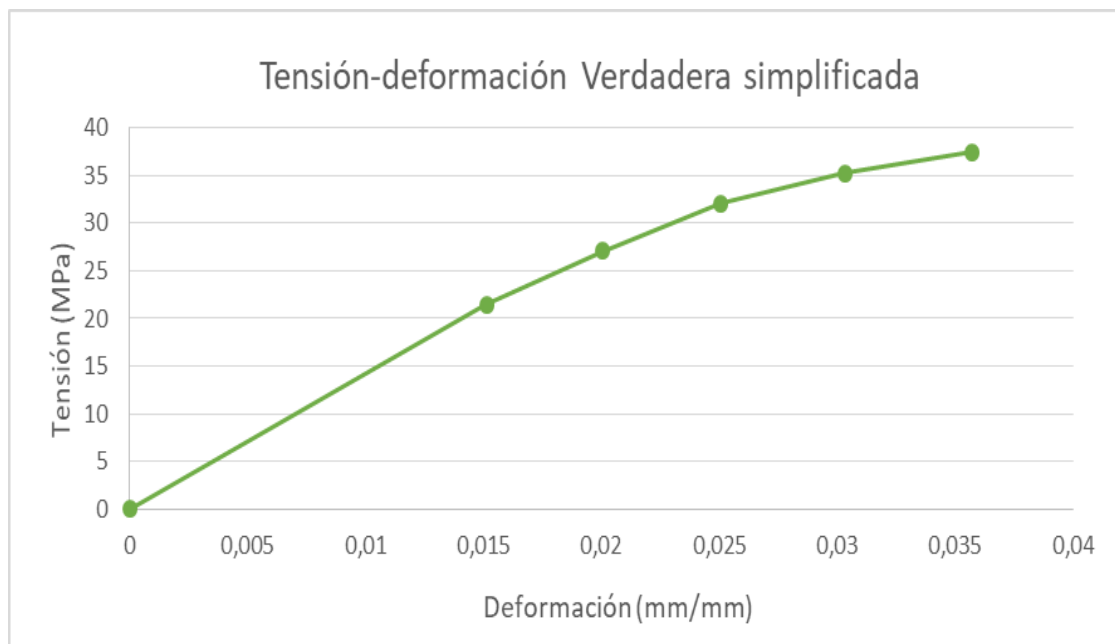
siendo el subíndice T relativo a la curva verdadera, y el subíndice E a la ingenieril.

De modo que la curva obtenida es la que se muestra en la Gráfica 2:



Gráfica 2. Curva tensión-deformación verdadera para probeta de 100% de relleno

En ANSYS no se ha introducido los datos de esta curva, sino una curva simplificada, (obtenida considerando linealidad hasta una deformación aproximada del 1,5% y tomando posteriormente 1 de cada 10 puntos) (Gráfica 3) y el módulo de Young correspondiente: 1299,8 MPa.



Gráfica 3. Curva tensión-deformación simplificada para probeta de 100% de relleno

Además para realizar estas simulaciones se cambió el espesor de la pared de la probeta a 0,9 mm y se variaron los estados de carga:

- Situación de carga 1: 2 N hacia abajo
- Situación de carga 2: 6 N hacia abajo

Resultados

En primer lugar se muestran los resultados de las simulaciones utilizando los valores de las propiedades mecánicas del PETG de Smart Materials 3D.

En las Tablas 3 y 4, se recogen los resultados necesarios para la obtención de los valores del Módulo de flexión aplicando el procedimiento de cálculo según la norma ISO 178 para la realización del ensayo de flexión a 3 puntos.

También aparece recogido en estas tablas el valor del Cociente de rigidez (K) medido en el estado de carga 2 (En el que la fuerza aplicada son 20 N) que, si bien es proporcional al Módulo de flexión, puede resultar más intuitivo al relacionar fuerzas y desplazamientos, en vez de tensiones y deformaciones.

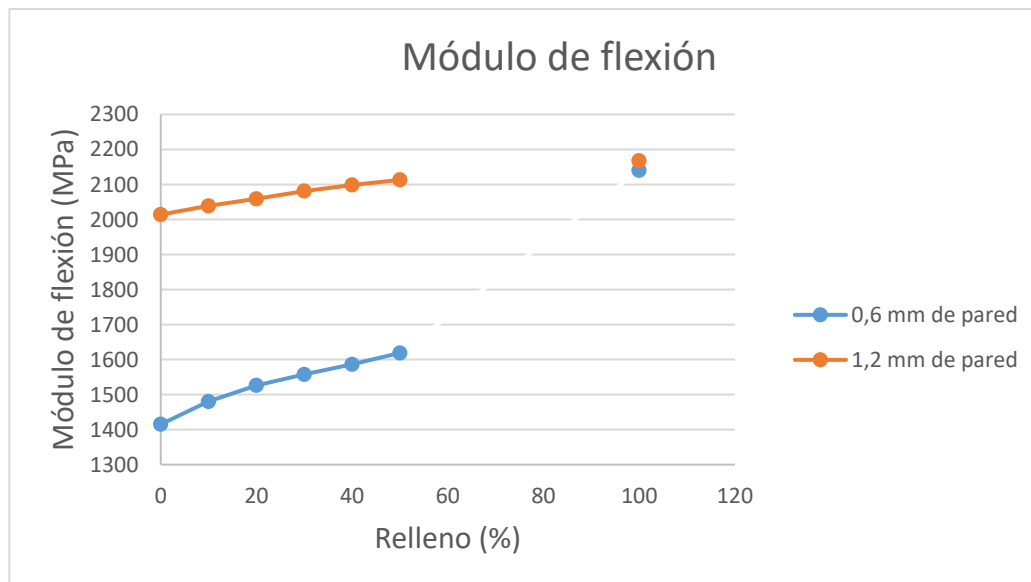
Tabla 3. Ensayo de flexión para probeta de 0,6 mm de pared

Espesor de pared: 0,6 mm						
Porcentaje de relleno	s1 (mm)	s2 (mm)	$\epsilon 1$ (m/m)	$\epsilon 2$ (m/m)	Módulo de flexión (MPa)	Rigidez (N/mm)
0	-0,741	-1,4645	-0,004341	-0,008581	1415,1	13,7
10	-0,717	-1,4085	-0,004200	-0,008253	1480,3	14,2
20	-0,698	-1,3694	-0,004093	-0,008024	1526,3	14,6
30	-0,685	-1,342	-0,004011	-0,007863	1557,7	14,9
40	-0,672	-1,318	-0,003940	-0,007723	1586,3	15,2
50	-0,659	-1,2918	-0,003863	-0,007569	1618,8	15,5
100	-0,496	-0,97409	-0,002904	-0,005708	2140,3	20,5

Tabla 4. Ensayo de flexión para probeta de 1, 2 mm de pared

Espesor de pared: 1,2 mm						
Porcentaje de relleno	s1 (mm)	s2 (mm)	ϵ_1 (m/m)	ϵ_2 (m/m)	Módulo de flexión (MPa)	Rigidez (N/mm)
0	-0,526	-1,0341	-0,003080	-0,006059	2014,0	19,3
10	-0,52	-1,0224	-0,003048	-0,005991	2038,9	19,6
20	-0,516	-1,013	-0,003022	-0,005936	2059,2	19,7
30	-0,51	-1,0025	-0,002991	-0,005874	2081,1	20,0
40	-0,506	-0,99441	-0,002967	-0,005827	2098,5	20,1
50	-0,503	-0,98762	-0,002948	-0,005787	2113,3	20,3
100	-0,49	-0,96225	-0,002870	-0,005638	2167,8	20,8

En la Gráfica 4 se muestran los resultados anteriores del Módulo de flexión graficados, para hacer más fácil su comparación y análisis. Por otra parte, no se ha considerado oportuno plasmar la gráfica de los coeficientes de rigidez, pues estaríamos visualizando una gráfica con valores totalmente proporcionales a los Módulos de flexión.



Gráfica 4. Módulo de flexión en función del porcentaje de relleno y el espesor de la pared (Datos de Smart Materials 3D)

Se puede observar que en el rango de porcentajes estudiado (0-50%), si bien se puede aproximar la variación del Módulo de flexión por un incremento lineal, más bien corresponde a una variación parabólica.

Además de calcular el Módulo de flexión, se ha estudiado como influye el porcentaje de relleno en las tensiones equivalentes de Von-Mises máximas que aparecen al aplicar la fuerza de 20 N sobre el punto medio de la probeta. Se ha estudiado tanto el valor máximo, que se da por efecto de concentración de tensiones en las zonas próximas a la superficie de contacto con el cilindro de aplicación de la carga (Figura 23); como el punto donde según la teoría de la Resistencia de Materiales, deberían producirse, es decir, en alguno de los puntos de la fibra inferior o superior de la sección central.

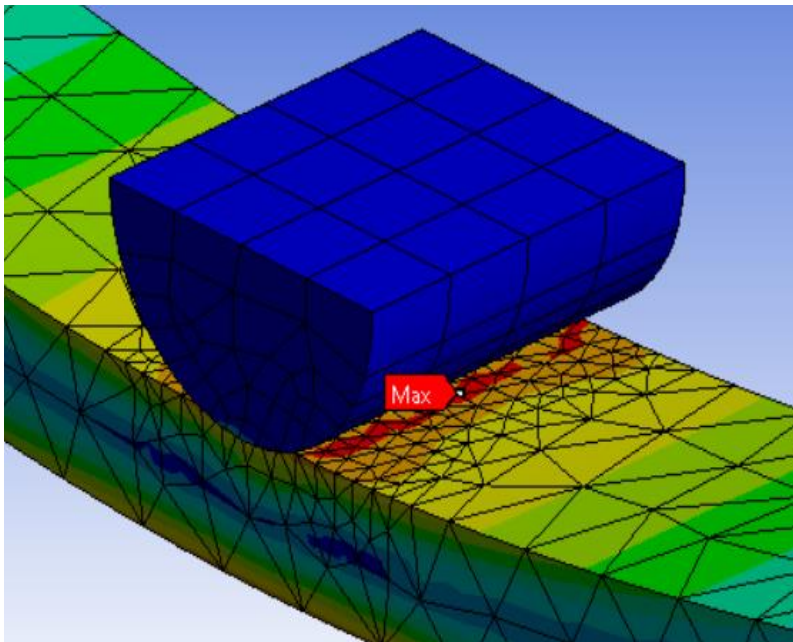
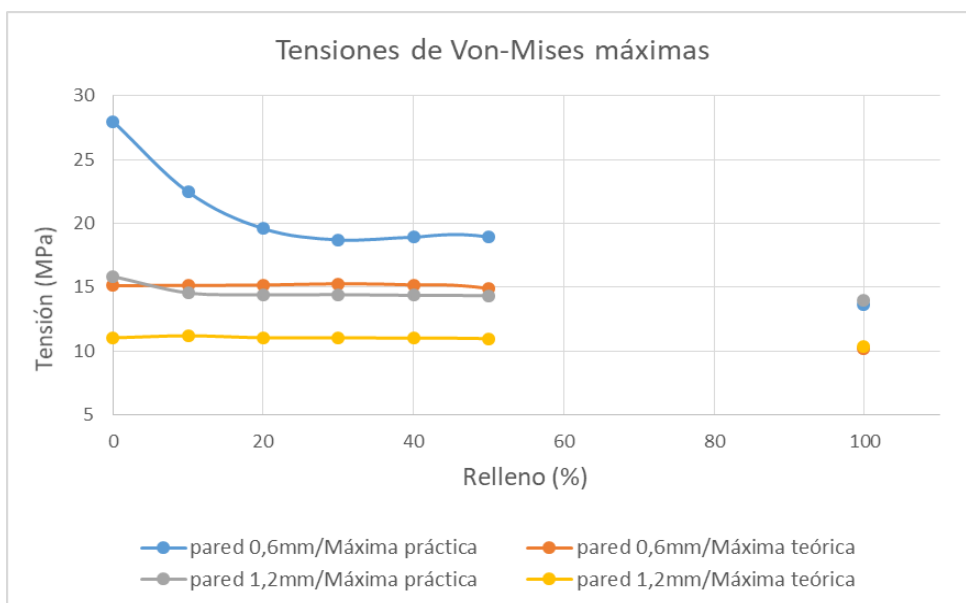


Figura 23. Detalle de tensión equivalente de Von-Mises máxima por concentración de tensiones

En la Gráfica 5 se exponen los mencionados valores de tensión máxima.

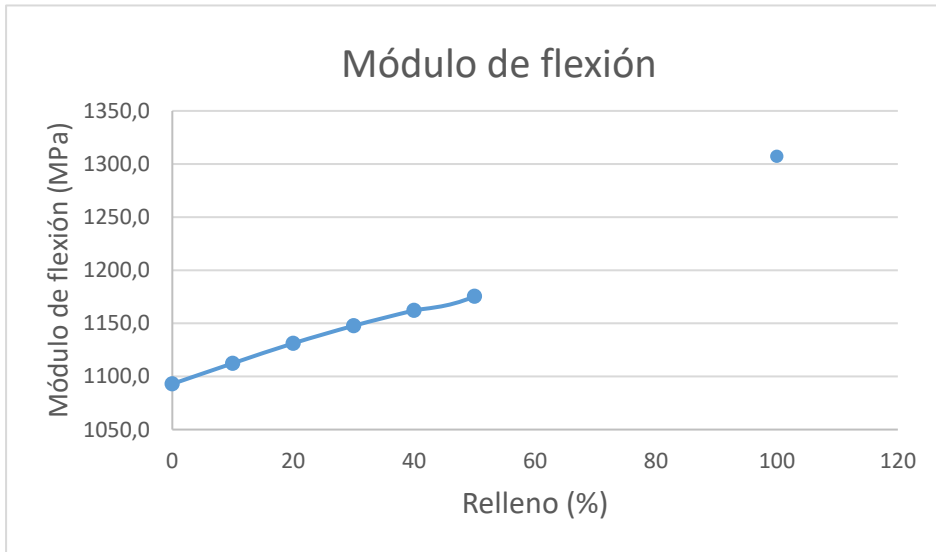


Gráfica 5. Tensiones máximas en la probeta al aplicar una fuerza de 20 N, en función del porcentaje de relleno y el espesor de la pared. (Datos de Smart Materials 3D)

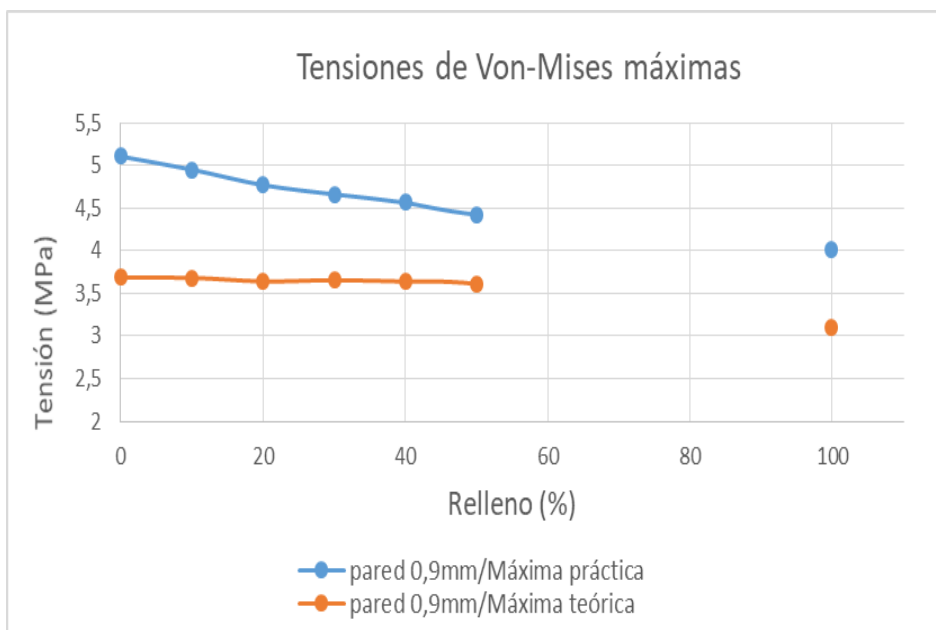
A continuación se muestran los resultados de la simulación utilizando los datos de las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente en el laboratorio:

Tabla 5. Ensayo de flexión para probeta de 0,9 mm de pared

Espesor de pared: 0,9 mm						
Porcentaje de relleno	s1 (mm)	s2 (mm)	$\epsilon 1$ (m/m)	$\epsilon 2$ (m/m)	Módulo de flexión (MPa)	Rigidez (N/mm)
0	-0,19133	-0,56609	-0,001121	-0,003317	1093,0	10,6
10	-0,18811	-0,55633	-0,001102	-0,003260	1112,4	10,8
20	-0,18512	-0,54721	-0,001085	-0,003206	1131,2	11,0
30	-0,18245	-0,53933	-0,001069	-0,003160	1147,7	11,1
40	-0,1802	-0,53264	-0,001056	-0,003121	1162,2	11,3
50	-0,17819	-0,52667	-0,001044	-0,003086	1175,4	11,4
100	-0,15995	-0,4733	-0,000937	-0,002773	1307,2	12,7

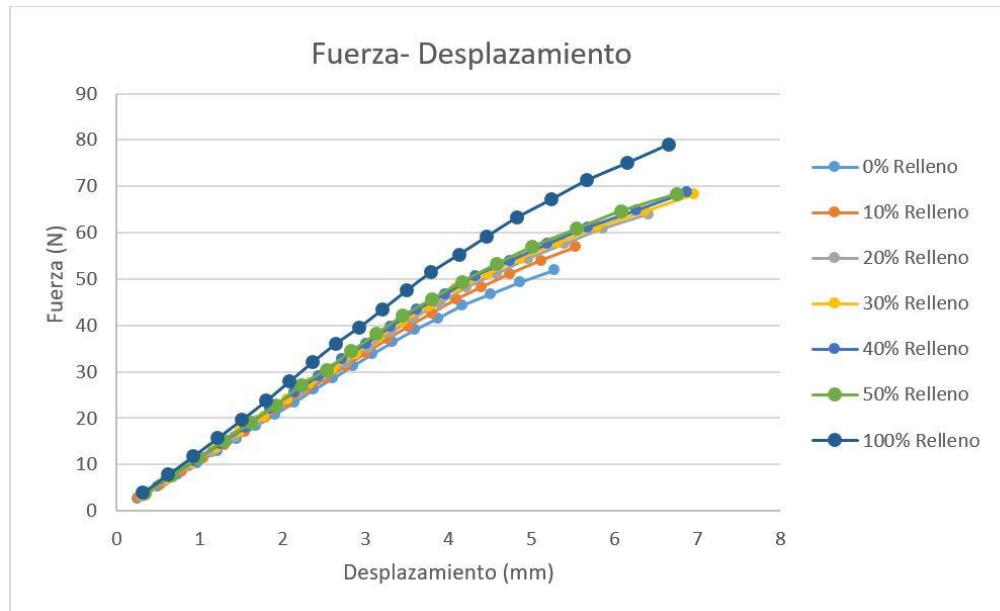


Gráfica 6. Módulo de flexión en función del porcentaje de relleno para pared de 0,9 (Modelo 1-Datos experimentales)



Gráfica 7. Tensiones máximas en la probeta al aplicar una fuerza de 6 N. (Modelo 1 -Datos experimentales)

Por último, en la Gráfica 8 se muestran recogidas las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas en esta simulación, como se haría en el ensayo real según la norma UNE-EN ISO 178.



Gráfica 8. Curvas Fuerza- desplazamiento según ensayo de flexión obtenidas por FEM para el Modelo 1- Datos experimentales

Análisis y discusión de resultados

Comparando los resultados obtenidos habiendo utilizado los datos de Smart Materials 3D con los obtenidos usando los datos experimentales del ensayo a tracción, se comprueba que los valores son muy distintos, pues el módulo de Young proporcionado por Smart Materials 3D es del orden de un 60% mayor al obtenido en el ensayo de tracción. Esto nos permite comprobar, como ya sabíamos, que las propiedades mecánicas de los materiales impresos con tecnologías FDM varían notablemente, ya que dependen de múltiples parámetros de impresión.

Sin embargo, cualitativamente, los resultados obtenidos con los dos métodos son iguales. En las dos ocasiones se observa que el Módulo de flexión en función del porcentaje de relleno no varía exactamente de forma lineal y, además, se observa un decremento del Módulo de flexión para las probetas con relleno, respecto al de la probeta maciza. (Gráficas 4 y 7)

También en la Gráfica 4 se aprecia que el espesor de la pared tiene una mayor influencia en la elasticidad que la densidad de relleno.

Por último, en las Gráficas 5 y 6, se puede apreciar que según se incrementa la densidad de relleno, se reducen los valores de las tensiones máximas en la zona de concentración de tensiones.

3.2. Modelo 2

Metodología

Con este modelo se trata de abordar la influencia del porcentaje de relleno en las propiedades mecánicas de las probetas mediante otra solución.

A diferencia del modelo anterior, en el que solo se contaba con la curva Tensión-Deformación para el caso de una probeta con el 100% de relleno, y se utilizaba un modelo CAD distinto para simular cada densidad de relleno, en esta ocasión se utiliza el mismo modelo CAD para todas las probetas (Figura 24), pero se utilizan datos de las propiedades mecánicas distintos para cada simulación.

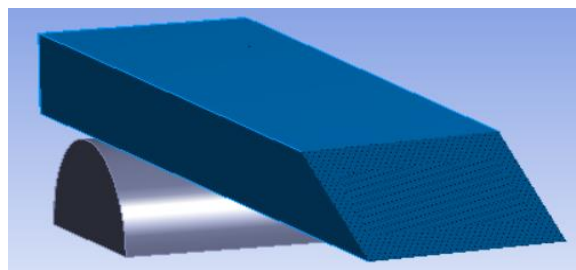


Figura 24. Modelo de probeta maciza, sin representar el relleno

Para obtener estos datos se tuvieron que realizar ensayos a tracción a probetas con los diferentes porcentajes de relleno (Figura 25). Estas probetas se imprimieron de un tamaño mayor al que indica la norma ISO 527, con el fin de que en la zona de rotura, la influencia del relleno respecto a la de la pared (de 0,9 mm) fuera significativa.

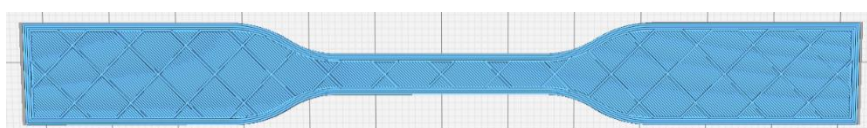
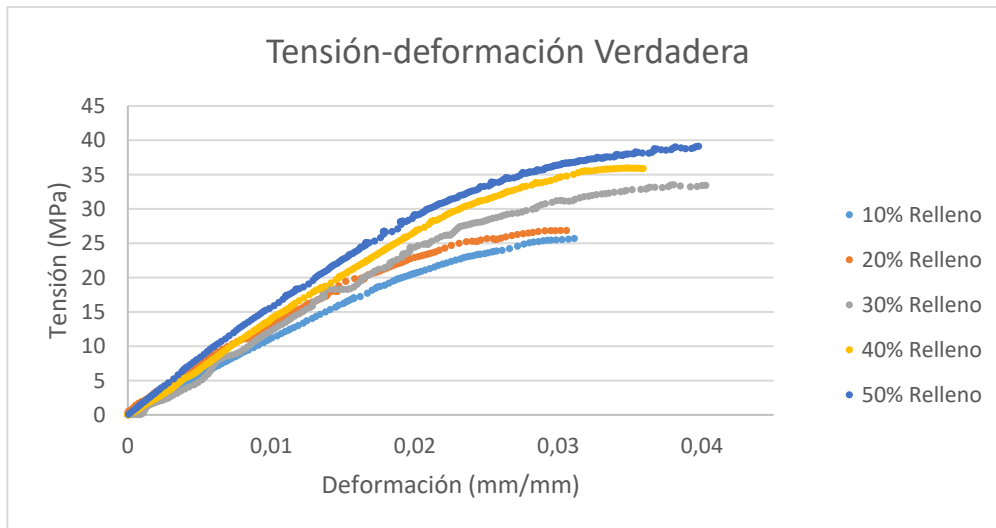


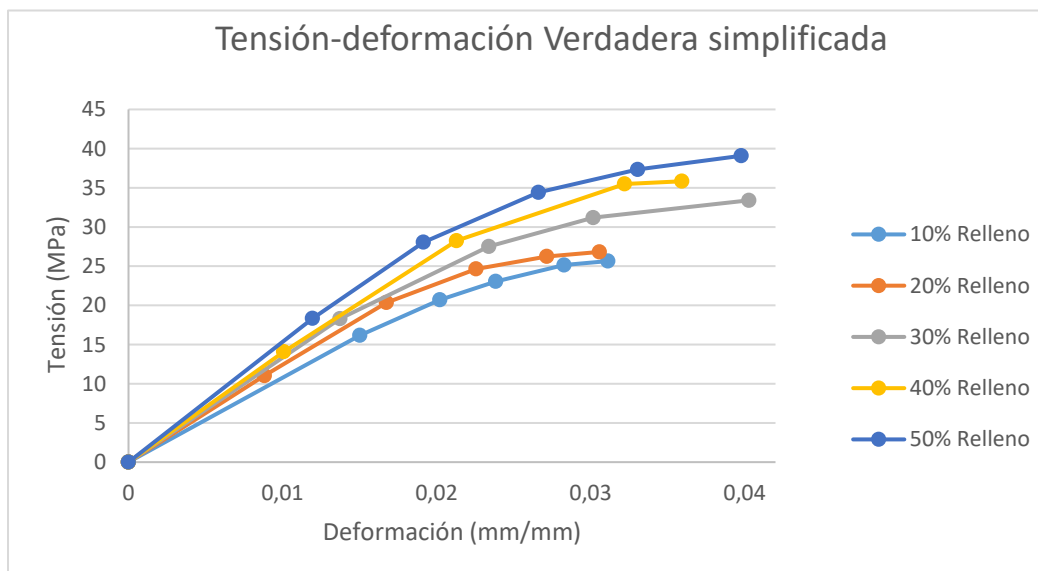
Figura 25. Probeta para ensayo de tracción (10% relleno) en el entorno de Ultimaker Cura.

El resultado de los ensayos de tracción (tras la correspondiente transformación de la curva ingenieril a la curva verdadera utilizando, como en el apartado anterior, las ecuaciones Eq. 11 y Eq.12 para estas probetas se puede ver en la Gráfica 9.



Gráfica 9. Curvas tensión-deformación verdaderas para probetas con distintos porcentajes de relleno

Al igual que en el apartado anterior, para introducir los datos del comportamiento mecánico del material, se ha realizado una simplificación de estas curvas, con el fin de necesitar un menor coste computacional a la hora de realizar la simulación. (Gráfica 10).

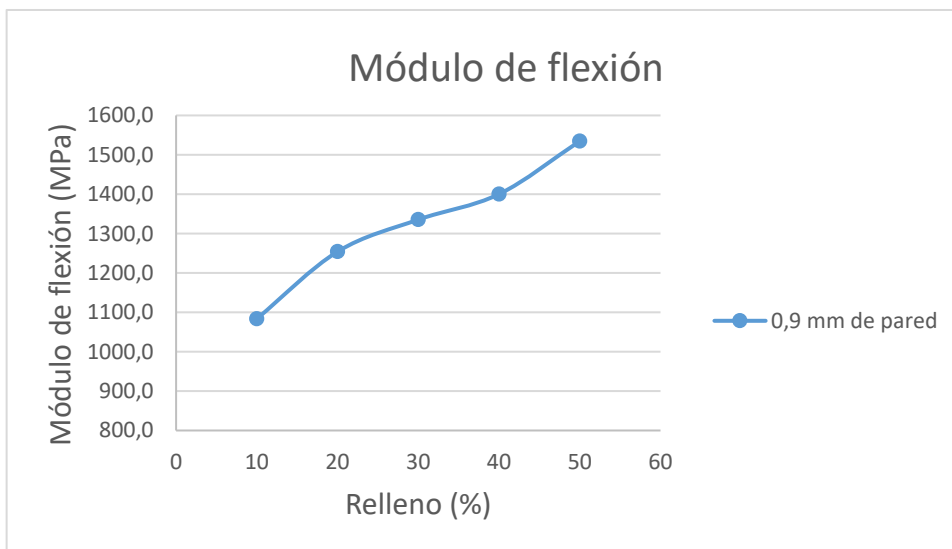


Gráfica 10. Curva tensión-deformación simplificada para probeta con distintos porcentajes de relleno

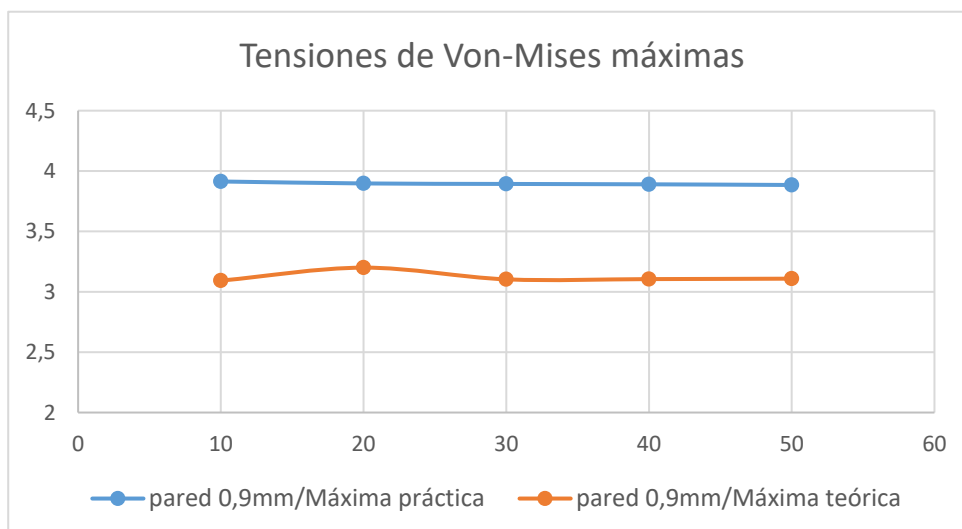
Por lo demás, las condiciones del modelo son las mismas que en las de la última simulación en cuanto dimensiones de la probeta (80 mm x 10 mm x 4 mm) y situaciones de carga (2 N y 6 N).

Resultados

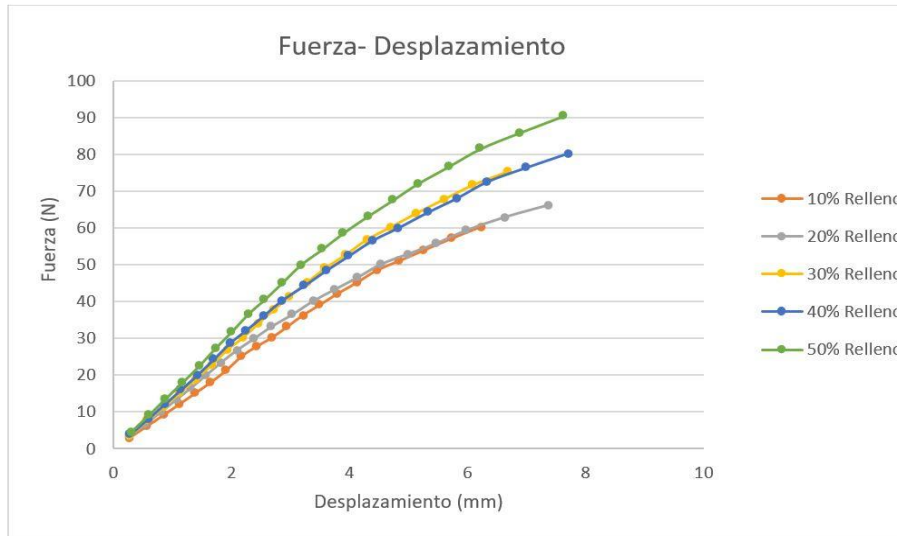
Al igual que en el modelo anterior, a continuación se muestran los resultados de los Módulos de flexión (Gráfica 11), las tensiones máximas (Gráfica 12) y las curvas fuerza-desplazamiento siguiendo las indicaciones del ensayo a flexión según la norma UNE-EN ISO 178 (Gráfica 13).



Gráfica 11. Módulo de flexión en función del porcentaje de relleno para pared de 0,9 (Modelo 2)



Gráfica 12. Tensiones máximas en la probeta al aplicar una fuerza de 6 N. (Modelo 2)



Gráfica 13. Curvas Fuerza-desplazamiento según ensayo de flexión obtenidas por FEM para el Modelo 2

Análisis y discusión de resultados

Si nos fijamos en los resultados, podemos observar que es más difícil identificar las leyes de variación de las magnitudes estudiadas en función del porcentaje de relleno que en el modelo anterior.

Es fácil deducir que esto se debe a que los datos de partida, es decir, los resultados de los ensayos de tracción para cada material, son solo una aproximación de las propiedades elástico-plásticas de cada probeta. De esta forma, las curvas tensión-deformación están influenciadas por factores externos, como las condiciones de luz, la variación de la velocidad de aplicación de la carga o las posibles irregularidades en las zonas de rotura de cada probeta. Para unos resultados más precisos habría sido necesario realizar una cantidad superior de ensayos para cada porcentaje de relleno para poder utilizar los resultados más representativos.

Lo que sí que podemos afirmar analizando este modelo es que, al contrario que en el Modelo 1, el incremento de la densidad del relleno no supone una reducción significativa de las tensiones máximas en la zona de concentración de tensiones (Gráfica 12).

También podemos apreciar con este modelo, aunque no se pueda identificar si varía linealmente, que aumentar el porcentaje de relleno tiene una mayor influencia sobre el Módulo de flexión que en el Modelo 1, ya que mientras que en dicho modelo el pasar del 10 % de relleno a un 50 % suponía un incremento del Módulo de flexión del 5,6 %, en este caso el aumento se trata de del 41,6 %. Dado, que el modelo 2 está basado en datos reales, esto indica que el Modelo 1 no refleja correctamente la influencia del porcentaje de relleno sobre el comportamiento mecánico del material.

3.3. Ensayo de probetas reales

Norma UNE-EN ISO 178

Para realizar el ensayo se ha seguido, en la medida de lo posible, las indicaciones que se dan en la norma ISO 178. A continuación se resumen las características del ensayo más significativas.

Este ensayo sirve para estudiar el comportamiento a flexión (módulo de flexión, resistencia a la flexión...) en materiales plásticos. Se realiza sobre una probeta soportada por apoyos simples y a la que se le aplica una carga en su punto medio. (Figura 26)

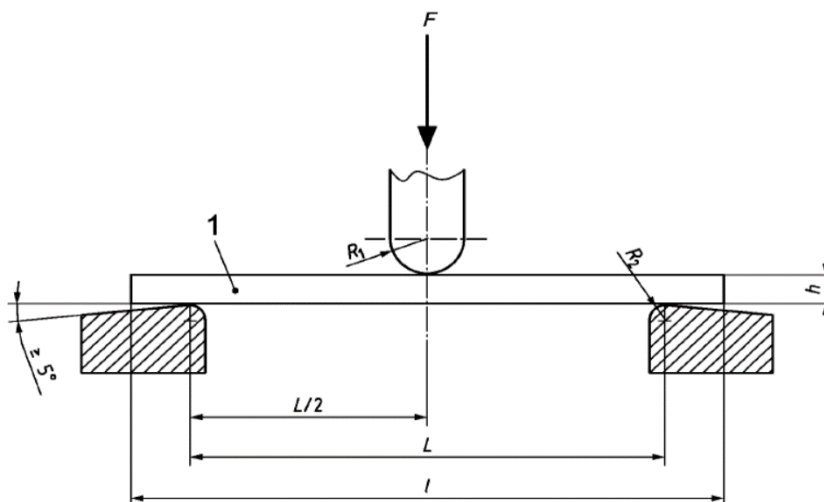


Figura 26. Ensayo de flexión a 3 puntos (UNE-EN-ISO-178)

La probeta recomendada tiene unas dimensiones de 80 mm x 10 mm x 4 mm (l x b x h).

La separación entre apoyos, L, debe ser variable y para la probeta de dimensiones recomendadas debe ser de 64 mm.

El radio R_1 del elemento de carga y los radios R_2 de los soportes deben ser los siguientes:

- $R_1 = 5$ mm
- $R_2 = 2$ mm para un espesor de probeta $h \leq 3$ mm
- $R_2 = 5$ mm para un espesor de probeta $h > 3$ mm

Para el cálculo del módulo a flexión, que es un valor aproximado del módulo de Young, se utilizan las ecuaciones Eq. 7, Eq. 8 y Eq. 9, que se usaron anteriormente en el análisis por Elementos Finitos.

Montaje

Para realizar el ensayo se diseñó un utillaje específico para ser incorporado a la máquina de ensayos disponible en el laboratorio (Figura 28).

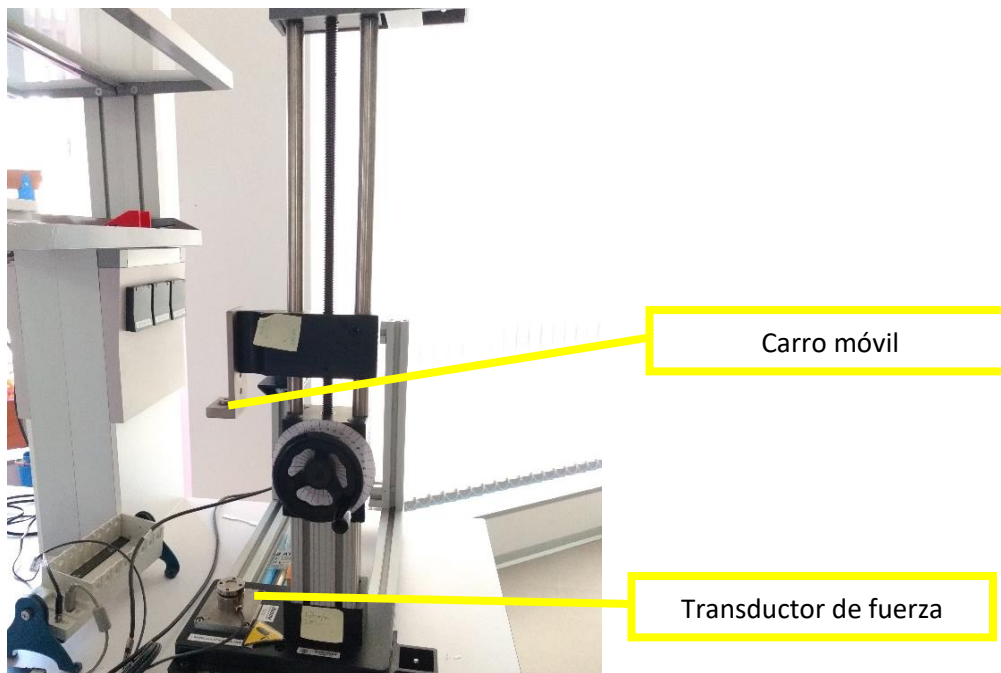


Figura 28. Máquina de ensayos

Esta máquina se trata del modelo ES30 del fabricante Mark-10. Se trata de un dispositivo cuya zona superior móvil, mediante acción manual, gracias al giro de una ruleta, se desplaza verticalmente, acercándose o alejándose de la base inferior fija a la bancada, y el cual puede soportar una fuerza de 1 kN.

Acoplado a la base de esta máquina de ensayos se encuentra un transductor de fuerza modelo U93 del fabricante HBM, el cual puede soportar esfuerzos de tracción-compresión de 1 kN. Este tipo de componentes está diseñado para soportar altos esfuerzos de tracción-compresión. Sin embargo las fuerzas laterales y momentos que pueden resistir son muy pequeñas en comparación. Esta circunstancia se tuvo que tener en cuenta para asegurarse de que al realizar el ensayo de flexión, en caso de pequeñas excentricidades a la hora de aplicar la carga, no supusiese la rotura del transductor.

Una vez que se ha explicado en que consiste la máquina de ensayos, se pasa a explicar el montaje del utillaje específico para el ensayo de flexión, que consta de los componentes que se muestran en la Figura 29.



Figura 29. Piezas del utillaje del ensayo de flexión

Para realizar el ensayo de flexión a 3 puntos, eran necesarios dos apoyos cilíndricos, los cuales estuvieran a una distancia que se pudiera adaptar y una zona también cilíndrica con la cual se pudiera aplicar la fuerza sobre la probeta.

Para ello se montó un perfil de aluminio sobre la célula de carga mediante la unión por dos tornillos.

Cada uno de los apoyos está formado por la unión, mediante dos juntas tóricas, de un perfil de aluminio a un varilla de acero de 5 mm de radio.

Estos apoyos se unen al perfil de la base mediante sendas escuadras. Gracias al carril del perfil, los apoyos pueden deslizar sobre él hasta fijarse en la posición deseada, en este caso a 64 mm.

La zona de aplicación de la carga, al igual que los apoyos, consta de la unión de un perfil de aluminio a una varilla de acero de 5 mm de radio. Esta zona se pintó con fondo negro y motas blancas para permitir la captación de puntos al software encargado de medir el desplazamiento.

La unión de la zona de carga a la estructura de la máquina de ensayos se realizó mediante una pieza de diseño propio e impresa en 3D. El motivo de la utilización de esta pieza se debió a la limitación del rango de movimiento del carro móvil de la máquina de ensayos.

En la Figura 30 se muestra el montaje final del utillaje:



Figura 30. Montaje del utillaje para el ensayo a flexión

Probetas

En primer lugar se realizó el diseño CAD, con Catia Student V5-6R2017, de las probetas utilizando las dimensiones recomendadas (80 mm x 10 mm x 4 mm).

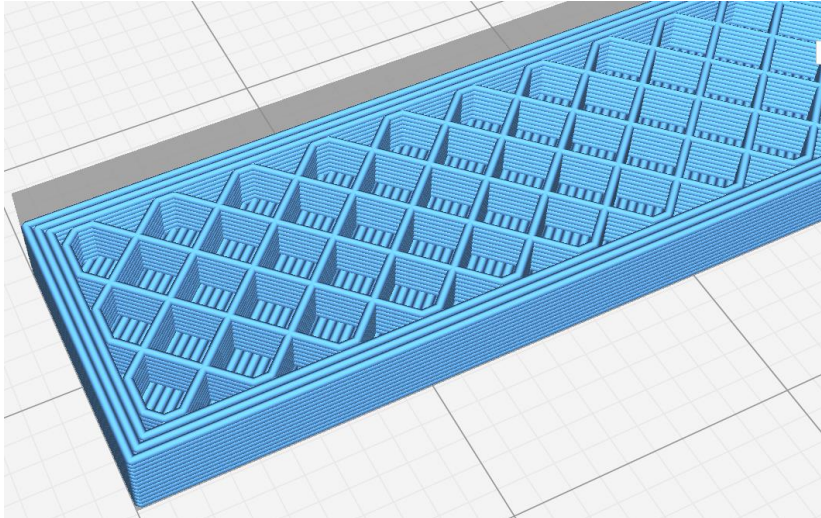


Figura 31. Vista de las capas interiores de la probeta en el entorno de Ultimaker Cura

Posteriormente, se configuraron los parámetros de impresión utilizando Ultimaker Cura (Figura 31). En la Tabla 6 se muestran los parámetros más destacables.

Tabla 6. Parámetros destacables de impresión de las probetas para el ensayo de flexión

Dirección de las fibras de la pared	Dirección Y
Altura de capa	0,2 mm
Ancho de línea	0,3 mm
Grosor de la pared	0,9 mm
Densidad de relleno	(10-50,100) %
Patrón de relleno	Rejilla
Direcciones de las líneas de relleno	45°
Grosor de la capa de relleno	0,2
Temperatura de impresión	250 °C
Temperatura de la placa de impresión	60 °C
Velocidad de impresión	35 mm/s

Resultados

Los datos necesarios de fuerza y deformación para la obtención de las curvas de comportamiento y del Módulo de flexión se obtuvieron gracias a la utilización de varios softwares.

Para la obtención de la fuerza, se utilizó un programa realizado con LabVIEW, que permite capturar los valores de fuerza medidos sobre el transductor con una frecuencia de 20 Hz.

Para capturar los datos del desplazamiento se utilizó GOM Snap 2D y GOM Correlate (Figura 32) Estos programas permiten, respectivamente, procesar las imágenes captadas por la cámara a una frecuencia igual a la de los datos de fuerza, y calcular el desplazamiento de la zona de aplicación de la carga.

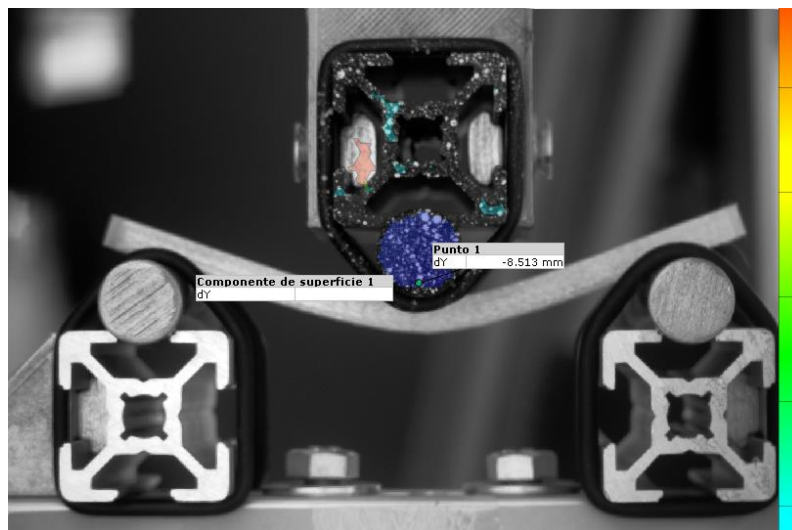
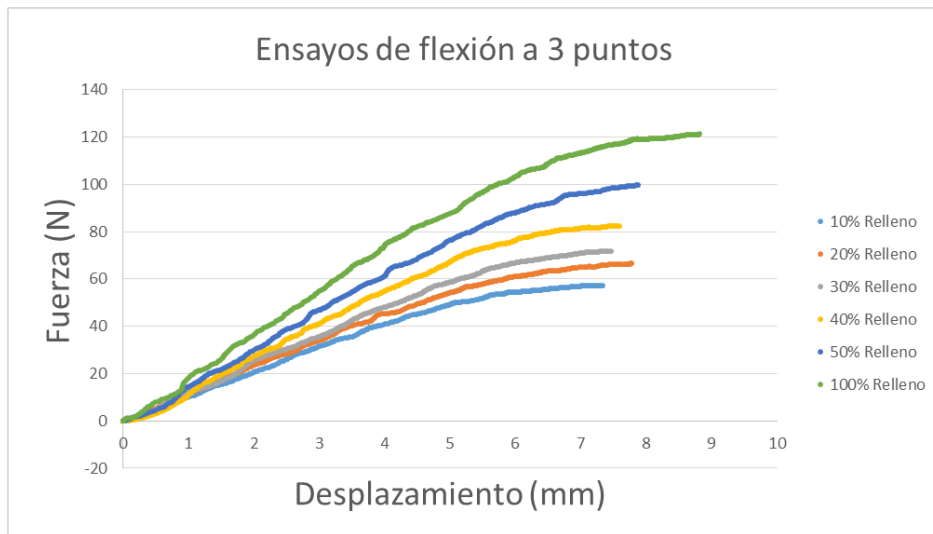


Figura 32. Ensayo de flexión en el entorno de GOM

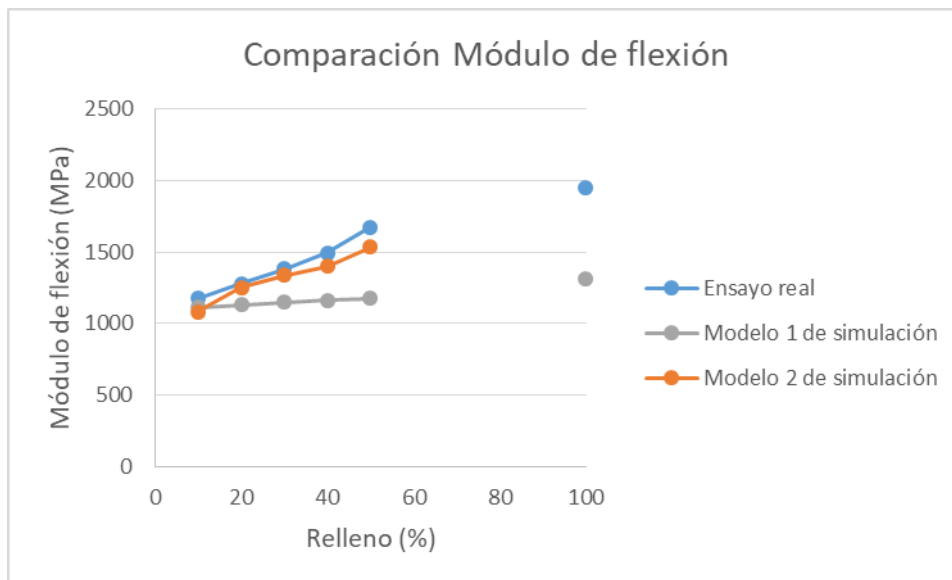
Estos datos son volcados a una hoja de cálculo donde posteriormente hay que cribar los resultados eliminando aquellos valores correspondientes a los momentos anteriores y posteriores a la realización del ensayo.

Una vez obtenido el desplazamiento y la fuerza, se calculan la tensión y la deformación para pequeñas flechas y, a partir de estos resultados, el Módulo de flexión, todo ello utilizando las ecuaciones: Eq. 7, Eq. 8 y Eq. 9 respectivamente.

Una vez explicado el procedimiento de toma de datos, se muestran los resultados:



Gráfica 14. Curvas Fuerza-desplazamiento obtenidas en los ensayos a flexión



Gráfica 15. Módulo de flexión en función del porcentaje de relleno obtenido en el ensayo de flexión a 3 puntos y comparación con los modelos de simulación.

Análisis y discusión de resultados

Una vez que tenemos los resultados del comportamiento real del material sometido al ensayo de flexión, podemos analizar la fiabilidad de los modelos desarrollados mediante el cálculo por Elementos Finitos.

Podemos ver (Gráfica 15) que como predecían los dos modelos, la variación del Módulo de flexión en función del porcentaje de relleno, es prácticamente lineal en



el rango de 0 a 50 %. Sin embargo, se aprecia claramente, como en el rango del 50 al 100 %, la pendiente decrece (confirmando los estudios de Álvarez et al., 2016).

Siguiendo con el análisis del Módulo de flexión, comprobamos que se produce un incremento del 42,4% para una probeta del 50% de relleno respecto de una del 10%, mientras que para el Modelo 1 es del 5,6%. Esto confirma, como ya habíamos mencionado al estudiar el Modelo 2, que el Modelo 1 no representa cuantitativamente la influencia del relleno sobre las propiedades mecánicas.

También podemos decir que, mientras que los datos del Módulo de flexión de los ensayos de tracción realizados para el Modelo 2 sí que son próximos a los obtenidos en los ensayos de flexión, en el caso de la Resistencia a flexión (74 MPa para la probeta con un 100% de relleno), se obtiene un resultado más próximo al proporcionado por Smart Materials 3D que al obtenido en los ensayos de tracción.

Esta última observación indica que el material soporta mayores tensiones cuando trabaja a flexión, que cuando trabaja a tracción pura. ¿Cómo podemos explicar este comportamiento?

En el ensayo de tracción, todos los puntos de la sección plastifican al mismo tiempo, por estar sometidos a la misma tensión. En cambio, en el ensayo de flexión, la mitad superior de la probeta está sometida a compresión y la mitad inferior a tracción, siendo estas tensiones crecientes a medida que nos alejamos de la fibra neutra de la sección. Esto hace que, cuando se alcanzan las tensiones límite en las fibras exteriores, la probeta aun es capaz de soportar fuerzas más elevadas, hasta que todas las fibras alcanzan la tensión máxima, plastificando entonces toda la sección y formándose la rótula plástica.

4. APLICACIÓN AL DESARROLLO DE UNA FÉRULA DE MUÑECA

Una vez realizado el estudio del comportamiento a flexión de una probeta del material, se ha tratado de aplicar los resultados anteriores a un caso práctico, en concreto, a la fabricación mediante tecnología FDM de una férula de muñeca, cuyos modelos CAD han sido realizados por Ortega (2019). (Figura 33)

Se trata de dos modelos impresos con PETG, ambos divididos en dos piezas (para que quede claro a nivel de nomenclatura: la parte inferior en contacto con la palma de la mano, y la parte superior en contacto con el dorso). Uno de los modelos está diseñado con un patrón regular de aberturas en forma hexagonal, mientras que el otro tiene un patrón de aberturas circulares de diferente diámetro. En la Figura 33 se referencia cada una de las piezas para los posteriores ensayos.

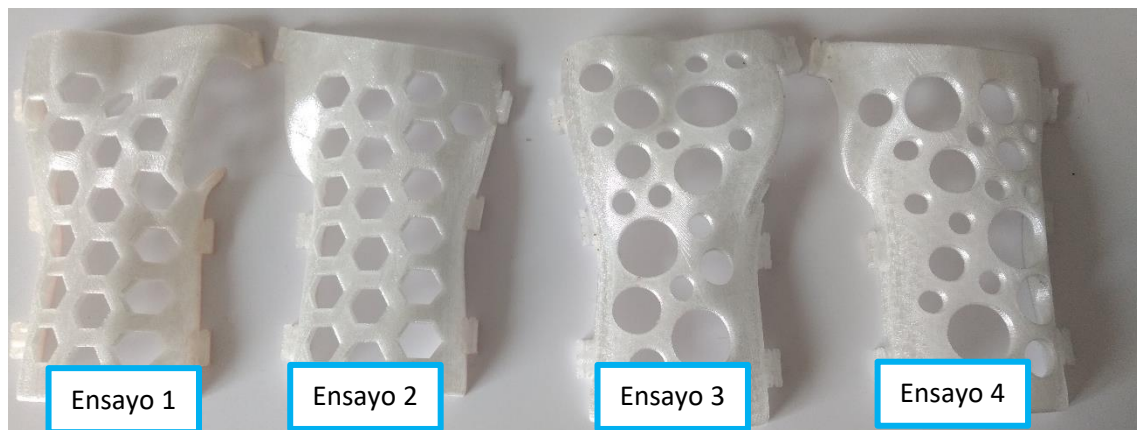


Figura 33. Férulas de muñeca impresas en PETG

En este capítulo, por lo tanto, se plasman en primer lugar los ensayos mecánicos realizados sobre las férulas, y posteriormente se muestran los resultados de la simulación numérica que intenta recrear las condiciones de los citados ensayos, para finalmente analizar la validez del modelo.

4.1. Ensayos de las férulas

Montaje

Los ensayos realizados consistieron en la aplicación de una fuerza en uno de los extremos de la férula mientras que el otro de los extremos quedaba empotrado, sometiendo a la pieza así, a un esfuerzo mayoritariamente de flexión.

Para realizarlo se necesitó montar la estructura de la Figura 34 que consistió en la unión de dos perfiles de aluminio. El perfil vertical sirve como guía a la pieza impresa en 3D encargada de tirar de la férula hacia arriba. Esta pieza se unió mediante un mosquetón a un dinamómetro, y este a su vez quedó enganchado gracias a otro mosquetón, a una cuerda de la que se tiró manualmente para realizar los ensayos.

Para aplicar la fuerza sobre la cuerda más fácilmente, se montaron sobre el perfil vertical dos poleas que permitieron tirar de la cuerda hacia abajo en vez de hacia arriba.

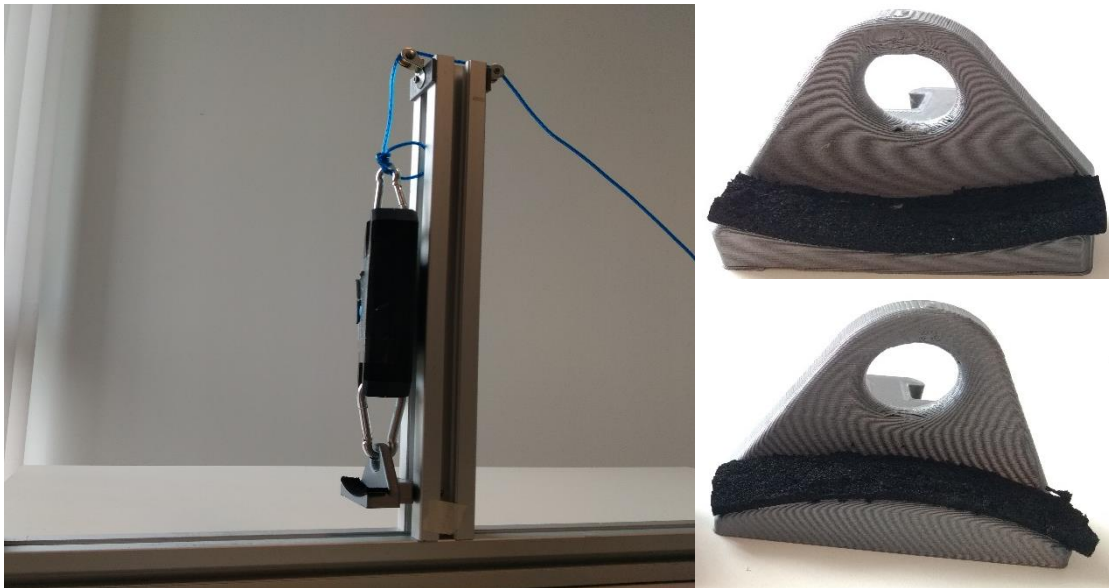


Figura 34. Estructura del ensayo y detalle de las piezas guía

La idea original era la de simular, con la mayor fidelidad posible, una situación real de uso de la férula, en la que el usuario intenta rotar la muñeca. Para la sujeción de la férula con este objetivo, se diseñó e imprimió una estructura en 3D (Figura 35).

Sin embargo, esta idea se desechó por dos motivos: el primero de ellos es que las pinzas utilizadas no eran capaces de sujetar la pieza cuando se aplicaba la fuerza. El segundo motivo fue la consideración de que al ensayar las dos piezas juntas sería más complicado el cuantificar la influencia de los cierres de unión.

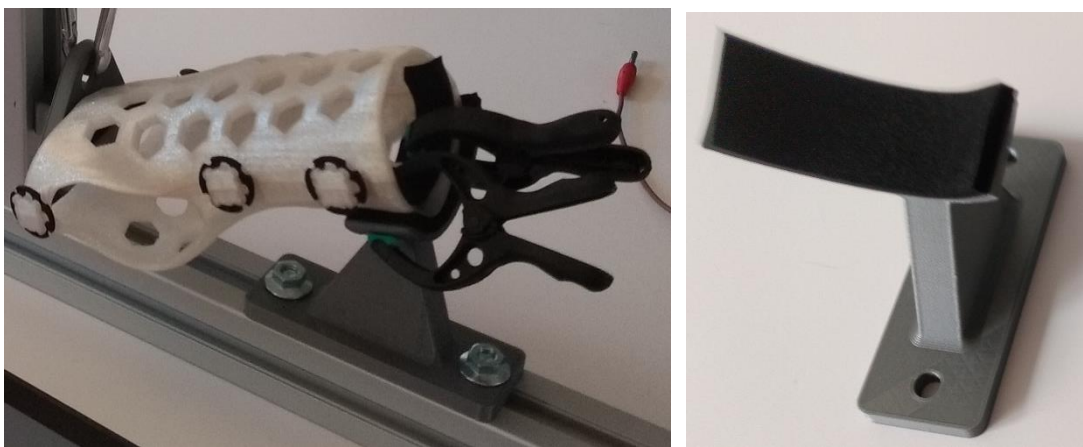


Figura 35. Pieza para sujeción de la férula (Primer diseño)

Por ello, se decidió diseñar e imprimir otro modelo de soporte (Figura 36) para ensayar las piezas por separado. Además, en esta ocasión se sustituyeron las pinzas por una unión mediante apriete por tornillos.



Figura 36. Pieza para sujeción de la férula (Segundo diseño)

A pesar de ello, el resultado siguió sin ser satisfactorio, pues al aplicar la fuerza la férula seguía moviéndose de la zona del empotramiento.

Esto llevó a tomar la decisión de realizar el ensayo con unas condiciones menos realistas, pero que permitiesen un mejor ajuste de la férula a la estructura. Por ello se decidió sujetar la férula mediante un sargento, tal como se muestra en la Figura 37.

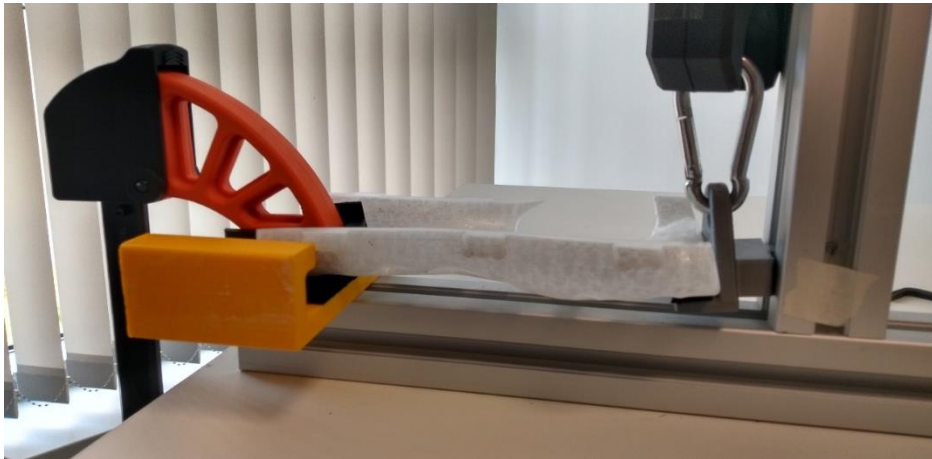


Figura 37. Sujeción de la férula (Diseño final)

Resultados

En la realización de los ensayos se midió la fuerza y el desplazamiento en el extremo de aplicación de la carga.

Para medir la fuerza se utilizó un dinamómetro, y para medir el desplazamiento, como en el caso del ensayo a flexión, se utilizaron los softwares GOM Snap 2D y GOM Correlate.

Para conseguir sincronizar sendas mediciones se optó por el siguiente sistema (Figura 38). Se colocó la cámara de modo que enfocara al dinamómetro. De esta forma, en cada una de las imágenes tomadas, se podía leer el valor de fuerza en la pantalla del dinamómetro y gracias a GOM Correlate, el desplazamiento de uno de los puntos del dinamómetro, el cual debería tener un movimiento solidario al del extremo de la férula.

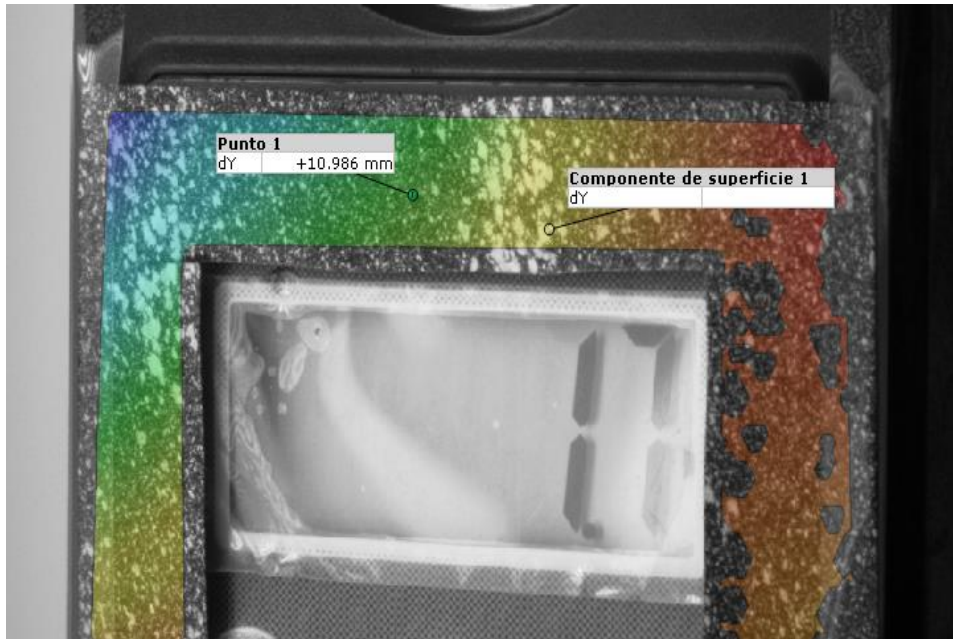
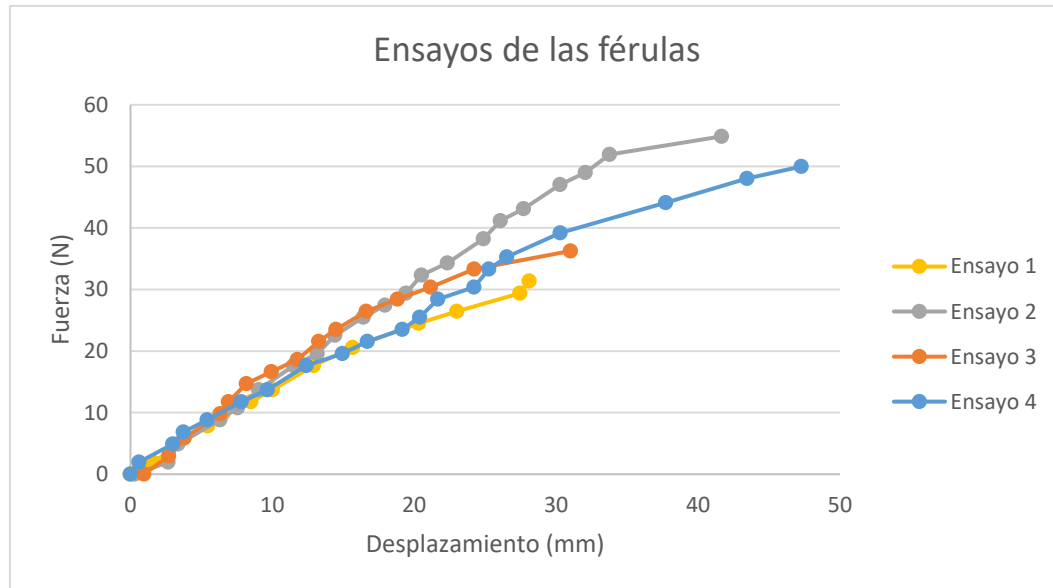


Figura 38. Medición simultánea de fuerza y desplazamiento

Gracias a este sistema, fue posible la realización de las curvas Fuerza-Desplazamiento.

A continuación se muestran estas curvas para los ensayos realizados a cada una de las cuatro mitades de los dos modelos de las férulas (Gráfica 16).



Gráfica 16. Fuerza- Desplazamiento de cada una de las piezas ensayadas

Se puede apreciar que la rigidez (Cociente entre fuerza y desplazamiento) es similar en los cuatro ensayos, y si aplicamos una regresión lineal a cada uno de ellos y realizamos la media aritmética entre los cuatro casos, obtenemos un valor de rigidez de 1,5 N/mm.

Además se aprecia en la Figura 39, que la zona de rotura corresponde a aquella próxima a la zona de sujeción, es decir, del empotramiento. Además se puede apreciar que la dirección de rotura no es paralela a la dirección de la carga, sino que es perpendicular, debido a la orientación de las capas de material en esa zona.



Figura 39. Zona de rotura de la férula

4.2. Modelo FEM del ensayo de la férula

Se ha realizado la simulación de los ensayos plasmados en el apartado anterior para el caso de la férula con el patrón de oquedades circulares, tanto para la parte inferior como para la superior.

Para ello, se han utilizado los modelos CAD realizados por Ortega (2019).

Modelo

Si bien las condiciones de contorno que se necesitan imponer en el modelo son claras (un extremo empotrado y una carga aplicada en el otro), las dificultades aparecen por el hecho de trabajar con una pieza de geometría compleja.

Es por ello que fue necesaria la utilización del software de Catia V5, concretamente de su módulo Generative Shape Design, para la creación de superficies delimitadas donde poder aplicar las condiciones de contorno (Figura 40)

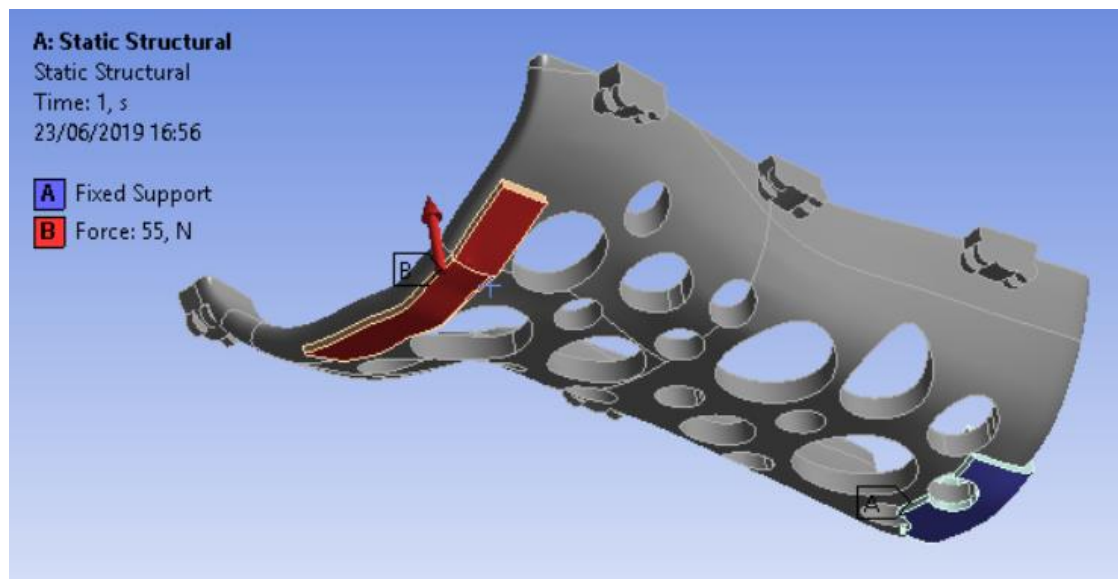


Figura 40. Condiciones de contorno sobre la pieza superior de la férula

Por otra parte, en la fase de creación de la malla (Figura 41) también se encontraron dificultades. Al intentar generar el mallado automáticamente se producían errores en las superficies del empotramiento y de la zona de carga. Para solucionarlos, se cambió manualmente el método de mallado para estas zonas.

Además, para estas piezas, el número de nodos y elementos generados es próximo al límite permitido en la versión de estudiantes de ANSYS, de modo que hubo que aumentar el tamaño del elemento para no sobrepasar dicho límite.

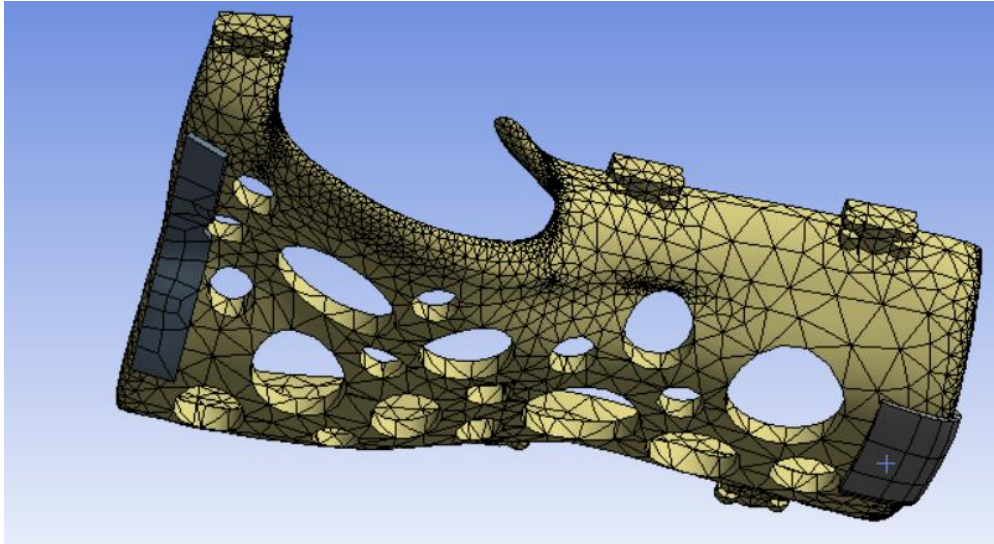


Figura 41. Mallado de la pieza inferior de la férula

Por último, hay que hablar de las propiedades físicas del material.

Puesto que, como ya se ha señalado con anterioridad, el Modelo 1 no reproduce fielmente la influencia del porcentaje de relleno el comportamiento del material, se ha optado por implementar el Modelo 2, es decir, utilizar los resultados de los ensayos a tracción específicos para cada porcentaje de relleno. (Gráfica 10).

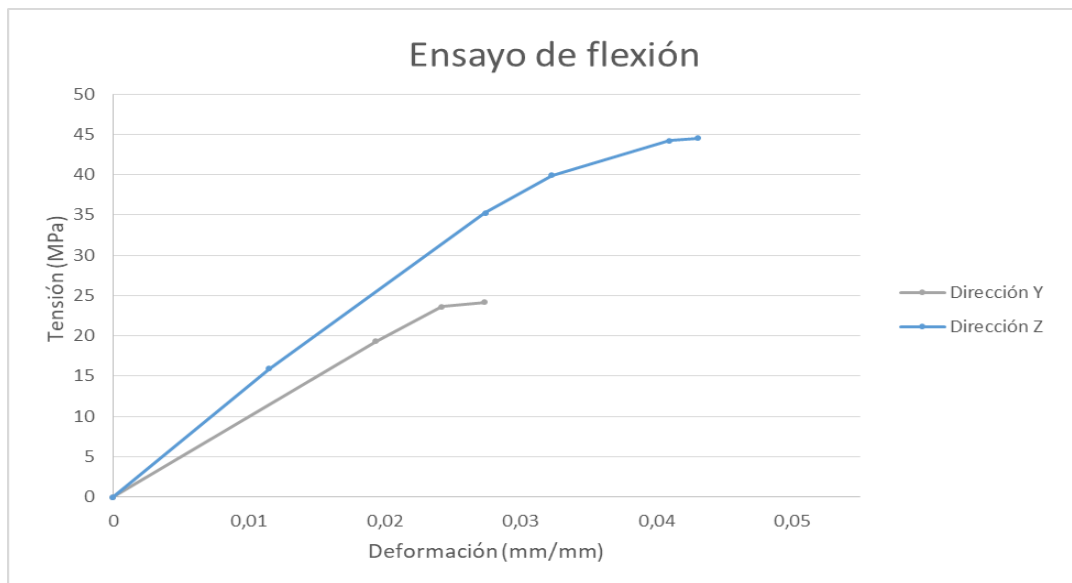
Concretamente, se han utilizado los datos de las probetas del 30% de relleno, puesto que las piezas fueron impresas con ese mismo porcentaje de material en el interior, y el espesor de pared también coincide con el de las probetas (0,9 mm).

Una vez realizadas las simulaciones, y habiendo visto, como se puede comprobar en el siguiente apartado, que los resultados no eran demasiado precisos, se ha optado por repetir el modelo, pero modificando las propiedades mecánicas del material.

Por tanto, se han repetido los ensayos de flexión para las probetas con un porcentaje de relleno del 30%, pero cambiando la dirección de orientación de las

fibras. Según la nomenclatura de la Figura 4, hasta ahora todas las probetas se habían impreso según la dirección Y, mientras que para estos nuevos ensayos se han impreso en la dirección Z.

Como era de esperar, debido a que los esfuerzos de adhesión entre capas son menores a los que puede soportar el material en la dirección de las mismas, en los nuevos ensayos de flexión se obtiene un menor Módulo de flexión y una menor resistencia a flexión (Gráfica 17).



Gráfica 17. Curva tensión-deformación para diferentes direcciones de impresión

Resultados

Aunque se ha realizado la simulación para ambas piezas (inferior y superior) solo se muestran los resultados de una de ellas, concretamente la mitad inferior, por no encontrarse diferencias significativas entre los dos modelos de pieza.

En primer lugar se muestran los resultados a partir de los datos del ensayo a tracción para la dirección de impresión Y.

A continuación se expone la distribución de tensiones resultante de aplicar una carga de 55 N, que es aproximadamente la fuerza que fueron capaces de resistir las piezas en los ensayos (Figura 42).

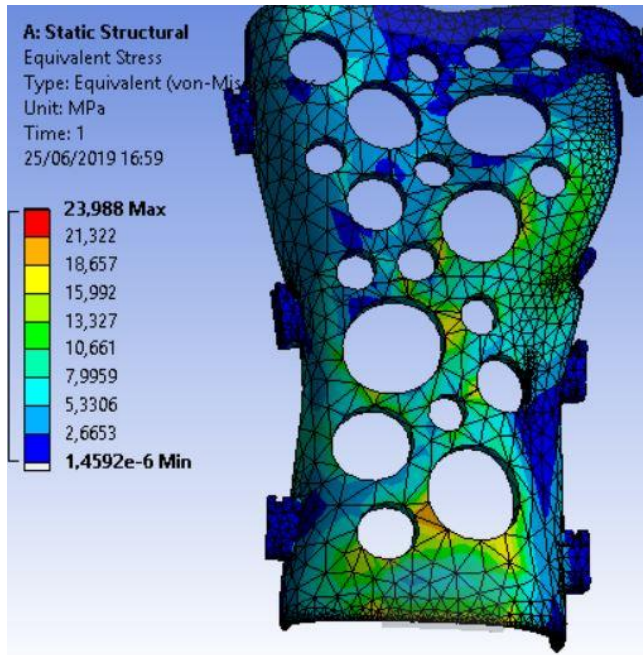


Figura 42. Distribución de tensiones equivalentes de Von-Mises (MPa) para la pieza inferior y dirección de impresión Y

Por otro lado, si nos fijamos en el desplazamiento máximo podemos ver que es de 23,7 milímetros, por lo que si calculamos la rigidez de la pieza, como hacíamos en el ensayo, y teniendo en cuenta que la fuerza aplicada es de 55 N, obtenemos un valor de 2,3 N/mm.

Por último se muestran los resultados de la simulación tomando las propiedades mecánicas del material impreso en dirección Z.

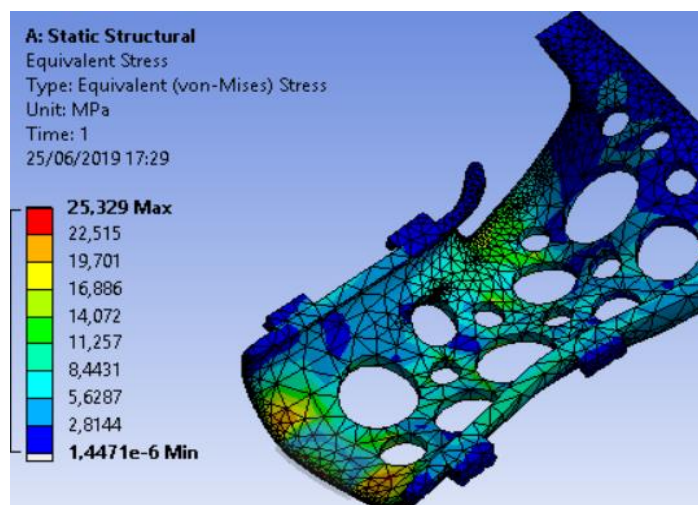


Figura 43. Distribución de tensiones equivalentes de Von-Mises (MPa) para la pieza inferior y dirección de impresión Z

En este caso, el desplazamiento máximo es de 31,4 mm, por lo que, si calculamos la rigidez, obtenemos una rigidez de 1,75 N/mm, menor que en la simulación anterior.

4.3. Análisis y discusión de resultados

Observando los resultados de la primera simulación, se aprecia que las zonas donde aparecen las mayores tensiones son las adyacentes al empotramiento, y por lo tanto, coinciden con la zona de roturas de las férulas.

Sin embargo, cuantitativamente, no podemos saber, debido a la complejidad geométrica de las piezas, si se trata de valores próximos a los alcanzados en el ensayo sobre el modelo real.

Además, a la hora de calcular la rigidez de las piezas se obtienen unos errores relativos considerablemente altos, en torno al 53% de error.

Es esta falta de precisión la que motivó la repetición de los ensayos de flexión pero esta vez con probetas impresas en la dirección Z, para probar si los resultados se acercaban más al resultado real.

Y, efectivamente, al repetir la simulación teniendo en cuenta las nuevas características mecánicas, se consiguen valores que reducen el error relativo entre el modelo de elementos finitos y el modelo real, ya que en esta ocasión, en cuanto al coeficiente de rigidez, se consigue reducir el error relativo hasta el 17%.



5. CONCLUSIONES

Tras el desarrollo del proyecto, se puede decir, como conclusión general, que el estudio del comportamiento mecánico de las piezas fabricadas con tecnología FDM mediante modelos de simulación numérica puede ser útil para orientar el diseño de los futuros prototipos. Sin embargo, la simulación no debe sustituir a los ensayos de materiales como herramienta de validación, debido a que la gran anisotropía de los materiales, intrínseca a este método de fabricación aditiva, solo permite obtener resultados aproximados.

Como conclusión más específica, podemos mencionar que se ha comprobado para el rango de porcentajes de relleno estudiado, que un incremento del porcentaje de relleno desde el 10 al 50% supone un aumento, aproximadamente lineal, del Módulo de flexión y de la Resistencia a flexión, que puede llegar a ser de más del 40%.

Por último, en cuanto a la validación del comportamiento mecánico del material, podemos decir que el Modelo 2 (en el que se utiliza una ley de comportamiento para cada densidad de relleno) se ajusta mejor al comportamiento real del material que el Modelo 1 (En el que se utilizan distintos modelos CAD pero las mismas propiedades mecánicas). Por lo tanto, en vista de los resultados y teniendo en cuenta la cantidad de parámetros de impresión que influyen en el comportamiento mecánico, la mejor opción para simular las propiedades elásticas de materiales de impresión 3D con herramientas FEM sería el siguiente procedimiento:

1. Definir los parámetros de impresión de la pieza que se requiera fabricar.
2. Realizar ensayos a probetas con esos parámetros específicos (con el 10% y el % 50% de relleno)
3. Interpolar linealmente los resultados obteniendo la densidad de relleno para la rigidez deseada.
4. Utilizar los resultados obtenidos para la simulación numérica de piezas complejas.



5.1. Líneas de trabajo futuras

Podemos mencionar varias propuestas para investigaciones futuras sobre temas relacionados que no ha sido posible abarcar en este proyecto.

En primer lugar, del mismo modo que en este trabajo se ha estudiado la influencia en las propiedades mecánicas del porcentaje de relleno de las piezas fabricadas mediante impresión 3D, en un futuro proyecto podría abordarse la influencia del espesor de pared, ya que, en vista de los resultados obtenidos en el Modelo 1, podría resultar ser un factor más determinante.

Por último, podría realizarse un estudio del comportamiento de piezas fabricadas con tecnología FDM, pero, en vez de hacerlo mediante la aplicación de cargas estáticas, hacerlo mediante la aplicación de esfuerzos cíclicos, para tener así conocimiento del comportamiento a fatiga del material.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez K L, Lagos R, Aizpun M (2016). *Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts*. Ingeniería e Investigación, 36 (3), 110-116. DOI: 10.15446/ing.investig.v36n3.56610
- Baich L. (2016). *Impact of Infill Design on Mechanical Strength and Production Cost in Material Extrusion Based Additive Manufacturing*. Youngstown State University.
- Blanco M Y. (2018). Ingeniería de Materiales. Apuntes de la asignatura. Grado en Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.
- Budynas R, Keith J. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*: Mc Graw Hill.
- García J L. (s.f). *Empleo de la modelación por elemento finito (MEF) en la solución de problemas ingenieriles*. Recuperado en <https://www.monografias.com/trabajos82/aplicacion-mef-soldadura/aplicacion-mef-soldadura2.shtml>
(Última visita: 27/06/2019)
- Gibson I, Rosen D, Stucker B. (2009). *Additive Manufacturing Technologies: 3D printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*: Springer
- Impresoras 3D (2018). *Guía rápida de términos básicos en impresión 3D*. Recuperado en <https://www.impresoras3d.com/guia-rapida-de-terminos-basicos-en-impresion-3d/>
(Última visita: 27/06/2019)
- Infante R. (2012). *Procesos de conformado de materiales poliméricos por prototipado rápido*. Trabajo Fin de Máster en Ciencia y Tecnología de Polimeros, UNED. Recuperado en



<https://tfmrimuned.files.wordpress.com/2012/03/tfm-uned-procesos-de-conformado-de-materiales-polimc3a9ricos-por-prototipado-rc3a1pido3.pdf>

- Instron (s. f.). *ISO 14125 Propiedades de flexión de materiales compuestos - plásticos reforzados con fibras*. Recuperado en <https://www.instron.es/es-es/testing-solutions/by-material/composites/flexure/iso-14125>

(Última visita: 27/06/2019)

- Knoop F, Schoeppner V (2015). *Mechanical and thermal properties of FDM parts manufactured with Polyamide 12*. University of Paderborn. 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin (Texas, USA).
 - Loaeza A D. (2014). *Obtención de curvas esfuerzo-deformación verdaderas del PP y copolímeros en bloque a velocidad de deformación constante aplicando correlación de imágenes digitales*. Trabajo Fin de Máster en Ciència i Enginyeria de Materials, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.
 - Martínez J. (2014). *Diseño y validación de modelo de simulación mediante elementos finitos del comportamiento mecánico en piezas fabricadas por deposición de hilo fundido*. Tesis doctoral, Programa de Doutoramento en Investigación en Tecnologías e Procesos Avanzados na Industria, Universidad de Vigo.
 - Oñate E. (1995). *Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos. Análisis estático lineal*: CIMNE.
 - Orain Industri4.0 (s.f.). Orain Guipuzkoa: *Fabricación Aditiva*. Recuperado en <https://www.gipuzkoa.eus/documents/20933/1883176/DFG-Industria4-0-Caso-Fabricacion-Aditiva-IMH-Esp.pdf>
- (Última visita: 27/06/2019)
- Ortega A. (2019). *Desarrollo de férulas para impresión 3D: fase de digitalización y diseño CAD*. Trabajo Fin de Grado de Ingeniería Mecánica, Universidad de Valladolid.

- Porter J H, Cain T M, Fox S L, Harvey P S. (2019). *Influence of infill properties on flexural rigidity of 3D-printed structural members*. Virtual and physical prototyping, 14 (2), 148-159. DOI: 10.1080/17452759.2018.1537064
(Última visita: 27/06/2019)
- Sierra J. (2018). Apuntes de la asignatura: *Modelado numérico de sistemas sólidos y fluidos*. Universidad de Valladolid.
- Smart Materials 3D (s.f). *Fichas técnicas*. Recuperado en <https://www.smartmaterials3d.com/es/tienda-smart/24-petg.html>
(Última visita: 27/06/2019)
- Thompson A (2018) *Surface texture measurement of metal additively manufactured parts by X-ray computed tomography*. PhD Thesis. University of Nottingham. Recuperado en:
https://www.researchgate.net/publication/331071064_Surface_texture_measurement_of_metal_additively_manufactured_parts_by_X-ray_computed_tomography.
(Última visita: 27/06/2019)
- Trapero D. (2017). *Todo sobre el PETG en impresión 3D*. Recuperado en:
<https://bitfab.io/es/blog/petg-impresion-3d/>
(Última visita: 27/06/2019)
- UNE-EN ISO 178. *Plásticos. Determinación de las propiedades de flexión*.
- UNE-EN ISO 527: *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción*.
- Valentín J. (2019). *Desarrollo de férulas mediante impresión 3D: comportamiento mecánico del material y prototipado*. Trabajo Fin de Grado de Ingeniería Mecánica, Universidad de Valladolid.