

Proyecto Fin de Máster  
Máster universitario en Ingeniería Industrial

Diseño y Ensayo de Férulas Personalizadas Mediante  
Impresión 3D.

Autor: Miguel Fuentes Bordallo

Tutor: Esther Reina Romo

Tutor: Juan Mora Macías

Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017





Proyecto Fin de Máster  
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

# **Diseño y Ensayo de Férulas Personalizadas Mediante Impresión 3D.**

Autor:

Miguel Fuentes Bordallo

Tutor:

Esther Reina Romo

Profesor Titular de Universidad

Tutor:

Juan Mora Macías

Profesor Ayudante Doctor

Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Proyecto Fin de Carrera: Diseño y Ensayo de Férulas Personalizadas Mediante Impresión 3D.

Autor: Miguel Fuentes Bordallo

Tutores: Esther Reina Romo  
Juan Mora Macías

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

Quisiera manifestar mi más sincero agradecimiento a mis tutores, Esther Reina Romo y Juan Mora Macías, así como a todo el laboratorio de ingeniería mecánica por poner a mi disposición todos sus conocimientos y tiempo necesario para poder haber llevado a cabo este trabajo Fin de máster.

También agradecer a todas aquellas personas que de manera directa o indirecta me han ayudado en la realización del mismo.

A toda mi familia y amigos que me han ayudado a desconectar en los momentos más oportunos y a conectar en los más inoportunos y por aguantarme todos estos meses.

*Miguel Fuentes Bordallo*

*Sevilla, 2017*



# Resumen

---

En este proyecto se trata de llevar un paso más a allá el modelo actual de férula utilizado actualmente cuando se produce una fractura, por ello intentamos sustituir el material utilizado, yeso París, el cual se usa fundamentalmente ya que es un material con un bajo precio y una alta adaptabilidad a la forma de la extremidad en la que la queremos aplicar y en la que se ha producido la rotura. Debido a estas cualidades pensamos que los materiales imprimidos en 3D pueden suplir bastante bien estas características, ya que los elementos fabricados mediante este proceso tienen un muy bajo coste siendo el material fundamental utilizado el plástico PLA con el cual podríamos conseguir una rigidez similar a la del yeso una vez endurecido, con todas estas premisas se va a proceder a realizar una serie de ensayos y de iteraciones buscando encontrar una férula imprimida en 3D de PLA que se adapte lo mejor posible a la extremidad deseada y que tenga una resistencia suficiente para fijar el hueso, además el uso de este material para órtesis también presenta una serie de ventajas tales como una mayor ligereza y facilidad de movimiento por parte del usuario, ya que el plástico se puede mojar, permite una mayor movilidad además de otra serie de características que iremos viendo a lo largo del proyecto.



<b>Agradecimientos</b>	<b>viii</b>
<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Gráficas</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Antecedentes y Problema de la Fractura</i>	1
<b>2 Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>3 Materiales y Métodos</b>	<b>3</b>
3.1 <i>Yeso</i>	3
3.2 <i>PLA</i>	3
3.3 <i>Impresión 3D</i>	4
3.3.1 <i>ABS</i>	4
3.3.2 <i>PLA</i>	4
3.4 <i>Programa de Elementos Finitos</i>	5
3.5 <i>Máquina Mini Bionix II</i>	5
3.6 <i>Videocorrelación</i>	7
<b>4 Fabricación y Preparación al Ensayo de Férula de yeso</b>	<b>9</b>
4.1 <i>Definición Férula</i>	9
4.2 <i>Postprocesado Férula de yeso</i>	10
4.3 <i>Torneado</i>	10
4.4 <i>Límite de Rotura</i>	12
4.4.1 <i>Primer Ensayo</i>	14
4.5 <i>Definición de Ensayo</i>	15
<b>5 Realización de Ensayos de Carga Axial a Férula de yeso</b>	<b>16</b>
5.1.1 <i>Segundo Ensayo en zona superior</i>	16
5.1.2 <i>Segundo Ensayo en zona media</i>	19
5.1.3 <i>Segundo Ensayo en zona inferior</i>	21
5.1.4 <i>Conclusión Segundo Ensayo</i>	22
5.1.5 <i>Tercer Ensayo en zona superior</i>	23
5.1.6 <i>Tercer Ensayo en zona media</i>	25
5.1.7 <i>Segundo Ensayo en zona inferior</i>	26
5.1.8 <i>Conclusión Tercer Ensayo</i>	28
<b>6 Diseño e Impresión por Fabricación en 3d de Modelos Verticales</b>	<b>29</b>
6.1 <i>Prototipo PLA</i>	30
6.1.1 <i>Inserción Agujeros</i>	31
6.1.2 <i>Porcentaje de Relleno de PLA</i>	37
6.1.3 <i>Modelado Férula</i>	38
6.2 <i>Diseño Férula</i>	42

6.2.1	Diámetro Férula	42
6.2.2	Espesor Férula	44
6.2.3	Modelo de Férula	50
<b>7</b>	<b>Realización de Ensayos de carga axial de órtesis verticales de pla</b>	<b>57</b>
7.1	<i>Primer Ensayo</i>	57
7.1.1	Primer Ensayo en zona superior	57
7.1.2	Primer Ensayo en zona media	59
7.1.3	Primer Ensayo en zona inferior	60
7.1.4	Conclusión Primer Ensayo	62
7.2	<i>Segundo Ensayo</i>	62
7.2.1	Segundo Ensayo en zona superior	62
7.2.2	Segundo Ensayo en zona media	64
7.2.3	Segundo Ensayo en zona inferior	65
7.2.4	Conclusión Segundo Ensayo	67
<b>8</b>	<b>Diseño e Impresión por Fabricación en 3d de Modelos Planos</b>	<b>68</b>
8.1	<i>Espesor y Porcentaje de Relleno</i>	69
8.2	<i>Modelo Férula PLA Plana, Dos Partes</i>	70
8.3	<i>Modelo Férula Pla Plana, Una Parte</i>	72
<b>9</b>	<b>Realización de Ensayos de Carga Axial de Órtesis Planas de pla</b>	<b>74</b>
9.1	<i>Primer Ensayo</i>	74
9.1.1	Primer Ensayo en zona superior	74
9.1.2	Segundo Ensayo en zona media	76
9.1.3	Segundo Ensayo en zona inferior	77
9.1.4	Conclusión Segundo Ensayo	79
9.2	<i>Segundo Ensayo</i>	79
9.2.1	Segundo Ensayo en zona superior	79
9.2.2	Segundo Ensayo en zona media	81
9.2.3	Segundo Ensayo en zona inferior	83
9.2.4	Conclusión Segundo Ensayo	84
<b>10</b>	<b>Conclusión</b>	<b>85</b>
<b>11</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>87</b>
<b>12</b>	<b>Anexo</b>	<b>89</b>
	<i>Anexo A: Ensayos de compresión PLA</i>	89

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1 Propiedades PLA	3
Tabla 2 Procedimiento de Carga Axial Férula de yeso	15
Tabla 3 Variación del Módulo de Young Respecto al porcentaje de relleno	38
Tabla 4 Variación Características según relleno	50
Tabla 5 Modificación Parámetros de Impresión	51
Tabla 6 Tabla de Propiedades según Espesor y Porcentaje de Relleno.	69
Tabla 7 Características según Espesor y Porcentaje de Relleno.	73

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1 Impresora Utilizada para fabricación de órtesis	4
Figura 2 Máquina Mini Bionix II	5
Figura 3 Rigidez Ensayo	6
Figura 4 Módulo de Young	6
Figura 5 Sección Férula de yeso Fabricada	7
Figura 6 Spray Utilizado para Pintar los Patrones	8
Figura 7 Cámara y Foco Videocorrelación	8
Figura 8 Tubo de PVC	9
Figura 9 Férula de yeso en PVC	10
Figura 10 Férula de Yeso	10
Figura 11 Útiles Torneado	11
Figura 12 Torno Paralelo Manual	11
Figura 13 Torneado Férula de yeso	12
Figura 14 Probeta Férula de yeso Muestra 1	12
Figura 12 Útiles Ensayo Mini Bionix II	13
Figura 11 Ensayo Máquina Mini Bionix II	13
Figura 17 Rotura Probeta 1	14
Figura 18 Límite de Rotura Probeta 1	14
Figura 19 Probeta Férula de yeso Muestra 2	16
Figura 19 Área Ensayo 2, zona Superior	18
Figura 20 Cálculo de Área	18
Figura 21 Probeta Férula de yeso 3	23
Figura 23 Propiedades PLA	30

Figura 24 Modelo 1 PLA	30
Figura 25 Prototipo 2 con 6 agujeros	32
Figura 25 Prototipo 3 con 3 agujeros	32
Figura 27 Prototipo 4 con 12 agujeros	34
Figura 28 Prototipo 5 con 4 agujeros	34
Figura 28 Prototipo 6,12 agujeros	36
Figura 29 Probeta Ensayo de PLA	37
Figura 30 Ensayo de la Probeta de PLA	37
Figura 32 Férulas 3D de PLA actuales en el mercado	39
Figura 33 Modelo en simplify3D cilindro abierto	39
Figura 34 Férula 3D de PLA en Rotulador	40
Figura 35 Férula 3D de PLA adherida en Rotulador	40
Figura 36 Férula cónica con extremidad	40
Figura 37 Prototipo Muñeca 1	41
Figura 38 Prototipo Muñeca 2	41
Figura 39 Prototipo Férula Completo	42
Figura 40 Diámetro Mayor Férula	43
Figura 41 Diámetro Inferior Férula	43
Figura 42 Modelo Férula PLA	44
Figura 43 Tornillos de Sujeción Órtesis	44
Figura 43 Ensayo Espesor Férula PLA 100%	45
Figura 45 Configuración Impresión 3D de Férula	45
Figura 45 Órtesis PLA Imprimida en 3D	46
Figura 46 Modelo Férula Mejorado	46
Figura 48 Ensayo Espesor Férula PLA 60%	48
Figura 49 Ensayo Espesor Férula PLA 60%	49
Figura 50 Error en la Extrusión debido a estrechez de las Paredes	50
Figura 51 Soportes para Extrusión Férula	51
Figura 52 Modificación Órtesis 3D	52
Figura 53 Módulo de Young Relleno 100%	52
Figura 55 Valores de Propiedades dados por el Fabricante	53
Figura 55 Férula con altura capa 0,1mm	54
Figura 56 Impresión Órtesis velocidad 30 mm/s	54
Figura 57 Comprobación de carga en Tornillos Resistentes	55
Figura 58 Férula altura capa 0,1 mm y velocidad 30 mm/s	55
Figura 59 Definición de puntos a medir con Spray	56
Figura 61 Máquina Mini Bionix II, ensayo PLA	56
Figura 61 Probeta Férulas PLA 1	57
Figura 63 Desplazamiento en cada Foto, Superior, Ensayo 2	57

Figura 63 Probeta Órtesis PLA 2	62
Figura 64 Secador Industrial Salki utilizada para aplicar calor al modelo	68
Figura 65 Modelo PLA Plano, dos partes	70
Figura 66 Impresión órtesis PLA plano, dos Partes	71
Figura 67 Modificación órtesis PLA plana, dos partes	71
Figura 68 Modelo PLA plana, una pieza reducido	72
Figura 69 Modelo PLA plana, una pieza	73
Figura 70 Probeta Férula PLA plana modificada	74
Figura 71 Zona Media captura desplazamientos Férula Plana 1	76
Figura 72 Zona Inferior captura desplazamientos Férula Plana 1	77
Figura 74 Probeta Órtesis PLA 2	79
Figura 74 Zona Media captura desplazamientos Férula Plana 2	81
Figura 75 Zona Inferior captura desplazamientos Férula Plana 2	83



# ÍNDICE DE GRÁFICAS

---

Gráfica 1 Desplazamiento en cada Foto, zona Superior, Ensayo 2	16
Gráfica 2 Módulo de Young del Prototipo 2, zona Superior	17
Gráfica 3 Desplazamiento en cada Foto, zona Media, Ensayo 2	19
Gráfica 4 Módulo de Young del Prototipo 2 zona Media	20
Gráfica 5 Desplazamiento en cada Foto zona Inferior, Ensayo 2	21
Gráfica 6 Módulo de Young del Prototipo 2, zona Inferior	21
Gráfica 7 Desplazamiento en cada Foto zona Superior del Ensayo 3	23
Gráfica 8 Módulo de Young del Prototipo 3, zona Superior	24
Gráfica 9 Desplazamiento en cada Foto, Medio, Ensayo 3	25
Gráfica 10 Módulo de Young del Prototipo 3, zona Media	25
Gráfica 11 Desplazamiento en cada Foto, zona Inferior del Ensayo 3	26
Gráfica 12 Módulo de Young del Prototipo 3, zona Inferior	27
Gráfica 13 Tensión-Deformación Yeso-Paris	29
Gráfica 14 Agujeros del 15% del Volumen Total	33
Gráfica 15 Agujeros del 30% del Volumen Total	35
Gráfica 16 Agujeros del 50% del Volumen Total	36
Gráfica 17 Módulo de Young Relleno 60%	47
Gráfica 18 Curva Tensión-Deformación PLA Relleno 60%	47
Gráfica 19 Módulo de Young Relleno 30%	48
Gráfica 20 Curva Tensión-Deformación PLA Relleno 60%	49
Gráfica 21 Curva Tensión-Deformación PLA Relleno 100%	53
Gráfica 23 Módulo de Young del Prototipo 2, zona Superior	58
Gráfica 24 Deformaciones en cada Foto zona Media del Ensayo PLA1	59
Gráfica 25 Módulo de Young del Prototipo PLA 1 zona Media	59
Gráfica 25 Deformaciones en cada Foto zona Inferior del Ensayo PLA 1	60
Gráfica 27 Módulo de Young. Prototipo PLA 1 Inferior	61
Gráfica 27 Deformación en cada Foto, zona Superior del Ensayo PLA 2	62
Gráfica 29 Módulo de Young del Prototipo PLA2, zona Superior	63
Gráfica 30 Deformación en cada Foto, Medio, Ensayo	64
Gráfica 30 Módulo de Young del Prototipo PLA 2, zona Media	64
Gráfica 31 Deformaciones en cada Foto en zona Inferior del Ensayo PLA 2	65
Gráfica 33 Módulo de Young del Prototipo PLA 2 en zona Inferior	66
Gráfica 34 Módulo de Young del Prototipo plano 1 en zona Superior	75

Gráfica 35 Módulo de Young del Prototipo plano 2 en la zona Media	76
Gráfica 36 Módulo de Young del Prototipo 3 en zona Inferior	78
Gráfica 37 Módulo de Young del Prototipo 1 en zona Superior	80
Gráfica 38 Módulo de Young del Prototipo PLA 2, zona Media	82
Gráfica 39 Módulo de Young del Prototipo PLA plano 2 en zona Inferior	83

# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Antecedentes y Problema de la Fractura

Actualmente para la correcta reparación de un hueso fracturado se siguen utilizando férulas de yeso, esta metodología de empleo se lleva utilizando durante mucho tiempo y presentan grandes inconvenientes para el usuario de dichas órtesis. La función de las férulas de yeso es proteger los huesos rotos y lastimados ayudando a aliviar el dolor y la hinchazón en una primera instancia y también como soporte de los tejidos blandos, como los músculos y los ligamentos. [1]. Este material viene en rollos o tiras de un polvo blanco, el cual se corta para ajustarse a la parte del cuerpo lastimada. Antes de realizar un vendaje de yeso, este se mezcla con agua, formando una pasta espesa que se endurece con rapidez y es en ese momento antes de que se endurezca completamente, es cuando el técnico especialista coloca el vendaje de yeso, formado por una gran venda con múltiples capas alrededor de la extremidad fracturada. Este método, además de ser laborioso y necesitar de un técnico especializado, presenta muchos otros grandes inconvenientes para el usuario de dichas órtesis, por un lado la mayoría de los vendajes de yeso no son impermeables, por lo que el usuario debe evitar mojarlo, ya que si esto ocurre, dicha órtesis se descompone y pierde todas sus propiedades para cumplir la función de mantener rígido el hueso, esto significa que se deberá usar una bolsa de plástico o una manga especial para protegerla durante el aseo personal. [2]. Otra gran desventaja reside en que el yeso es un material totalmente rígido que una vez seco no presenta ninguna movilidad, esto provoca que una vez reducida la inflamación de la rotura y avanzado la reparación del hueso se modifique la geometría exterior de la extremidad y la férula no se adapte y produzca incomodidad e incluso puede provocar la mala consolidación de la fractura.

Por otro lado la órtesis de yeso, corresponde a un cuerpo totalmente cerrado de un gran espesor, el cual se ajusta alrededor de la fractura, impidiendo una transpirabilidad de piel, creando irritación en esta. Otro inconveniente importante reside en que no permite una inspección visual de la correcta evolución de la consolidación de la fractura por parte de los especialistas, haciendo en algunos casos necesarios la rotura de la férula de yeso para una inspección del hueso para posteriormente realizar otra vez todo el proceso anteriormente descrito de colocación de la órtesis.

## 2 OBJETIVOS

---

La finalidad de este trabajo consiste en diseñar un prototipo con el cual mitigemos en la mayor parte de lo posible los problemas que ocurren en las férulas de yeso, para ello primero definiremos el material utilizado (PLA) y el diseño de nuestro modelo, a continuación utilizaremos un programa de elementos finitos para definir una geometría y espesor correcto que cumpla con las condiciones de resistencia y rigidez que presentan los modelos de yeso, después fabricaremos nuestra férula utilizando una impresora 3D para posteriormente ensayar dicha órtesis en una máquina de compresión axial con la finalidad de comprobar que realmente obtenemos en nuestro prototipo las propiedades deseadas. Todo este proceso lo realizaremos con diferentes propuestas de diseños con la intención de obtener finalmente un modelo que cumpliendo las condiciones de resistencia y rigidez impuestas sea lo más funcional y cómodo para el usuario al menor coste. [3]

## 3 MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Yeso

Para la fabricación de las férulas actuales de escayola, se parte del producto industrial yeso natural o aljez, genéricamente la escayola es un yeso de alta calidad y grano muy fino, con pureza mayor del 87% en mineral aljez. Hasta principios del siglo XIX se entendía por escayola a una mezcla de yeso con yeso espático, amasado con agua de cola. Desde el punto de vista tradicional la diferencia entre yeso y escayola es su pureza en aljez y diferente granulometría (la escayola es más fina). Mientras que el yeso tiene pureza mayor del 70%, la escayola ha de tener pureza mayor del 90%. La composición química de la escayola es mayoritariamente sulfato de calcio—agua (2/1):  $2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  junto con restos de aljez y anhidrita en fase III, cuya mayor o menor composición le confieren unas características u otras. [4]

La escayola se utiliza para la obtención de moldes, tanto para consolidación de extremidades fracturadas como para la producción de cerámicas o esculturas. Otra finalidad para la que se usa mucho hoy en día, es la decoración de paredes y techos a través de piezas prefabricadas en este material.

### 3.2 PLA

El PLA o ácido poliláctico es uno de los materiales más usados en el mundo de la impresión 3D gracias a la popularización de las impresoras de escritorio con tecnología de extrusión FDM.

El ácido poliláctico es un polímero biodegradable derivado del ácido láctico. Se fabrica a partir de recursos renovables al 100%, como son el maíz, la remolacha, el trigo y otros productos ricos en almidón. Este termoplástico tiene muchas características equivalentes, e incluso mejores, que muchos de los plásticos derivados del petróleo, lo que hace que sea eficaz para una gran variedad de usos.

El PLA es en su forma normal un polímero permanente e incoloro. Es resistente a la humedad y a la grasa. Tiene características de barrera del sabor y del olor similares al plástico de polietileno tereftalato, el famoso PET, que es usado como envase para bebidas no alcohólicas y para otros productos no alimenticios.

En cuanto a aspectos físicos, químicos y mecánicos, la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad del PLA es también comparable al del polietileno. Sin embargo, es más hidrofílico que el polietileno, ya que tiene una densidad más baja. Es además estable a la luz U.V. siendo más difícil su decoloración. En cuanto a su inflamabilidad, es demasiado baja. [5]

El PLA se puede formular para ser rígido o flexible y puede ser copolimerizado con otros materiales. El PLA se puede hacer con diversas características mecánicas dependiendo del proceso de fabricación seguido.

Propiedades PLA según fabricante:

Propiedades PLA	
Densidad	1,25 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	3,5 GPa
Elongación a la rotura	6 %
Temperatura de transición vítrea	60 °C
Comienzo de fusión	160 °C

Tabla 1 Propiedades PLA

### 3.3 Impresión 3D

La impresión 3D es un grupo de tecnologías de fabricación por adición donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material. Las impresoras 3D son por lo general más rápidas, más baratas y más fáciles de usar que otras tecnologías de fabricación por adición, aunque como cualquier proceso industrial, estarán sometidas a un compromiso entre su precio de adquisición y la tolerancia en las medidas de los objetos producidos. Las impresoras 3D ofrecen a los desarrolladores del producto la capacidad para imprimir partes y montajes hechos de diferentes materiales con diferentes propiedades físicas y mecánicas, a menudo con un simple proceso de ensamble. Las tecnologías avanzadas de impresión 3D pueden incluso ofrecer modelos que pueden servir como prototipos de producto.

La impresión 3D abarca un gran número de tecnologías, sus principales diferencias se encuentran en la forma en la que las diferentes capas son usadas para crear piezas. Algunos métodos usan fundido o ablandamiento del material para producir las capas, por ejemplo sinterizado de láser selectivo (SLS) y modelado por deposición fundida (FDM), mientras que otros depositan materiales líquidos que son curados con diferentes tecnologías. En el caso de manufactura de objetos laminados, delgadas capas son cortadas para ser moldeadas y unidas juntas. [6]

Para la impresión de los modelos diseñados de férulas de PLA, utilizamos una impresora Witbox 2 perteneciente al departamento de ingeniería mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, esta impresora usa la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM), la cual usa una tobera para depositar polímero fundido sobre una estructura soporte, capa a capa. Los principales materiales utilizados para la impresión 3D, suelen ser el ABS y PLA, Ambos son termoplásticos, y tienen diferencias entre ellos.

#### 3.3.1 ABS

Es el plástico que sueles encontrar en electrodomésticos y juguetes, Es muy duro y resiste altas temperaturas (temp transición vítrea 100 °C). Permite ser lijado, pulido, taladrado, pintado y pegado, también puede ser postprocesado. Estas características hacen que sea idóneo para la impresión de piezas mecánicas o que necesitan ser manipuladas o mecanizadas una vez impresas. [7] Este material requiere que la impresora tenga una superficie capaz de calentarse a altas temperaturas, cosa que no nos permite la Witbox 2, por lo que queda descartada como material de uso

#### 3.3.2 PLA

Es un termoplástico de origen natural, cuya ventaja es la gran cantidad de colores disponibles y que permite impresiones más rápidas. Además no emite gases perjudiciales al salir del extrusor (a diferencia del ABS). [8] Es el material ideal para empezar en la impresión en 3D, y para objetos que no requieran mucha resistencia, además no necesita cama caliente para su uso en la impresora, por ello es el material utilizado y que recomienda la casa BQ de la impresora Witbox 2.



Figura 1 Impresora Utilizada para fabricación de órtesis

### 3.4 Programa de Elementos Finitos

Hemos hecho uso de un programa de CAD, Autodesk Inventor, basado en el método de los elementos finitos, el cual es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. [9]

En nuestro caso lo hemos utilizado a fin de poder definir la geometría y espesor adecuado de nuestros diseños para que este fuera capaz de tener las mismas propiedades de resistencia que la férula de Yeso ensayada. Con la aplicación de este programa hemos podido realizar numerosos diseños, y aplicando este método, descartar o variar la geometría para adecuarla a la resistencia requerida.

### 3.5 Máquina Mini Bionix II

Para la realización de los ensayos de compresión en las probetas a fin de caracterizar el material, vamos a utilizar la máquina MINI BIONIX-II, corresponde a una máquina de ensayo de carga axial definida hasta 25 KN de carga, esta puede ser tanto de compresión como de tracción, además posee un movimiento de pistón superior en el que la parte inferior de la máquina permanece en posición constante durante el ensayo, dicho pistón podrá desplazarse un máximo de 60 mm y para manejar la máquina utilizaremos un ordenador adyacente en la que están instalados todos los programas necesarios para la manipulación de la máquina axial y en la que previamente al ensayo hemos introducido las cargas que queremos aplicar según hemos definido en el apartado anterior.



Figura 2 Máquina Mini Bionix II

Para el ensayo hemos utilizado una célula de carga de 5 KN que nos permita llegar a la carga deseada que hemos definido, con la cual vamos a obtener unos valores necesarios para calcular la rigidez local y llegar para así conocer el límite de rotura de la férula de yeso Paris, está la calcularemos sabiendo que la rigidez axial, es una medida de su capacidad para resistir intentos de alargamiento o acortamiento por la aplicación de cargas según su eje. Para este caso la rigidez depende sólo del área de la sección transversal (A), el módulo de Young del material de la barra (E) y la longitud de la siguiente manera, aplicando la ley de Hooke. [10]

$$\Delta L = \frac{LF}{AE} \quad F = \frac{EA}{L} (\Delta L = 1)$$



Figura 3 Rigidez Ensayo

Por tanto la rigidez resulta:

$$K_{ax} = \frac{N_x}{\delta_x} = \frac{EA}{L}$$

De forma que para calcular la rigidez debemos conocer el área y la longitud de la probeta, para lo cual utilizamos un calibre para medirlo en la férula de yeso una vez torneada. El módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, es una constante (para valores de tensión dentro del rango de reversibilidad completa de deformaciones). En este caso, su valor se define como el cociente entre la tensión y la deformación que aparecen en una barra recta estirada o comprimida fabricada con el material del que se quiere estimar el módulo de elasticidad:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

Por ello para calcular la rigidez solo nos falta calcular el módulo e Young de la férula de yeso Paris, por tanto usamos la Videocorrelación con la que podemos conseguir varios parámetros.

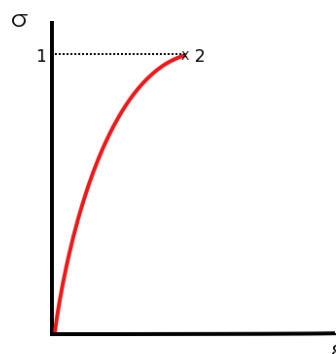


Figura 4 Módulo de Young

En caso de que la carga aplicada no sea suficiente o no tengamos datos suficientes para definir el diagrama tensión-deformación, viendo la ecuación anterior podemos proceder a aumentar la longitud de la probeta, disminuir el área, o en último caso aumentar la carga axial aplicada ya que en la máquina MINI BIONIX II se pueden aplicar hasta 25 KN.



### 3.6 Videocorrelación

Otro problema que vamos a encontrar al inspeccionar la férula de yeso después de su fabricación, reside en que la sección transversal de una férula de yeso no es uniforme a lo largo de la longitud transversal del modelo, debido al proceso de fabricación manual utilizado expuesto anteriormente.



Figura 5 Sección Férula de yeso Fabricada

Por ello no vamos a poder calcular la rigidez global de la pieza, ya que el área es diferente a lo largo de la sección, por tanto vamos a hacer uso de la Videocorrelación, esta tecnología se basa en la técnica de la correlación de imágenes y el principio de estereoscopia, de forma que con la instalación de una cámaras y haciendo uso del programa VIC-2D durante la realización del ensayo de carga axial de compresión, vamos a medir sin contacto los desplazamientos a lo largo de toda la superficie del yeso. A partir de ellos y utilizando el programa VIC-2D, calculamos las deformaciones necesarias para calcular la rigidez local en diferentes puntos de la pieza, obteniendo así la rigidez local en cada uno de ellos y conociendo el área de cada uno de los puntos vamos a poder calcular la rigidez global del modelo. También tendríamos que tener en cuenta que el área tampoco es constante para las diferentes alturas por lo que haremos una aproximación en la que supondremos que la sección del punto en el que cálculo los desplazamientos corresponde al valor constante de la sección para esa altura. [11]

Para una mejor aproximación de los resultados podríamos calcular los desplazamientos para diferentes puntos de la sección a una misma altura, pero ello provocaría tener que realizar el ensayo varias veces sobre la misma pieza lo que podría conllevar a deformaciones iniciales en los sucesivos ensayos, además hemos fabricado tres férulas de yeso por lo que decidimos proceder realizando el ensayo en las tres férulas de yesos diferentes, cada una con su geometría y en cada ensayo calcularemos los desplazamientos de tres puntos distintos, uno en la parte superior(más cercana al punto de aplicación de la carga y por tanto la que debe tener un mayor desplazamiento, uno en la mitad y uno en la zona inferior( la más cercana al punto de apoyo de la férula de yeso , por tanto la zona que sufrirá menos desplazamientos).

El software de Videocorrelación compara una imagen de referencia (material en reposo) con las imágenes capturadas durante el ensayo (material excitado). Mediante algoritmos obtenemos las deformaciones locales de un punto deseado, y con ello la rigidez local del punto.

Para este proceso hacemos uso de una cámara de fotos que tiene que estar paralela a la pieza en cuestión a la que queremos calcular las deformaciones, colocamos está a una distancia de 50 cm y con ayuda de un trípode ajustamos la altura e inclinación de la cámara. La Videocorrelación la haremos mediante una tarjeta conectada al ordenador y con el uso del programa VIC-Snap, el cual capturará las fotos y con el cual podemos ajustar el número de fotos que queremos hacer y la frecuencia de estas, la captura de las imágenes puede ser manual o automática. Otra opción es asociar la frecuencia de las imágenes con la fuerza que aplicaremos en el ensayo axial, en este caso la máquina MINI-BIONIX II.

Antes de proceder al ensayo debemos pintar las piezas con un spray de forma que queden definidos los puntos y consigamos así con las capturas de las imágenes poder visualizar los desplazamientos de los puntos. En un primer momento se pintan las piezas de blanco (en nuestro caso no es necesario ya que la férula de yeso es blanca) para a continuación con la ayuda de un spray negro dibujar sobre la superficie en la que queremos calcular las deformaciones los patrones en los cuales observaremos los desplazamientos. Los patrones no deben ser demasiado grandes ni tampoco muy pequeños e intentar que se reproduzcan a lo largo de toda la superficie que vamos a medir, en nuestro caso tenemos que tener especial cuidado con las irregularidades de la superficie exterior de la férula de yeso y con qué vamos a medir en tres zonas diferentes (superior, medio e inferior) de la férula de yeso, los desplazamientos



Figura 6 Spray Utilizado para Pintar los Patrones

Una vez obtenida las imágenes, las postprocesamos en el programa VIC-2D, en el cual primero debemos seleccionar las fotos realizadas durante el ensayo, las cuales han sido capturadas por la cámara y el programa VIC-Snap durante la realización del ensayo, a continuación debemos definir en la primera captura (indeformada) la zona de interés sobre la que queremos obtener los desplazamientos, esta zona puede abarcar cualquier parte dentro de la zona capturada, como en nuestro caso deseamos medir en tres zonas diferentes vamos a coger una zona amplia para calcular las deformaciones además tenemos que coger un punto de referencia para el cálculo de las deformaciones lo tenemos que poner en un punto que sepamos que se mueve menos, en nuestro caso al aplicar la carga desde arriba abajo pondremos el punto en lo más cerca de la parte inferior en la que se apoya la pieza. Una vez obtenido los desplazamientos podemos pasar a calcular las deformaciones, para ello debemos elegir el método adecuado para tal fin, el programa pone a nuestra disposición diferentes tipologías, como nuestra zona de influencia no es demasiado pequeña y tampoco tan grande como para tener que elegir algún método que necesite un poder de cálculo menor, realizando varios ensayos confirmamos que no existen mucha diferencia entre los métodos, por tanto elegimos el de LaGrange para tal fin. [12]

Para poder llevar a cabo la Videocorrelación comentada anteriormente, debemos de hacer uso de un trípode para la sujeción de la cámara, un foco para la correcta visualización de las capturas, la cámara irá conectada al programa VIC-2D del ordenador mediante una tarjeta de lector de cámara la cual también tendrá su propio cable de alimentación además para poder relacionar el tiempo en el que realizamos las capturas con la fuerza aplicada en ese momento utilizaremos un convertidor que transforme la señal analógica que nos entra mediante la unión de un cable con la máquina MINI BIONIX II con una digital que mediante un cable introduciremos como dato en el programa VIC-2D.



Figura 7 Cámara y Foco Videocorrelación

## 4 FABRICACIÓN Y PREPARACIÓN AL ENSAYO DE FÉRULA DE YESO

Lo primero que tenemos que hacer antes de empezar a diseñar y fabricar nuestra órtesis de 3D, es obtener los valores de las propiedades del yeso París, principalmente la rigidez para saber cómo se deforma la férula de yeso frente a la carga aplicada, para ello tenemos que realizar ensayos pero antes de todo tenemos que iniciar el proceso de fabricación de una férula de yeso París para conocer las propiedades de este material.

### 4.1 Definición Férula

Procedemos a realizar la fabricación de unos modelos de férula de yeso sobre los que después aplicaremos una carga axial en uno de sus lados para obtener midiendo los desplazamientos de un punto, las deformaciones y con estos datos la rigidez y así conocer las propiedades de este material.

Como queremos aplicar la carga directamente sobre la férula de yeso y a fin de obtener unos valores lo más reales posibles, necesitamos un molde o tubo inicial sobre el que aplicar las láminas de yeso París para que una vez seca este, pueda extraerse del model. Por ello decidimos proceder utilizando unos tubos de PVC de 50 mm de diámetro como molde sobre el cual aplicaremos un film transparente recubriendo exteriormente el tubo y vaselina encima de ella a fin de que la extracción del yeso sea lo más fácil posible, esta extracción se debe de realizar antes de que el yeso se seque completamente pero después de un tiempo necesario tal, que de tiempo para que la férula de yeso se amolde en su parte interior a la forma exterior del tubo a fin de que después de la extracción esta mantenga la misma configuración



Figura 8 Tubo de PVC

A continuación procedemos a colocar las vendas de yeso París, utilizamos para ello un yeso genérico usado para férulas de yeso conseguidas en una tienda de ortopedia de longitud 150 mm, las cuales son de la misma longitud que las utilizadas en un caso real, estas las aplicamos sobre el tubo de PVC de 50 mm que tomamos como soporte. Primero mojamos las tiras de yeso en agua y una vez que hayan absorbido bien el líquido empezamos a colocar las tiras de yeso alrededor del tubo de PVC a lo largo de una longitud de 200 mm, después aplicaremos una serie de capas a lo largo del tubo procurando que sea lo más uniforme posible en toda la longitud. Una vez enrolladas todas las tiras, dejamos un tiempo prudencial hasta que la férula de yeso se haya secado un poco y se amolde interiormente a la forma del tubo, para proceder a continuación a la extracción de la férula de yeso del tubo para poder así aplicar la carga deseada en el ensayo directamente en la férula de yeso. [13]

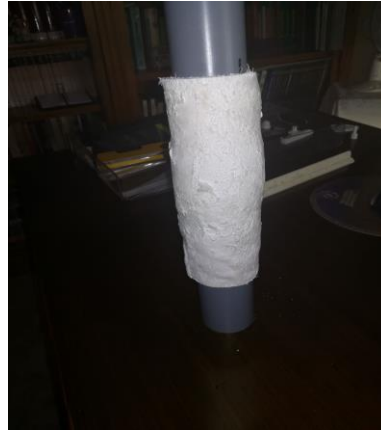


Figura 9 Férula de yeso en PVC

## 4.2 Postprocesado Férula de yeso

Una vez conseguido extraer satisfactoriamente la férula de yeso del tubo de PVC, nos damos cuenta que la superficie exterior es muy irregular tanto en la forma perimetral como en las dos caras exteriores.



Figura 10 Férula de Yeso

Debido a esta geometría irregular que obtenemos mediante el proceso de fabricación descrito anteriormente, tenemos que realizar un postprocesado a dicho prototipo, estos defectos son debidos fundamentalmente a que aplicamos el material en tiras alrededor del tubo de PVC a lo largo de 200 mm y la parte central acumula un poco más de material que las extremidades, también es producido por la porosidad del material y que por la irregularidad de este hay zonas que se secan antes y contraen más que otras, además en los extremos al secarse el material se acopla a la forma del tubo de PVC y durante el proceso de extracción del yeso, debido a que aplicamos una carga torsional de esta respecto al tubo, se producen diferentes configuraciones y acumulación de material, esto provoca estas irregularidades en la pieza en las partes extremas, a continuación explicamos cómo hemos resuelto ambos problemas para poder así calcular la rigidez del material.

## 4.3 Torneado

El problema que produce que ambas caras extremas no sean paralelas, reside en que como queremos aplicar una carga axial controlada, para así poder obtener los desplazamientos y con ellos las deformaciones y con el valor del módulo de Young la rigidez deseada, y con la configuración actual al aplicar la carga se apoyaría sobre una superficie irregular lo que produciría que la carga no se distribuyera sobre el área deseada ni la carga fuera totalmente axial obteniendo por tanto unos valores irreales, lo mismo también ocurriría en el punto de apoyo inferior.

Para conseguir que ambas caras sean paralelas y perpendiculares. Tanto al punto superior de aplicación de la carga como al punto de apoyo en la zona fija, se nos ocurre postprocesar la pieza en un torno. Debido a la geometría irregular de la férula de yeso, hacemos uso de los tubos de PVC y de una serie de útiles tanto para mejorar el agarre de la férula de yeso en el torno como para definir las zonas de corte paralelas entre ellas.



Figura 11 Útiles Torneado

Para el proceso de corte de la férula de yeso usamos un torno paralelo manual, el cual ajustamos de forma que gire a 425 rpm y utilizando como pieza de corte una sierra tronzal, con la cual cortamos la parte de la pieza de la férula de yeso que no nos sirva buscando una longitud deseada de 85 mm y consiguiendo que ambas caras extremas sean paralelas, utilizamos esta metodología ya que se trata de una pieza pequeña, que se puede colocar fácilmente en el plato del torno, mecanizamos colocando la parte que queremos cortar sobresaliendo del plato, de forma que una vez finalizada la operación esta se corta, separándola y avanzando después la sierra en la pieza para mecanizar hasta llegar hasta el otro extremo para finalizar la pieza. Operamos así con los tres prototipos de las férulas de yeso fabricados. [14]



Figura 12 Torno Paralelo Manual

Procediendo al torneado de la férula de yeso en ambos lados.



Figura 13 Torneado Férula de yeso

Conseguida que la férula de yeso sea paralela en ambos lados, hemos resuelto el primer problema que se nos presentaba ya que ahora podemos aplicar la carga axial, debemos de tener en cuenta que debido a la geometría del área y para asegurarnos de que la carga se reparte sobre toda la superficie usaremos para el ensayo una pequeña plataforma que iguale las pequeñas imperfecciones así como una rótula en el punto de aplicación de la carga. Para el segundo problema que encontrábamos al no ser la sección transversal de la escayola uniforme, hacemos uso del método de la Videocorrelación expuesto con anterioridad.

#### 4.4 Límite de Rotura

Como la geometría de la férula de yeso no es uniforme, vamos a realizar el ensayo en tres férulas de yesos diferentes, las cuales tienen la misma longitud, una vez realizado el torneado, quedando la longitud de la férula de yeso en 91,5 mm, un área variable a lo largo de la distancia debido a las imperfecciones causadas durante el proceso de fabricación, En todos ellos calcularemos la rigidez local en tres puntos, uno en la parte de arriba, otra en el medio y por último abajo del todo. Con todos estos ensayos podremos hacer una media ponderada y calcular la rigidez del yeso Paris.



Figura 14 Probeta Férula de yeso Muestra 1

Buscando una correcta distribución de las cargas aplicadas y debidas a que el diámetro de la férula de yeso es ligeramente mayor al de la célula de carga usamos para el ensayo una pequeña plataforma inferior que soporte la férula de yeso y encima de esta pondremos una rótula para alinear adecuadamente el punto inicial del ensayo y que la carga axial se reparta a lo largo del área superior de la férula de yeso, como el diámetro de la célula de carga es menor al de la férula de yeso, también usaremos una pequeña plataforma de aluminio entre ambos elementos, este peso lo tendremos en cuenta como carga inicial a la hora de realizar el ensayo.

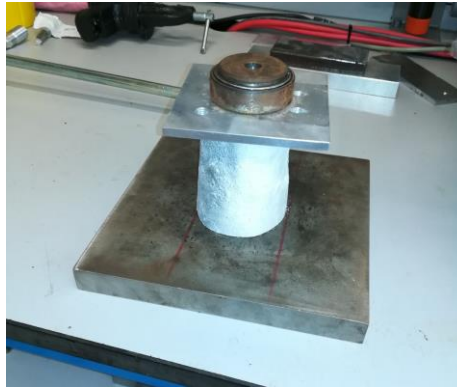


Figura 15 Útiles Ensayo Mini Bionix II

Colocamos también para el ensayo un foco, con la intención de obtener unas capturas de los puntos negros pintados con el spray lo más claras posibles, ubicando el resto de utensilios necesarios para el ensayo resulta:



Figura 16 Ensayo Máquina Mini Bionix II

#### 4.4.1 Primer Ensayo

En este primer ensayo debemos de tener en cuenta que todavía no conocemos la resistencia a compresión de la férula de yeso Paris, por ello en este ensayo vamos a aplicar una carga al modelo en forma de rampa hasta 4,5 KN, siendo el límite de la célula de carga utilizada de 5 KN, si no se produjese la rotura podríamos ampliar esta hasta 25 KN, con ello buscamos conocer un primer valor del límite de rotura del yeso París y poder definir el final de la zona elástica del material y así en los sucesivos ensayos definir los límites de carga para obtener la rigidez del material. Realizamos el ensayo, de forma que los resultados obtenidos resultan:



Figura 17 Rotura Probeta 1

Sobrepasando el límite de rotura en este caso para una carga de 3 KN:



Figura 18 Límite de Rotura Probeta 1

Con estos datos ya podemos saber los límites entre los que nos podemos mover para poder obtener datos de los desplazamientos de los diferentes puntos durante su deformación elástica lineal, además en este ensayo hemos comprobado que se produce una fractura frágil para el material de yeso Paris.



## 4.5 Definición de Ensayo

Antes de proceder a realizar el ensayo de carga Axial, debemos definir el ensayo que queremos realizar para calcular la rigidez de una férula de yeso Paris, en los apartados anteriores hemos resuelto los problemas de la no homogeneidad de las férulas que hemos hecho, ahora con el ensayo anterior conocemos cual es el límite elástico del yeso Paris, además de que si en caso de llegar a una fractura esta sería frágil, debido a ello y a que con el uso de la Videocorrelación, obtenemos las imágenes de los desplazamientos de los puntos marcados en la férula mediante spray optamos por utilizar para el ensayo una célula de carga de límite 5 KN en la cual aplicaremos escalones de 5 segundos de duración hasta un incremento de 100 N, después de ello se producirá una recta de pendiente 0 a carga constante durante 10 segundos, la finalidad de esta recta es que en el proceso de su duración procedamos a la captura de las fotos con la cámara para cada escalón de carga para poder así calcular las deformaciones, esta recta la hemos tomado de 10 segundos de duración procurando con ello que se establezcan los desplazamientos y tensiones producidos por la aplicación de la carga e intentando conseguir así una imagen lo más realista posible al estado de carga que corresponda.

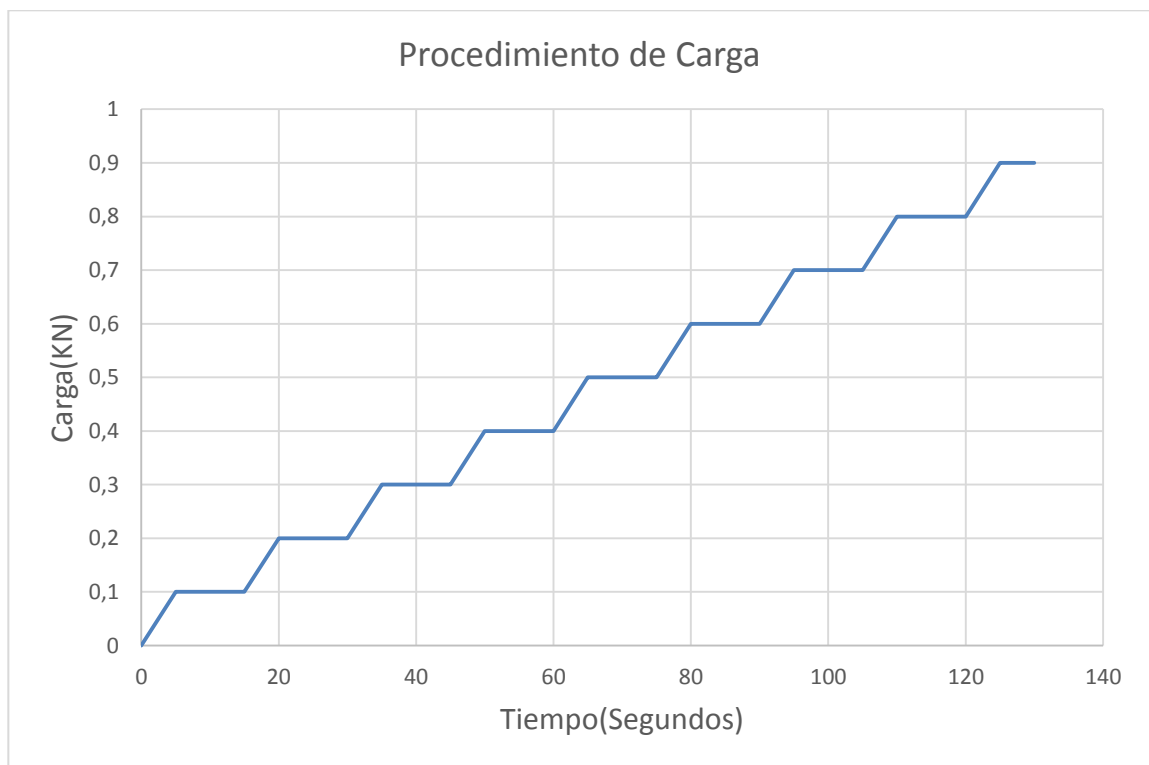


Tabla 2 Procedimiento de Carga Axial Férula de yeso

En la gráfica anterior podemos ver la distribución de los escalones de carga respecto al tiempo, esta representa solo hasta una carga de 1 KN, llegando en nuestro caso a 4,5 KN, esto es debido a que se busca una facilidad de representación de esta y por ello exponemos solo una parte de la carga aplicada.

# 5 REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE CARGA AXIAL A FÉRULA DE YESO

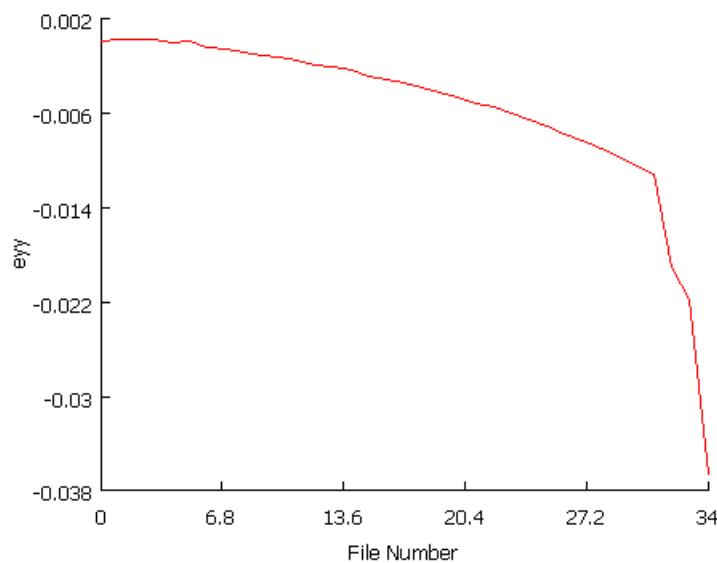
## 5.1.1 Segundo Ensayo en zona superior

Para este segundo ensayo operamos igual que en el anterior, con la diferencia de ya tenemos completamente estructurado el ensayo y podemos predecir mejor el comportamiento de la férula de yeso



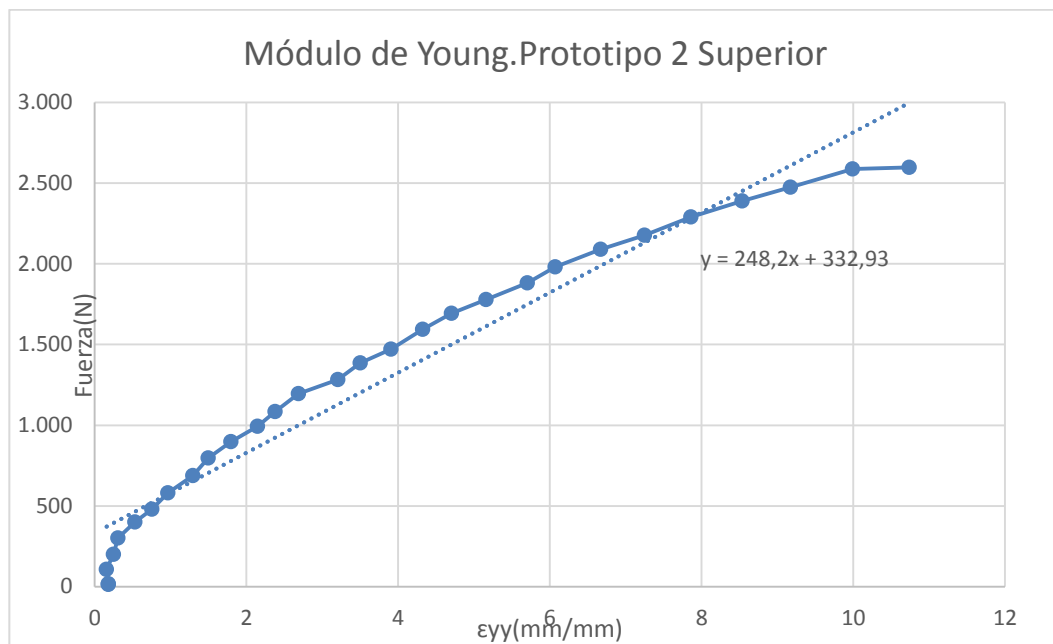
Figura 19 Probeta Férula de yeso Muestra 2

Con los resultados obtenidos después de postprocesar los datos mediante la Videocorrelación, comparamos los desplazamientos de los puntos inferiores de la muestra con respecto a cada fotografía obteniendo la siguiente gráfica que nos muestra la evolución de los puntos respecto al desplazamiento vertical según las diferentes fotos.



Gráfica 1 Desplazamiento en cada Foto, zona Superior, Ensayo 2

Con el gráfico anterior solo obtenemos los desplazamientos en cada fotografía, sabemos el tiempo en el que se ha realizado cada una, pero para poder obtener la rigidez local debemos relacionarlo con la fuerza aplicada en cada uno de los momentos y las deformaciones obtenidas a partir de los desplazamientos, por ello utilizando la salida analógica de los datos de la MINI BIONIX II y pasándolos a digital y comparándolos en el tiempo y para cada una de las fotografías con la fuerza aplicada para cada una de ellas, podemos relacionar el desplazamiento que se produce para cada escalón de fuerza, comparando ambos datos para hallar el valor del módulo de Young, resulta:



Gráfica 2 Módulo de Young del Prototipo 2, zona Superior

En la gráfica anterior, podemos comprobar como más o menos a partir de aplicar en la férula de yeso una fuerza de 0,5 KN empezamos a entrar en la zona de comportamiento elástico lineal del material hasta que al llegar un poco antes de los 2,6 KN entramos en la zona de rotura, realizando el ensayo podemos comprobar que se produce una rotura frágil en la cual para un leve aumento de la carga se observan grandes desplazamientos.

Con los datos obtenidos y habiendo calculado anteriormente antes del ensayo el área de la zona en la que hemos medido el desplazamiento de los puntos, podemos proceder a calcular la rigidez local de dicho punto, cabe decir que el área no es regular conforme al desplazamiento longitudinal de la férula de yeso pero tampoco para una misma longitud a lo largo de dicho perímetro, por lo que para obtener unos datos más exactos de las propiedades del material, se deberían medir los desplazamientos e varios puntos situados a la misma altura para poder así realizar una ponderación del área y realizar una media entre los desplazamientos obtenidos y el área de cada uno de ellos, pero como hemos explicado antes esto provocaría aumentar exponencialmente el número de ensayos a realizar y que al no poder nuestra máquina de Videocorrelación medir a la vez el desplazamiento de puntos en distintas caras, deberíamos realizar el ensayo varias veces e incurriríamos en que se irían acumulando pequeños desplazamientos permanentes que no se mitigarían al quitar la carga, por ello optamos por la solución de suponer el área constante y del valor del punto medido aun sabiendo que vamos a incurrir en un pequeño error.



Figura 20 Área Ensayo 2, zona Superior

Con todos estos datos podemos proceder al cálculo de la rigidez local en dicho punto en MPa

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

Para el cálculo de la sección, sabiendo que para un cilindro hueco resulta:

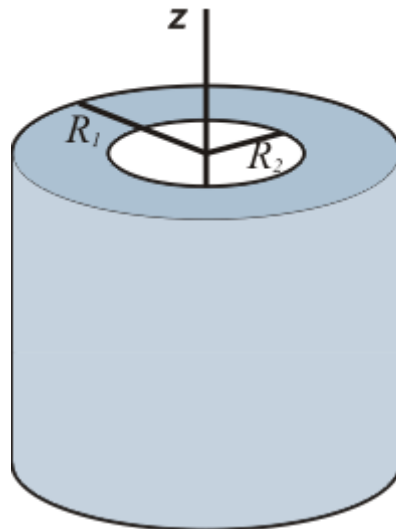


Figura 21 Cálculo de Área

$$S = \pi * R_1^2 - \pi * R_2^2 = \pi * (R_1^2 - R_2^2) = \pi * ((33,5mm)^2 - (24mm)^2) = 1,716 * 10^{-3} m^2$$

Y la longitud de las probetas como hemos calculado antes resulta:

$$l_0 = 91,5 \text{ mm}$$

Sustituyendo todos los términos obtenemos, sabiendo la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 248,2x + 332,93$$

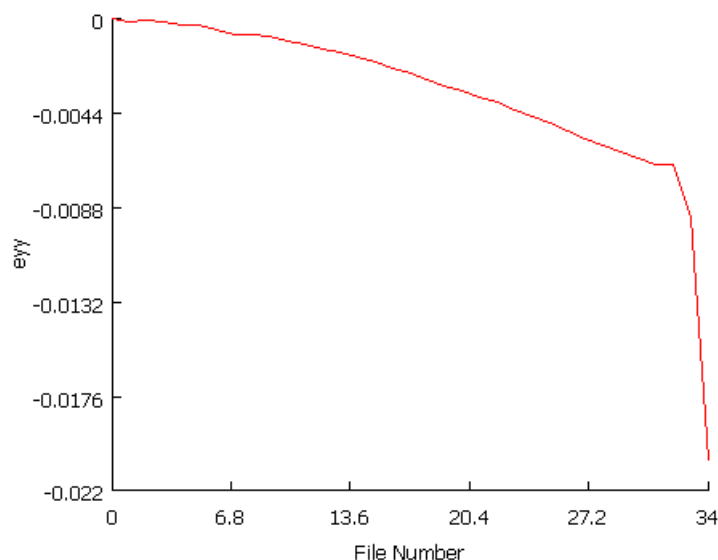
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{581,13}{\frac{1mm}{91,5mm} * 1,716 * 10^{-3}m^2} * 10^{-6} = 30,986MPa$$

También podemos obtener el coeficiente de poisson de la escayola, ya que con la Videocorrelación hemos también calculado los desplazamientos que se producen horizontalmente y estos son debidos a dicho fenómeno:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}} = \frac{1,9576}{9,824} = 0,2$$

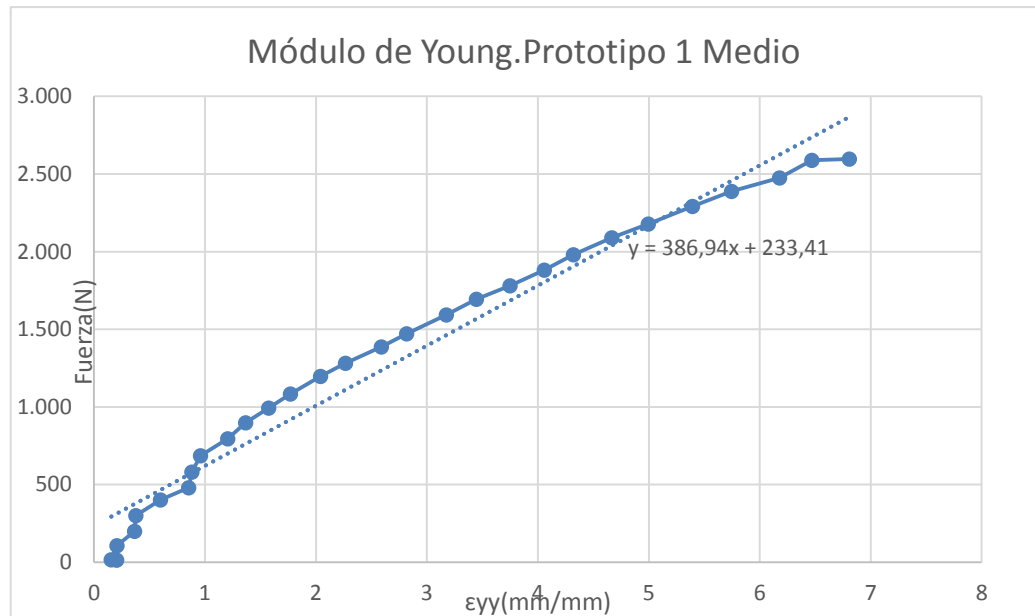
### 5.1.2 Segundo Ensayo en zona media

Ahora procederemos a realizar los mismos ensayos que los anteriormente dispuestos pero para la segunda zona de la probeta seleccionada, la de la zona media y operamos como el caso anterior. Los resultados obtenidos por la Videocorrelación:



Gráfica 3 Desplazamiento en cada Foto, zona Media, Ensayo 2

Utilizando estos datos y comparándolos con los obtenidos de fuerza aplicada en la probeta, para cada una de las fotos mediante la aplicación del ensayo



Gráfica 4 Módulo de Young del Prototipo 2 zona Media

Midiendo el área para el lugar indicado, y obteniendo todos estos datos podemos proceder al cálculo de la rigidez local en dicho punto en MPa

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

Para el cálculo de la sección, sabiendo que para un cilindro hueco resulta:

$$S = \pi * R_1^2 - \pi * R_2^2 = \pi * (R_1^2 - R_2^2) = \pi * ((33,5mm)^2 - (24mm)^2) = 1,716 * 10^{-3} m^2$$

Y la longitud de las probetas como hemos calculado antes resulta:

$$l_0 = 91,5 \text{ mm}$$

Sustituyendo todos los términos obtenemos, sabiendo la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 386,94x + 233,41$$

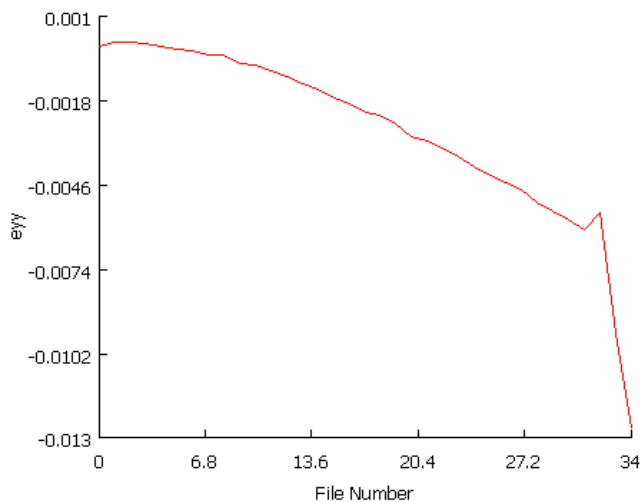
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{620,35N}{\frac{1mm}{91,5mm} * 1,716 * 10^{-3} m^2} * 10^{-6} = 33,078 \text{ MPa}$$

Y el coeficiente de poisson del material asociado:

$$\nu = -\frac{\epsilon_{trans}}{\epsilon_{long}} = \frac{1,6973}{6,534} = 0,259$$

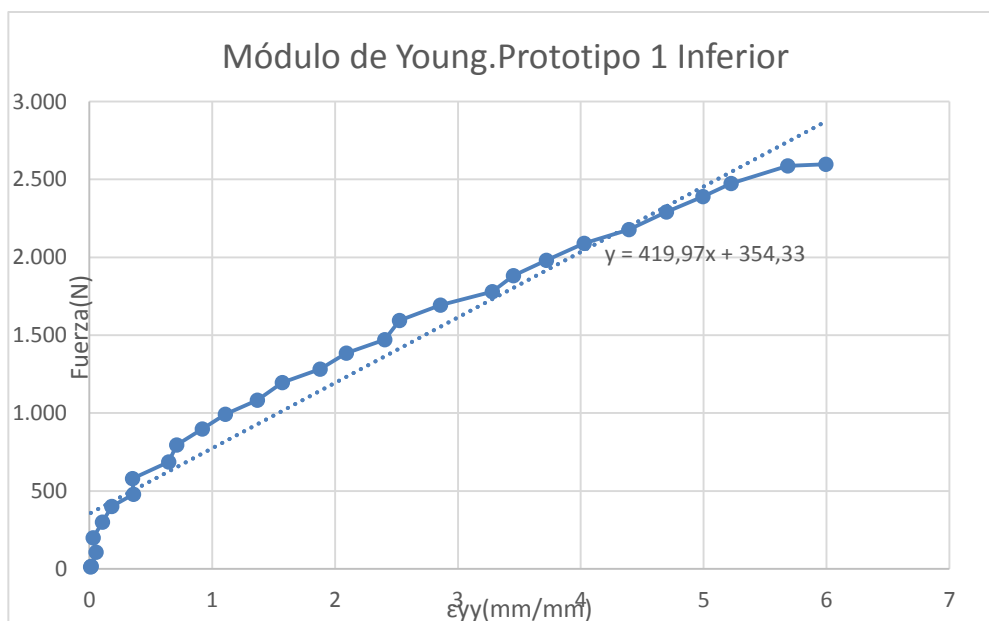
### 5.1.3 Segundo Ensayo en zona inferior

Por último con los datos obtenidos de la parte inferior a medir de la probeta, los desplazamientos de los puntos respecto al tiempo y las fotografías asociadas para cada uno de ellos:



Gráfica 5 Desplazamiento en cada Foto zona Inferior, Ensayo 2

Como en los casos anteriores podemos observar que los desplazamientos que se obtienen son negativos, esto es debido a que realizamos un ensayo de compresión, y en la máquina MINI-BIONIX II este movimiento está definido como negativo, siendo la tracción positiva. Comparando los desplazamientos respecto a la fuerza aplicada en cada uno de los momentos:



Gráfica 6 Módulo de Young del Prototipo 2, zona Inferior

Con la obtención del área asociada a dicho punto, como en los casos anteriores:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

La sección para un cilindro hueco corresponde:

$$S = \pi * R_1^2 - \pi * R_2^2 = \pi * (R_1^2 - R_2^2) = \pi * ((32,5mm)^2 - (23mm)^2) = 1,656 * 10^{-3} m^2$$

Y la longitud de las probetas como hemos calculado antes resulta:

$$l_0 = 91,5 mm$$

Sustituyendo todos los términos obtenemos, sabiendo la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 419,97x + 354,33$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{774,3}{\frac{1mm}{91,5mm} * 1,656 * 10^{-3} m^2} * 10^{-6} = 42,782 MPa$$

Y el coeficiente de poisson del material asociado:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}} = \frac{2,07}{5,767} = 0,35$$

#### 5.1.4 Conclusión Segundo Ensayo

Como podemos observar por los datos expuestos en anterioridad, se logra observar que en la parte superior se obtienen unos desplazamientos mayores que en el resto de los casos, disminuyendo los desplazamientos máximos conforme nos vamos acercando a la parte inferior de la probeta. Esto es coherente ya que el ensayo lo aplicamos con una máquina que posee un pistón superior variable, de forma que el desplazamiento tiene que ser mayor en esta parte que en la parte inferior donde la férula de yeso permanece fija.

Con la obtención del desplazamiento en cada una de las fotos, conseguimos calcular la fuerza asociada y la deformación de los puntos elegidos a partir de los desplazamientos, podemos ver que al comienzo de esta en los tres casos se produce un aumento muy leve de carga, esta es debida a la carga inicial necesaria para la correcta colocación de la articulación usada para que la fuerza sea aplicada en toda el área de la probeta a la vez. A partir de ese momento comienza el ensayo y el comportamiento elástico en la que existe una relación lineal entre la tensión y la deformación, tal y como hemos explicado con anterioridad, la principal propiedad de esta zona reside en que las deformaciones se revierten completamente al eliminar la carga o fuerza actuante, esto es que la probeta cargada por una tensión en la región elástica se desplazará, pero retomará su forma y tamaño original cuando se retira la carga. Luego de la región lineal, las deformaciones son plásticas. Un espécimen que se ha deformado en forma plástica no volverá a su estado original cuando se retire la carga. Para nuestro material y el estudio del módulo de Young, nos interesa el comportamiento en la parte lineal, además podemos comprobar por los ensayos que existe una rotura frágil, tal que tiene lugar sin una apreciable deformación de la probeta.

Comparando los tres casos, podemos ver que conforme vamos acercándonos a la parte inferior de deformación fija, el módulo de Young es mayor, ya que para una misma deformación necesitamos una mayor carga en la parte baja.



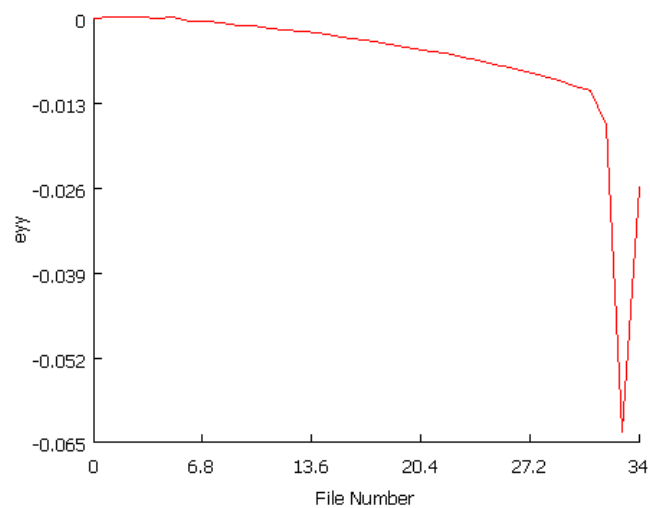
### 5.1.5 Tercer Ensayo en zona superior

En este último ensayo, vamos a realizar los mismos pasos que para el segundo ensayo, acotando el ensayo como en el anterior para la parte superior, en este caso la férula de yeso a ensayar resulta:



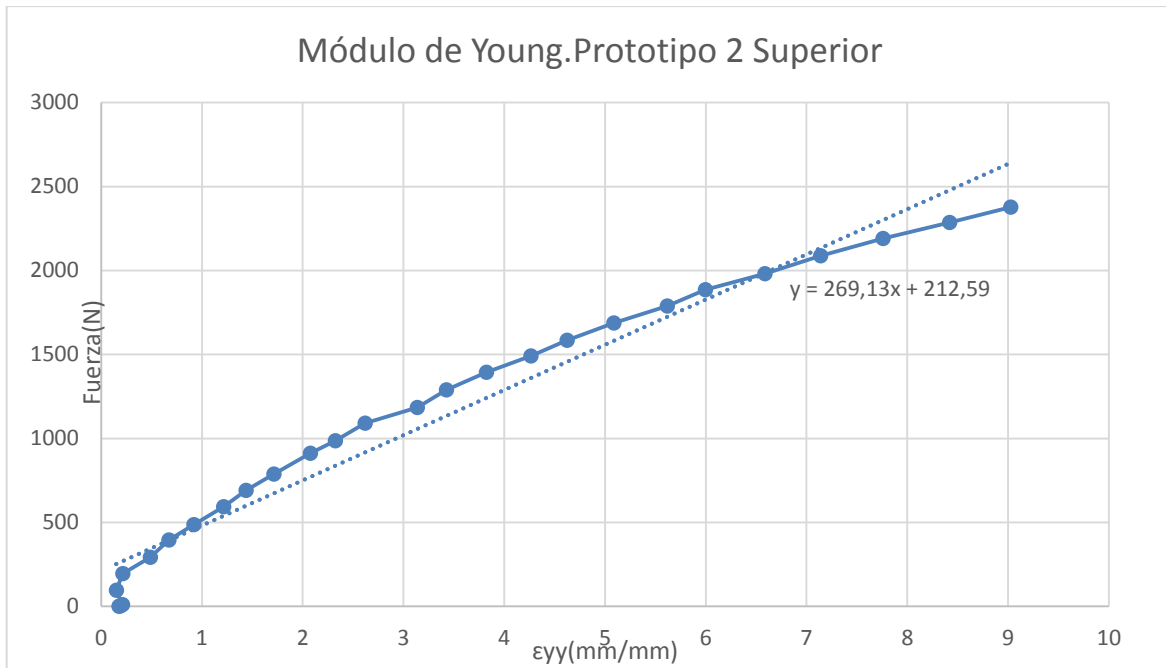
Figura 22 Probeta Férula de yeso 3

En esta primera zona, la parte superior, los desplazamientos de los puntos seleccionados para cada una de las fotos, resultan:



Gráfica 7 Desplazamiento en cada Foto zona Superior del Ensayo 3

En la gráfica anterior, podemos observar como en las últimas capturas dejamos de aplicar la carga y la probeta recupera parte de la deformación producida por la carga, con dichos datos obtenemos las deformaciones e introduciendo la fuerza a la que se producen cada una de las capturas:



Gráfica 8 Módulo de Young del Prototipo 3, zona Superior

En este caso se comienzan a producir desplazamientos destacables a partir de una carga determinada (aproximadamente 260 N) y entramos en la zona elástica lineal hasta un valor a partir del cual la relación entre la fuerza y el desplazamiento no es constante y para el mismo valor de carga aumentan considerablemente los desplazamientos, entrando por tanto en la zona no lineal, como en el ensayo anterior, esto se produce a una carga de aproximadamente 2500 N, Con una carga un poco mayor llegaríamos a la rotura frágil del material.

Midiendo el área y los datos necesarios, podemos calcular la rigidez local del punto deseado

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

Para el cálculo de la sección:

$$S = \pi * R_1^2 - \pi * R_2^2 = \pi * (R_1^2 - R_2^2) = \pi * ((32,75mm)^2 - (24mm)^2) = 1,559 * 10^{-3}m^2$$

Y la longitud de las probetas como hemos calculado antes resulta:

$$l_0 = 91,5 \text{ mm}$$

Sustituyendo todos los términos obtenemos, sabiendo la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 269,13x + 212,59$$

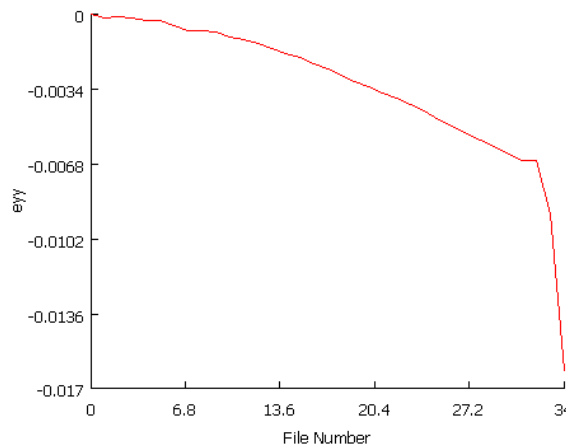
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{481,72}{\frac{1mm}{91,5mm} * 1,559 * 10^{-3}m^2} * 10^{-6} = 28,272MPa$$

También podemos obtener el coeficiente de poisson del material, ya que con la Videocorrelación hemos también calculado los desplazamientos que se producen en la dirección horizontal y estos son debidos a dicho fenómeno:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}} = \frac{1,660}{5,8661} = 0,2829$$

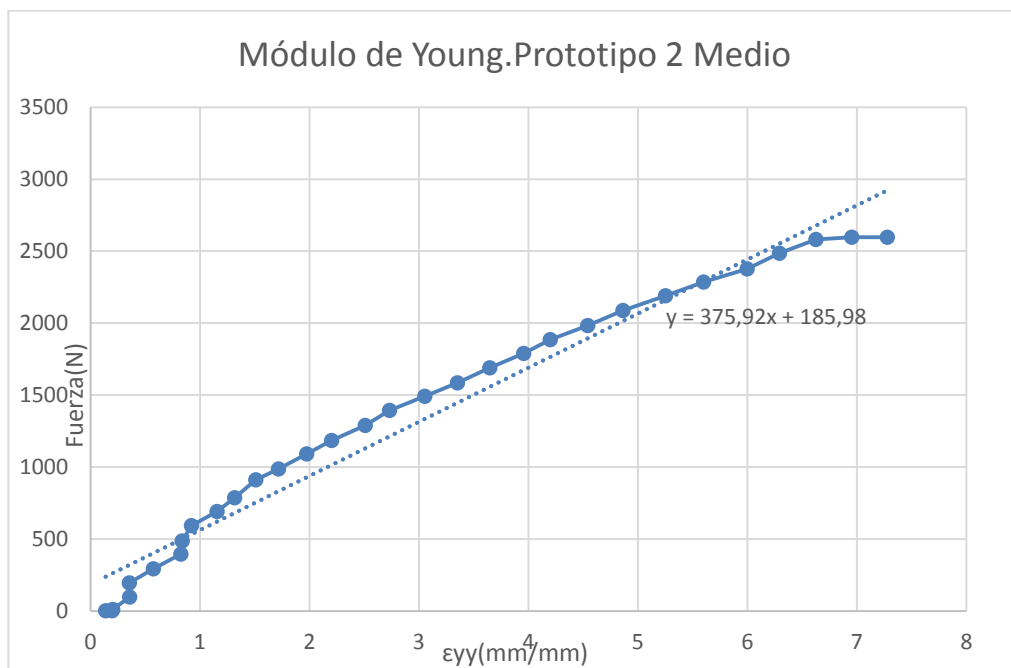
### 5.1.6 Tercer Ensayo en zona media

Ahora haremos los mismos ensayos que los anteriormente dispuestos pero para la segunda zona de la probeta seleccionada, la de la zona media y operamos como el caso anterior. Los resultados obtenidos por la Videocorrelación:



Gráfica 9 Desplazamiento en cada Foto, Medio, Ensayo 3

Utilizando estos datos y comparándolos con los obtenidos de fuerza aplicada en la probeta, para cada una de las fotos mediante la aplicación del ensayo



Gráfica 10 Módulo de Young del Prototipo 3, zona Media

Obteniendo los datos del área y las fuerzas e incrementos de desplazamiento:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

La sección del área hueca:

$$S = \pi * R_1^2 - \pi * R_2^2 = \pi * (R_1^2 - R_2^2) = \pi * ((33mm)^2 - (24mm)^2) = 1,611 * 10^{-3}m^2$$

Y la longitud de la probeta:

$$l_0 = 91,5 \text{ mm}$$

Sustituyendo todos los términos obtenemos, sabiendo la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 375,92x + 185,98$$

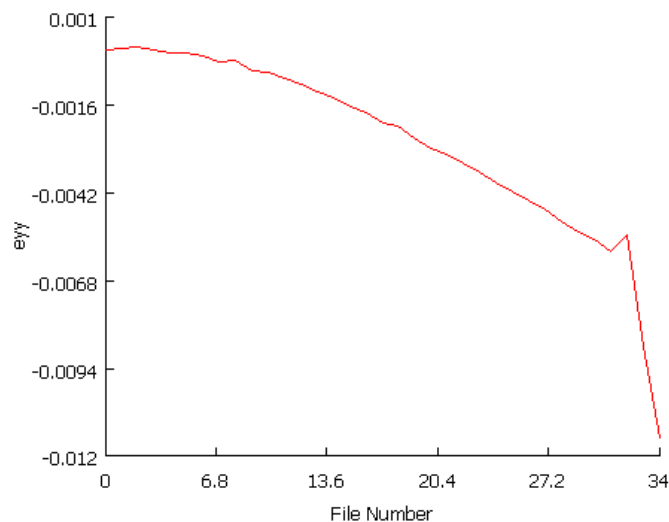
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{561,9}{\frac{1mm}{91,5mm} * 1,611 * 10^{-3}m^2} * 10^{-6} = 31,914 \text{ MPa}$$

Y el coeficiente de poisson del material asociado:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}} = \frac{1,224314}{6,6544} = 0,195$$

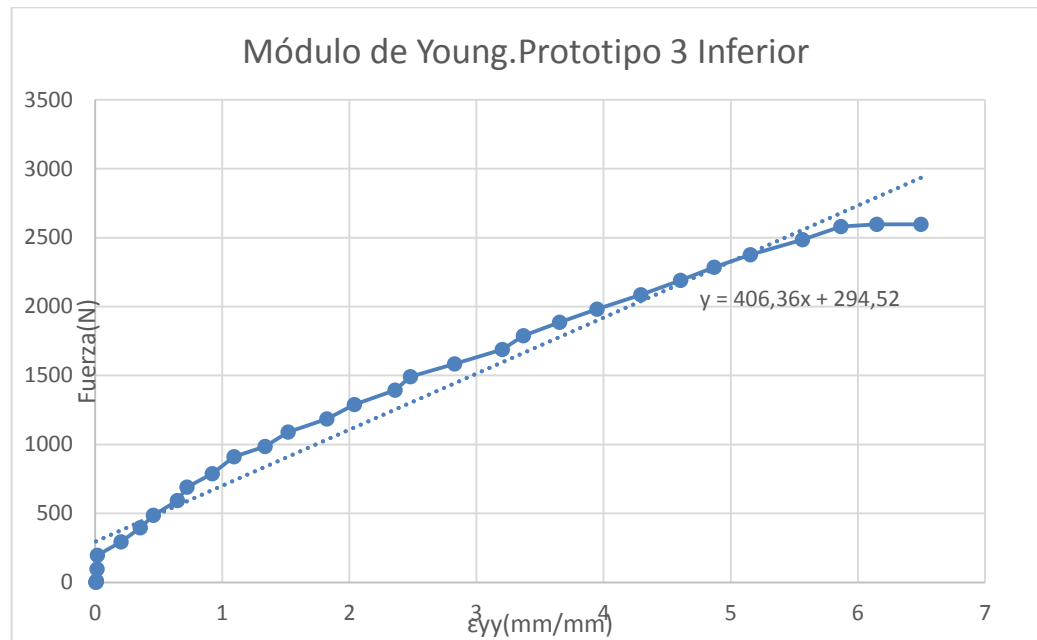
### 5.1.7 Segundo Ensayo en zona inferior

En esta zona inferior, los desplazamientos de los puntos seleccionados para cada una de las fotos, resultan;



Gráfica 11 Desplazamiento en cada Foto, zona Inferior del Ensayo 3

Con dichos datos obtenemos las deformaciones e introduciendo la fuerza a la que se producen cada una de las capturas:



Gráfica 12 Módulo de Young del Prototipo 3, zona Inferior

Para dicha gráfica miramos que se empiezan a producir desplazamientos perceptibles a partir de una carga determinada (aproximadamente 300 N) y entramos en la zona elástica lineal hasta un valor a partir del cual la relación entre la fuerza y el desplazamiento no es constante, perteneciente a la parte no lineal, esto se produce a una carga de aproximadamente 2500 N. Con una carga un poco mayor llegamos a la rotura frágil del material.

Midiendo el área y los datos necesarios, podemos calcular la rigidez local del punto deseado

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

Para el cálculo de la sección:

$$S = \pi * R_1^2 - \pi * R_2^2 = \pi * (R_1^2 - R_2^2) = \pi * ((33mm)^2 - (23mm)^2) = 1,759 * 10^{-3} m^2$$

Y la longitud de las probetas como hemos calculado antes resulta:

$$l_0 = 91,5 \text{ mm}$$

Sustituyendo todos los términos obtenemos, sabiendo la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 406,36x + 294,52$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{700,88}{\frac{1mm}{91,5mm} * 1,759 * 10^{-3} m^2} * 10^{-6} = 36,458 MPa$$

También podemos obtener el coeficiente de poisson del material, ya que con la Videocorrelación hemos también calculado los desplazamientos que se producen en la dirección x y estos son debidos a dicho fenómeno:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}} = \frac{1,660}{5,8661} = 0,2829$$

### 5.1.8 Conclusión Tercer Ensayo

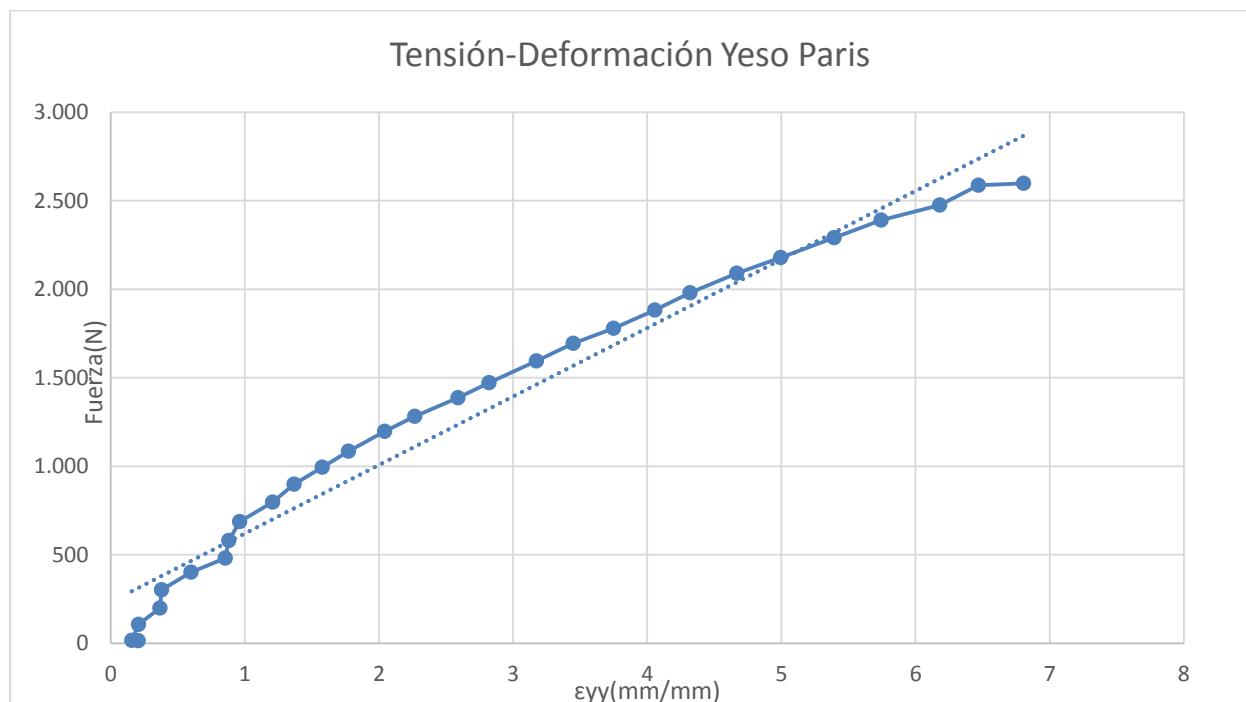
En este ensayo obtenemos unos valores de módulo de Young un poco menores a los anteriores, es lógico que nos salgan valores diferentes en ambos casos, debido a que la geometría es distinta producido por el uso de un proceso de fabricación manual, por ello también varía el valor de la sección en donde medimos para calcular la rigidez en cada uno de los tres puntos.

Por otro lado, podemos observar que concuerda con el apartado anterior que las mayores deformaciones se producen en la parte superior y van disminuyendo conforme vamos bajando en la probeta, esto es producido ya que como explicamos a la hora de definir el ensayo, este permanece fijado en su parte inferior siendo el pistón, el cual está colocado en la parte superior, el que realiza el recorrido, por ello la rigidez del ensayo es diferente en cada uno de los tres puntos medidos, ya que varía la deformación y por tanto el módulo de Young aumenta conforme vamos bajando en la probeta.

Calculando el valor del Módulo de Young tanto en la parte superior, media, como inferior, tampoco coinciden estos datos, esto es debido a la heterogeneidad de la escayola, por tanto queda demostrado que con el uso de la Videocorrelación, obtenemos distintos valores de la rigidez local de las diferentes zonas y así con todos ellos conseguir un valor parecido a la rigidez global del modelo, por tanto utilizando este proceso obtenemos una aproximación mucho más real que si no hubiéramos hecho uso de la Videocorrelación

## 6 DISEÑO E IMPRESIÓN POR FABRICACIÓN EN 3D DE MODELOS VERTICALES

En el apartado anterior hemos fabricado una serie de modelos de férula de yeso Paris, para después realizar un ensayo de carga axial a ellos y con los datos conseguidos de dicho ensayo poder definir las propiedades del material, con todos estos datos obtenemos una curva tensión-deformación genérica del material, en esta gráfica podemos advertir que el material sigue un comportamiento elástico lineal en el que se mantiene la relación lineal entre la carga y la deformación, hasta una carga a partir de la cual se produce una rotura frágil del material a una carga de 2.6 KN.



Gráfica 13 Tensión-Deformación Yeso-Paris

Con la definición de estos datos podemos proceder a diseñar nuestro modelo de férula de PLA, el cual lo fabricaremos mediante impresión 3D. En un primer momento haciendo uso del programa de diseño y cálculo de modelos, el software de CAD 3D, Autodesk inventor, definiremos nuestro prototipo asignándole las propiedades del material PLA, viendo así la geometría y espesor necesario para obtener una resistencia y comportamiento similar al obtenido mediante los ensayos.

Después de haber obtenido un primer modelo que cumpla los requisitos iremos evolucionando este para conseguir un prototipo con mejores funcionalidades tanto para el usuario como para el proceso de fabricación, procurando en todo momento que no se resientan las propiedades del modelo. También tendremos en cuenta la adaptabilidad del modelo a la forma que se quiere inmovilizar, la comodidad por parte del usuario y que cumpla los requisitos fundamentales expuestos al principio de nuestro proyecto, de forma que no solo puedan competir con las escayolas de Yeso Paris que se fabrican en la actualidad si no pensando en los defectos que tienen esta e intentando encontrar una mejor solución para ellos, todo ello teniendo en cuenta que debe ser un modelo sencillo y de un coste relativamente bajo para que pueda ser llevado a cabo en la realidad.

## 6.1 Prototipo PLA

Definimos el modelo con la misma longitud de 91,5 mm que las férulas de yesos fabricadas y mediante una serie de aplicaciones de carga en el programa de CAD 3D obtenemos el espesor necesario del material de PLA para que tenga la misma resistencia que el Yeso Paris, para el modelo asignaremos las propiedades del material expuestas en la ficha técnica del material [15]:

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES	MÉTODO DE TESTEO
<b>Propiedades generales</b>			
Densidad	1,24	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792
<b>Propiedades mecánicas</b>			
Módulo elástico en flexión	3600	MPa	ISO 178
Resistencia a la flexión	108	MPa	ISO 178
Dureza Sh D	85	Sh D	ASTM D2240
<b>Propiedades térmicas</b>			
Temperatura de flexión bajo carga	56	°C	ISO 75/2B
Temperatura de fusión	145-160	°C	ASTM D3418
Temperatura de transición vítrea	56-64	°C	ASTM D3418

Además de las propiedades descritas, hemos realizado los ensayos de tracción tanto de probetas inyectadas como de probetas impresas con nuestro PLA, para conocer las propiedades mecánicas de la pieza impresa final. En la siguiente tabla se recogen estos resultados:

Propiedades mecánicas	Probetas inyectadas	Probetas impresas*	Probetas impresas <sup>b</sup>	Unidades	Método de testeo
Resistencia a la rotura en tracción	52	50	39	MPa	ISO 527
Deformación a rotura en tracción	5	9	4	%	ISO 527
Módulo elástico en tracción	1320	1230	1120	MPa	ISO 527

Figura 23 Propiedades PLA

Con la adición de las propiedades expuestas en nuestro modelo y realizando un ensayo en el programa de CAD, usando el método de los elementos finitos aplicando las mismas condiciones de contorno y de cargas que en el ensayo en la MINI BIONIX II, obtenemos que necesitamos un espesor de 1 mm del material PLA para conseguir una resistencia igual a la de los prototipos de yeso Paris ensayados.

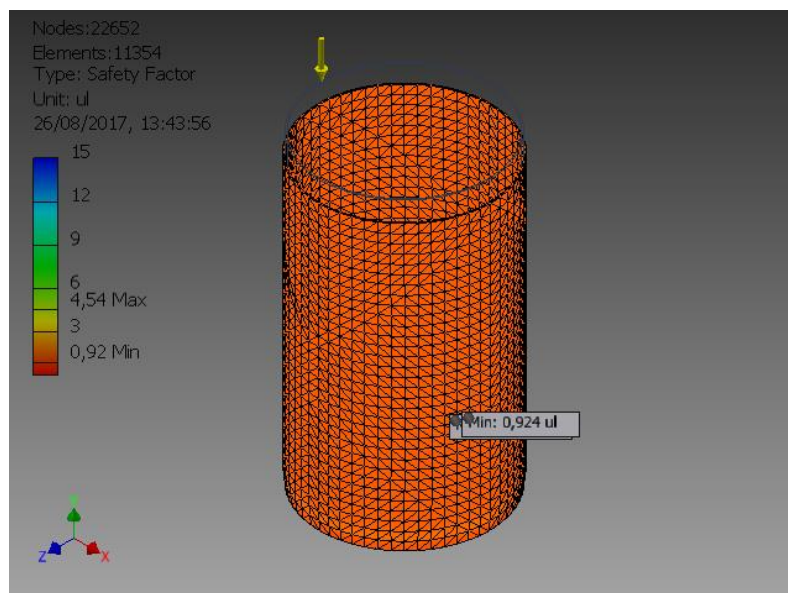


Figura 24 Modelo 1 PLA



Después de la obtención de este primer modelo, debemos tener en cuenta que uno de los principales defectos de las férulas de yeso reside en que no es lavable, no permite que transpire la piel y que el usuario pueda rascarse con comodidad, además de que para la revisión de la correcta reparación del hueso escayolado, es necesario romper la férula, lo cual es un proceso laborioso ya que es necesario realizarlo cada vez que se produzca la revisión, seguido de la posterior colocación de una nueva férula de yeso. Todo ello hace de las férulas de yeso sean un proceso mejorable, el cual mediante el uso del PLA como material vamos a intentar mitigar en la medida de lo posible.

En un primer momento, el problema de que el yeso no se pueda mojar debido a que perdería todas sus propiedades y dejaría de ser rígido, lo hemos solucionado con la elección del material, ya que el plástico PLA se puede lavar sin problemas lo cual facilita en gran medida al usuario de la férula.

### 6.1.1 Inserción Agujeros

Por otro lado la incomodidad que produce la férula de yeso al no ser transpirable se puede solucionar con la colocación de agujeros a lo largo del perímetro de la férula de yeso, estos pueden tener cualquier geometría pero decidimos que sean circulares para evitar aristas y obtener la mayor superficie abierta posible para la menor longitud. La inclusión de estos agujeros producirán una disminución de la resistencia del material por lo que en el siguiente ensayo con el programa de CAD 3D vamos a insertar dichos agujeros en el modelo y ver cómo afecta a las propiedades de la férula, también tenemos en cuenta que otras variables importantes resultaran el diámetro y número de perforaciones que realicemos.

Con todo ello vamos a realizar una serie de análisis variando tanto el número de agujeros, el diámetro de ellos y el porcentaje de material que eliminamos con dicha extracción. Para ver cómo afecta ello a la resistencia del material haremos tres ensayos en los que eliminaremos con los agujeros el 15,30 y 50% respectivamente del material, para ver cómo varía la resistencia del modelo en cada uno de ellos. Esto agujeros también son importantes ya que permiten al sanitario realizar inspecciones visuales.

#### 6.1.1.1 Eliminación 15% material

Para estos ensayos seguiremos utilizando la probeta anteriormente ensayada de 91,5 mm de longitud en la que realizaremos los ensayos pertinentes. Primero de todo debemos calcular cuánto material debemos quitar de la probeta para así despejar una variable y depender solo del diámetro y el número de las aberturas. Conociendo la masa de la férula por los datos añadidos en el programa de CAD 3D y la densidad del material, obtendríamos el volumen total:

$$\text{Masa Prototipo 1} = 8,637 \text{ g}$$

$$\text{Densidad} = 1,25 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Volumen} = \frac{\text{masa}}{\text{densidad}} = \frac{8,637}{1,25} = 6,9096 \text{ cm}^3$$

Con el conocimiento del volumen total, y eliminando el 15% del material, y por otro lado sabiendo que una de las ventajas de los agujeros es poder aliviar el picor si se produce irritación en la piel en algún lugar de la piel en contacto con la órtesis, por ello partimos de un diámetro inicial de 20 mm, para poder hacer uso de los dedos para atascarse en caso de irritación.

$$6,9096 * 0,15 = 1.03644 * 10^3 \text{ mm}^3 = \frac{\pi * D^2}{4} * N * e$$

Con:

$$D = \text{Diámetro de los agujeros} = 20\text{mm} \quad e = \text{Espesor de los agujeros} = 0,48\text{mm}$$

Y despejando:

$$N = 6,875 \text{ unidades}$$

Iterando hasta que salgan números enteros medibles, tomamos:

$$\text{Diámetro de los agujeros} = 21,5\text{mm} \quad \text{obteniendo } N = 5,96 \text{ Unidades}$$

A partir de la obtención de estos valores calculamos el área necesaria para que cumpla el requisito de resistencia. Este se obtiene para un espesor de 2,2 mm. En la captura siguiente podemos observar como para las condiciones anteriores se cumplen los factores de seguridad de carga establecidos antes de llegar a la zona plástica del material.

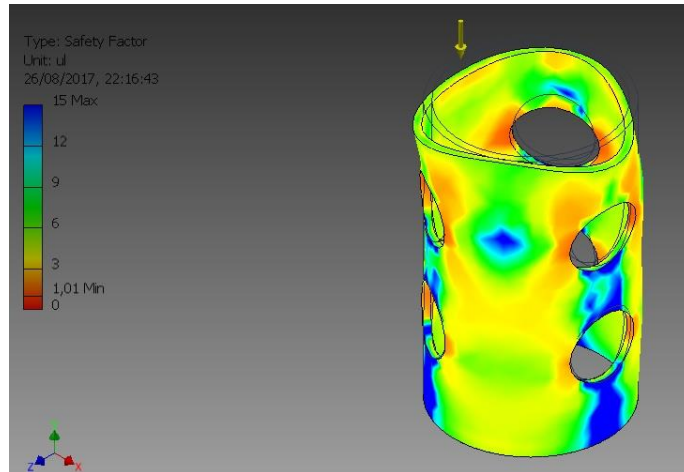


Figura 25 Prototipo 2 con 6 agujeros

A continuación vamos a probar utilizando un diámetro mayor en el que sea necesario un número menor de agujeros, para ello operando como en el caso anterior, iterando para obtener un número entero de agujeros.

$$6,9096 * 0,15 = 1.03644 * 10^3 \text{ mm}^3 = \frac{\pi * D^2}{4} * N * e$$

Con:

$$N = \text{Número de agujeros} = 3 \quad e = \text{Espesor de los agujeros} = 2,2 \text{ mm}$$

Y despejando:

$$D = 30 \text{ mm}$$

Usando un diámetro de 30mm y 3 agujeros, con ello, aplicando la carga y aumentando el espesor hasta que soporte la carga necesaria, cumpliéndose el factor de seguridad de carga, obtenemos:

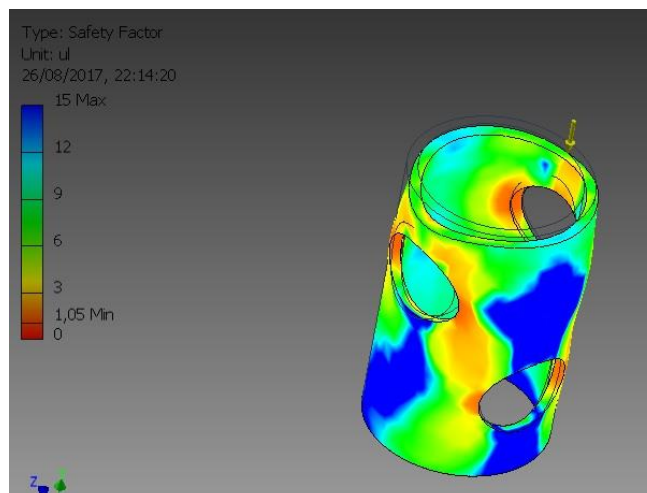
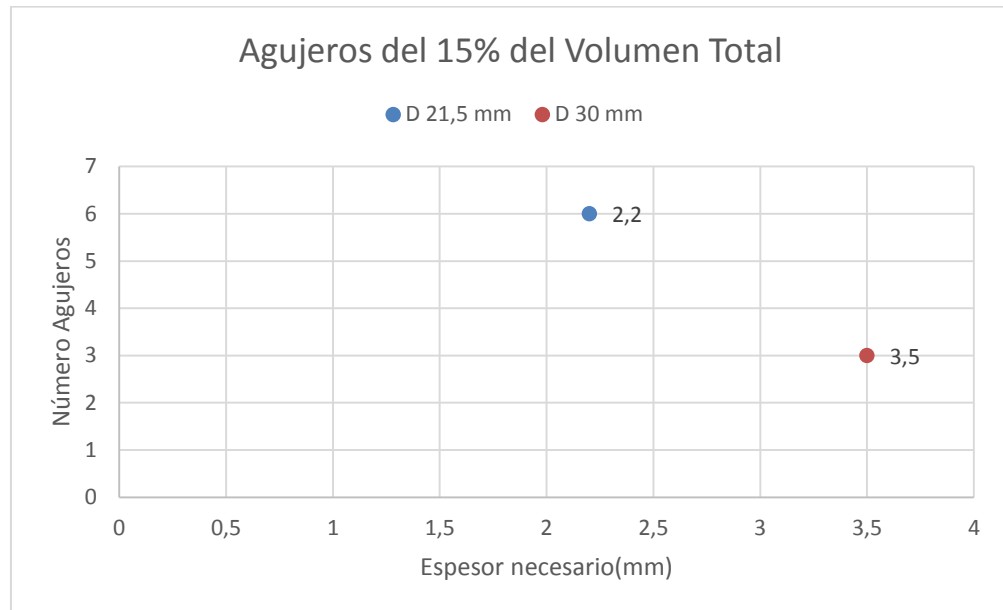


Figura 26 Prototipo 3 con 3 agujeros

En este caso es necesario un espesor de 3,5 mm.



Gráfica 14 Agujeros del 15% del Volumen Total

En la gráfica anterior podemos observar los diferentes espesores obtenidos para cada uno de los dos casos anteriores quitando en ambos el 15% del material y como en el caso en el que aumentamos el diámetro de los agujeros hasta 30 mm aumenta el espesor necesario para que cumpla con la rigidez deseada más del 60 %, desde 2,2 mm hasta 3,5 mm.

#### 6.1.1.2 Eliminación 30% material

En el siguiente subapartado vamos a aumentar aún más el porcentaje de material que quitamos hasta llegar a un valor del 30%, utilizando las propiedades del PLA y realizando las mismas operaciones que en el caso anterior:

$$\text{Masa Prototipo 3} = 8,637 \text{ g}$$

$$\text{Densidad} = 1,25 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Volumen} = \frac{\text{masa}}{\text{densidad}} = \frac{8,637}{1,25} = 6,9096 \text{ cm}^3$$

Suprimiendo en este caso el 30% y tomando un diámetro tal que el número de agujeros obtenidos sea entero:

$$6,9096 * 0,3 = 2,07288 * 10^3 \text{ mm}^3 = \frac{\pi * D^2}{4} * N * e$$

Con:

$$D = \text{Diámetro de los agujeros} = 21,5 \text{ mm} \quad e = \text{Espesor de los agujeros} = 0,48 \text{ mm}$$

Y despejando:

$$N = 11,9 \text{ unidades}$$

Aplicando una carga de compresión de 2700 N en la cara superior de la férula y suponiendo la parte inferior fija, el espesor necesario para cumplir los criterios de seguridad frente a la carga son:

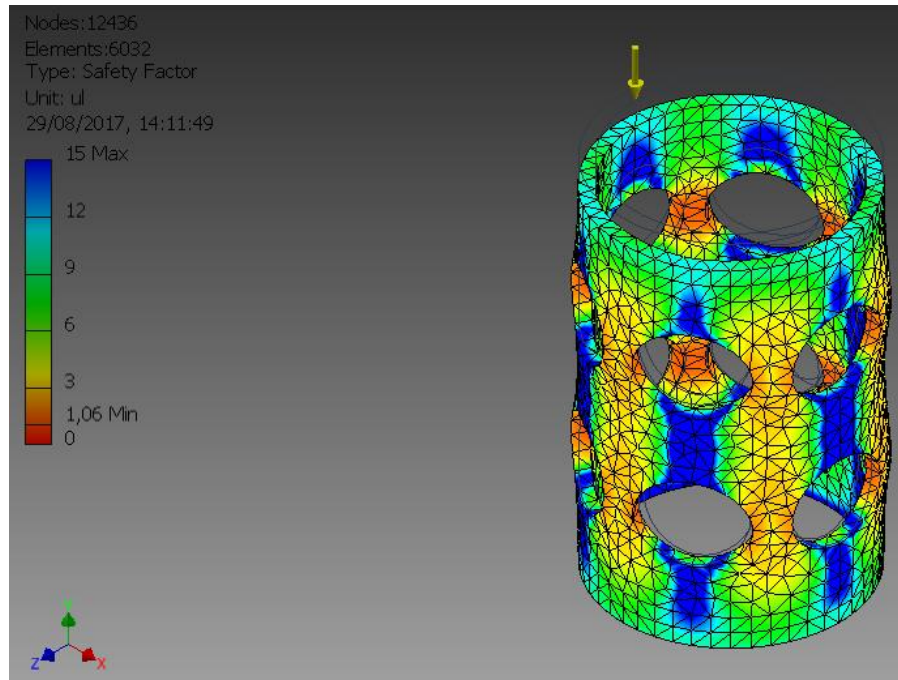


Figura 27 Prototipo 4 con 12 agujeros

Para este caso es necesario un espesor de 3,2 mm.

Usando un diámetro mayor y un menor número de agujeros

$$6,9096 * 0,30 = 2,07286 * 10^3 \text{ mm}^3 = \frac{\pi * D^2}{4} * N * e$$

Con:

$$N = \text{Número de agujeros} = 4 \quad e = \text{Espesor de los agujeros} = 0,48 \text{ mm}$$

Y despejando:

$$D = 37 \text{ mm}$$

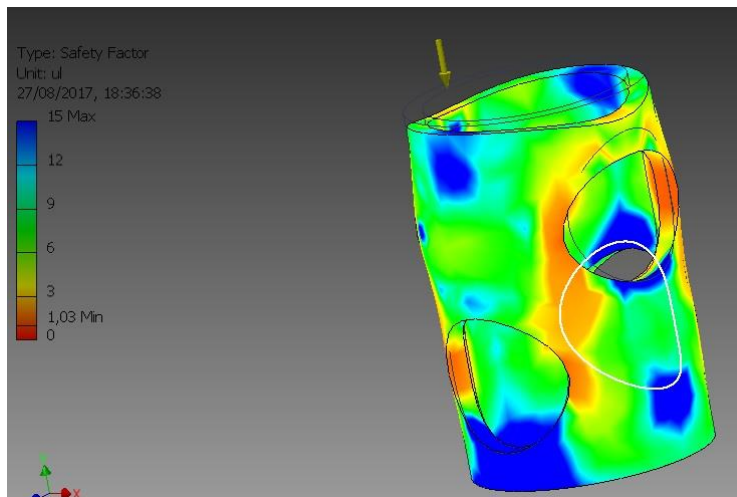
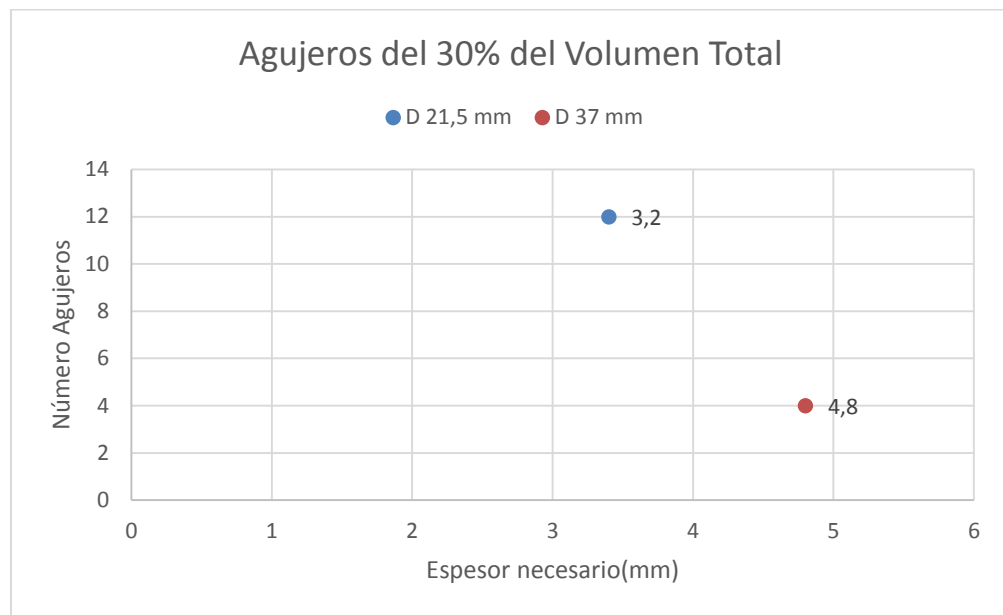


Figura 28 Prototipo 5 con 4 agujeros

En este caso es necesario un espesor de 4,8 mm.



Gráfica 15 Agujeros del 30% del Volumen Total

Para este caso observamos que aumenta bastante el espesor necesario respecto al caso anterior sin embargo, no es tanta la diferencia entre ambos casos en los que quitamos el 30% del total a pesar de que utilizamos agujeros de casi el doble de diámetro solo necesitamos un 30% más de espesor para el prototipo, esto es debido a la disposición de los agujeros los cuales están girados 90° los dos superiores respecto a los inferiores y esto provoca que exista una mayor cantidad de material entre los agujeros y por ende que no se resientan tanto las propiedades del material

### 6.1.1.3 Eliminación 50% material

Por último caso vamos a eliminar el 50% del material de la férula, buscando así ser más transpirable y cómodo para el usuario. Buscamos en este caso un número de agujeros y dimensión acorde procurando disminuir lo menos posible la rigidez de la férula.

$$\text{Masa Prototipo 3} = 8,637 \text{ g}$$

$$\text{Densidad} = 1,25 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Volumen} = \frac{\text{masa}}{\text{densidad}} = \frac{8,637}{1,25} = 6,9096 \text{ cm}^3$$

En este caso quitamos el 50% y tomando un número de agujeros entero:

$$6,9096 * 0,5 = 3,4548 * 10^3 \text{ mm}^3 = \frac{\pi * D^2}{4} * N * e$$

Con:

$$D = \text{Diámetro de los agujeros} = 22,5 \text{ mm} \quad e = \text{Espesor de los agujeros} = 0,48 \text{ mm}$$

Y despejando:

$$N = 18 \text{ unidades}$$

Aplicando una carga de compresión de 2700 N en la cara superior de la férula y suponiendo la parte inferior fija

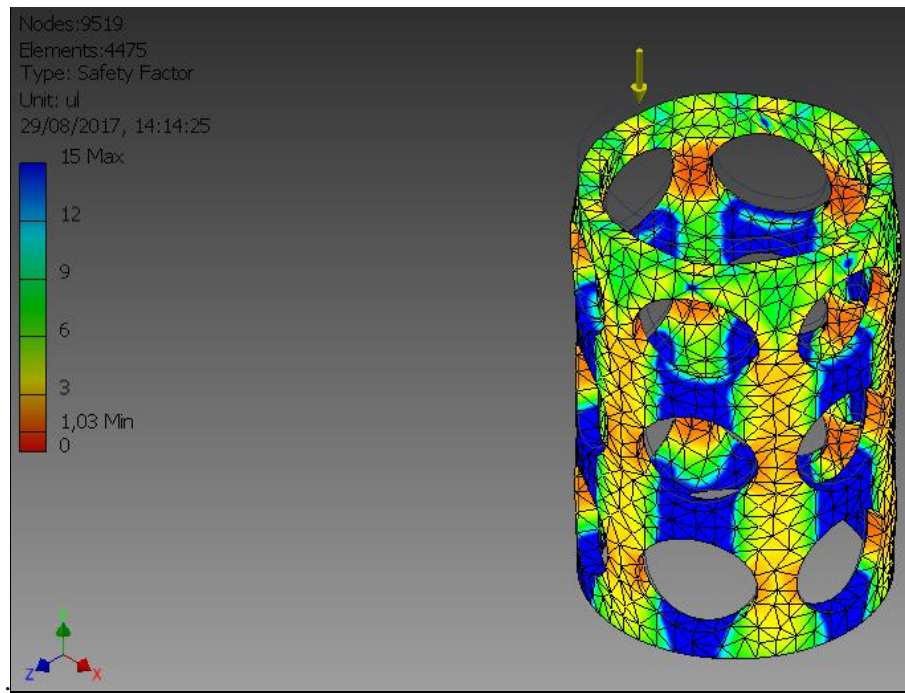
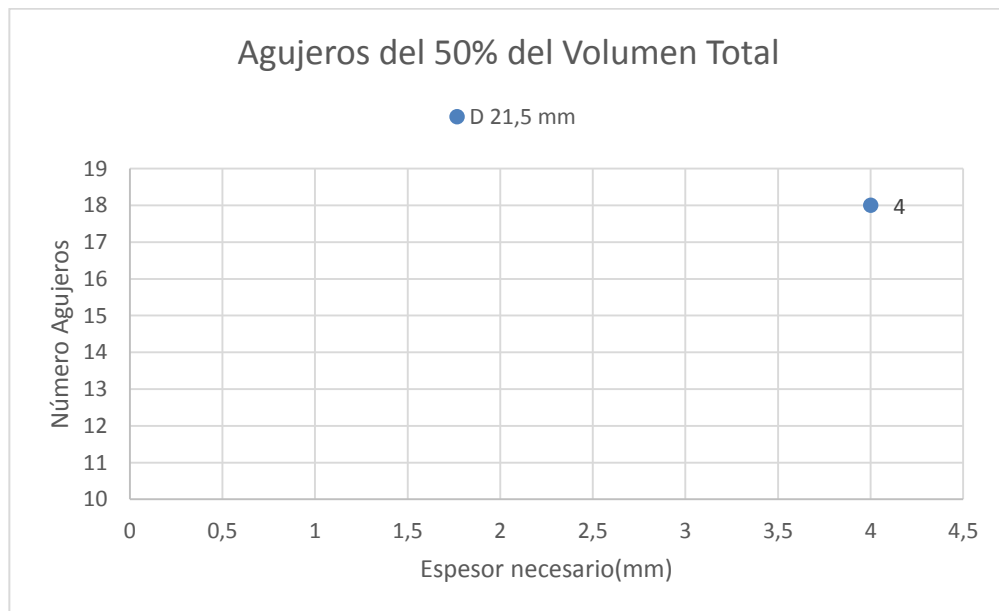


Figura 29 Prototipo 6,12 agujeros

En este último caso hemos necesitado 4mm de espesor para que la férula de PLA con la geometría dada aguante las cargas aplicadas similares a las ensayadas con el yeso Paris



Gráfica 16 Agujeros del 50% del Volumen Total

No aumentamos en este caso el diámetro de agujeros, ya que obtenemos un espesor mayor de 5mm y colocándonos los modelos de férula de PLA impresos, consideramos que a partir de dicho espesor, 5mm, este puede empezar a ser molesto e incómodo para el usuario, interfiriendo con alguna prenda que lleve encima de la férula que contiene la articulación del brazo inmovilizado o para el movimiento habitual de este.

### 6.1.2 Porcentaje de Relleno de PLA

Para el estudio de los casos anteriores hemos supuesto que el relleno del material es del 100%, ya que desconocemos la variación de las propiedades del material que se producen conforme vamos reduciendo dicho porcentaje de relleno.

Para conocer como varía la resistencia del PLA según la disminución del porcentaje de relleno la altura de capa, vamos a hacer uso de unas investigaciones realizadas por la alumna Alicia Pais en 2015 en el departamento de mecánica, en el que se ensayaron una serie de probetas a compresión imprimidas a diferentes alturas de capa y porcentajes de rellenos, en este caso nos fijamos en los ensayos de PLA, a fin de calcular la variación de las propiedades que se producen para las diferentes problemas para distintos valores de ambas características. La aplicación de la carga de compresión se realizó con el equipo MTS MINIBIONIX II del departamento de Mecánica de la Escuela Técnica de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. En estos ensayos se han llevado aplicaciones de carga controlando el desplazamiento de la probeta, fijándolo en una velocidad de 0.01 mm/s con un máximo de 2 milímetros. Para una mayor precisión a la hora del cálculo de las deformadas se ha hecho uso de la Videocorrelación con ayuda de una cámara y los programas Vic-Snap y Vic-2D 2009.



Figura 30 Probeta Ensayo de PLA

Se colocó un apoyo para el disco de carga. Además, dicho apoyo posee debajo una rótula lo que permite mejorar la adquisición de los datos. Así, aunque las dos bases (inferior y superior) de las probetas cilíndricas no sean paralelas, se evitan concentradores de tensiones. También se pintaron las probetas mediante sprays de pintura negra para poder conocer los desplazamientos de estos durante la aplicación de la carga.



Figura 31 Ensayo de la Probeta de PLA

Con todo ello se realizaron ensayos en 5 probetas diferentes de cada uno de los porcentajes de relleno expuestos (30%,60% y 100%)

PLA [MPa]		30 %	60 %	100 %
0.1	1	885.9	1744.0	3168.6
	2	799.5	1535.1	3336.6
	3	824.3	1477.8	3511.1
	4	812.3	1582.8	2795.3
	5	953.9	1607.3	3301.1
0.2	1	948.7	1335.6	3796.2
	2	818.1	1190.3	3475.2
	3	845.3	1354.5	3407.7
	4	754.6	1190.4	3284.9
	5	921.8	1380.2	3265.0
0.3	1	837.2	1534.1	2973.0
	2	916.4	1719.7	2901.6
	3	776.9	1461.0	3202.1
	4	880.1	1386.7	2904.6
	5	844.4	1407.7	2740.7

Tabla 3 Variación del Módulo de Young Respecto al porcentaje de relleno

### 6.1.3 Modelado Férula

Como hemos expuesto con anterioridad, uno de los grandes problemas de las férulas de yeso reside en la adaptabilidad a la articulación a reparar, en los modelos de férula de yeso, se acoplan fácilmente y de una manera rápida ya que este proceso comienza mediante la inserción de vendas mojadas de Yeso Paris a lo largo del cuerpo que se quiere reparar de forma que este se acopla completamente, el problema en estos casos reside en que la férula de yeso se seca muy rápidamente y se convierte en un cuerpo muy rígido, de forma que una vez que se ha colocado está en el molde deseado, si en la articulación aplicada se produce una variación de la dimensión del cuerpo (disminución de la inflamación, recolocación del hueso) esta no se acomoda de ninguna manera y puede ser muy incómodo para el usuario además de incluso poder provocar una incorrecta reparación de la extremidad.

Por otro lado, ya hoy en día existen los primeros modelos de férula de PLA, los cuales mediante un escáner en 3D de la parte que se ha producido la fisuración pueden sacar un molde de la férula de yeso igual de fiable que con la utilización del Yeso Paris y además mediante una serie de algoritmos se puede calcular la posible inflamación y hasta los cambios de medidas que ocurren en el brazo cuando, por ejemplo, se flexionan los dedos. Este cálculo es necesario para que la férula no quede muy prieta y produzca edemas. [16]

Estos moldes fabricados mediante impresión 3D están casi en su totalidad divididos en dos cuerpos de forma que se puedan acoplar fácilmente a la extremidad y una vez colocadas mediante elementos de unión fijar ambos cuerpos, mediante la búsqueda y lectura de diferentes estudios, nos damos cuenta de que estas uniones pueden provocar errores y faltas de compatibilidad con el cuerpo que se desea inmovilizar, ya que estas uniones están hechas de diferente material al PLA y tienen por tanto diferentes propiedades, además se fijan en varias posiciones provocando que el comportamiento del material PLA sea diferente según este fijo o no por estos materiales, además provocan una incomodidad al usuario, ya que resaltan en demasía respecto al cuerpo uniforme de la férula y que además se pueden aflojar y no ajustarse totalmente. [17]





Figura 32 Férulas 3D de PLA actuales en el mercado

Además la resistencia del PLA se ve resentida ya que no forma un área cerrada si no dos cuerpos separados por lo que el espesor que necesitamos es mayor que si fuera una única pieza.

Por todo ello pensamos en este proyecto en otro diseño para conseguir la correcta colocación de la férula impresa en 3D, utilizando otros métodos de unión ayudándonos de las propiedades del material, del cual sabemos que empieza a ser un material maleable a una temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ , por ello nuestra intención, es realizar el prototipo de la órtesis de PLA imprimido en 3D de una sola pieza vertical y después con ayuda de un secador industrial adaptarlo al molde utilizado y ver la funcionalidad y utilidad de esta. [18]

Como vamos a aplicar calor para poder cerrar la férula, para un primer caso tomamos para el prototipo como extremidad a consolidar un bolígrafo, lo más grueso posible para que el diámetro de la férula sea lo más grande y así nos permita un mayor movimiento a la hora de aplicar el calor y que se cierre.

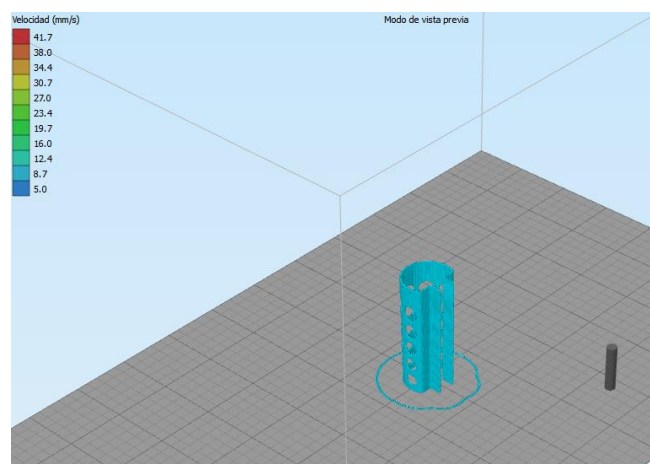


Figura 33 Modelo en simplify3D cilindro abierto

Una vez imprimido colocamos la férula en el cilindro elegido, al cual le hemos dado una holgura suficiente para que permita cerrarse alrededor del bolígrafo y después apliquemos el calor necesario para que se deforme con la ayuda de un secador industrial.



Figura 34 Férula 3D de PLA en Rotulador

Colocada una vez el prototipo en el rotulador aplicamos calor quedando está adherida a la extremidad que queríamos inmovilizar, en este caso el rotulador:



Figura 35 Férula 3D de PLA adherida en Rotulador

Con el prototipo anterior podemos comprobar que ha resultado una forma útil de colocar la férula, además en este caso está unida a lo largo de todo el perfil por lo que se mantiene bastante bien las propiedades del material, el único punto negativo reside que tanto a la hora de colocarla como de extraerla habría que utilizar un secador industrial que haría que esa zona de la órtesis cercana a la extremidad estuviera a 60°C por lo que lo haría más farragoso tanto a la hora de colocarlo como de quitarlo y además sería necesario colocar algún tipo de gasa o elemento protector entre el material y la férula de forma que disipara el calor entre ambos elementos de forma que no se produzcan quemaduras en la zona de la piel en contacto con la férula.

A lo largo de los siguientes prototipos iremos cambiando la forma e intentando disipar los inconvenientes de esta solución. El siguiente paso será adaptar la geometría de la órtesis a las dimensiones de la extremidad que realmente es escayolada, tomando una serie de medidas en un brazo, obtenemos una forma cónica, de forma que adaptando nuestro caso anterior a este.

Para este modelo la geometría de la férula será cónica por lo que los agujeros colocados a lo largo de la férula decidimos que vayan variando de diámetro a lo largo del modelo, de forma que estos agujeros aumenten como lo haga el área de esta a cada altura, de forma que la distancia entre ellos y las propiedades del PLA permanezcan lo más homogénea posible a lo largo del modelo:

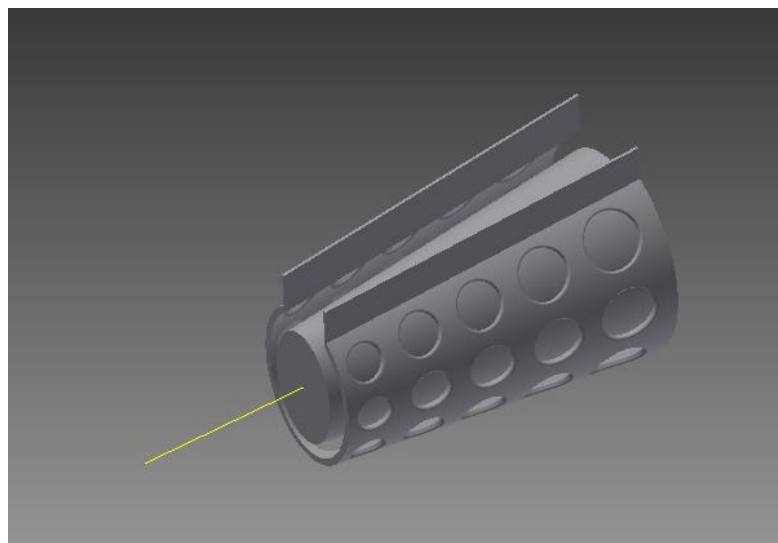


Figura 36 Férula cónica con extremidad

Una vez definido un primer modelo de la férula del brazo, tenemos que tener en cuenta que la geometría en la zona de la muñeca debería ser diferente y además tendríamos que dejar huecos para los dedos y desplazamiento de estos para que impidan en el menor grado de lo posible los movimientos rutinarios de los usuarios, por ello para esta parte nos basamos en los modelos ya realizados, para ver la compatibilidad y comodidad por parte del usuario vamos a definir varios modelos básicos e imprimirlos con ayuda de la impresora 3D para ver así su adaptabilidad a la extremidad.

En un primer prototipo optamos por una parte con agujeros más finos para la zona de la muñeca y los brazos buscando que el espesor sea lo menor posible para así facilitar en la mayor medida de lo posible la facilidad de movimiento en la articulación

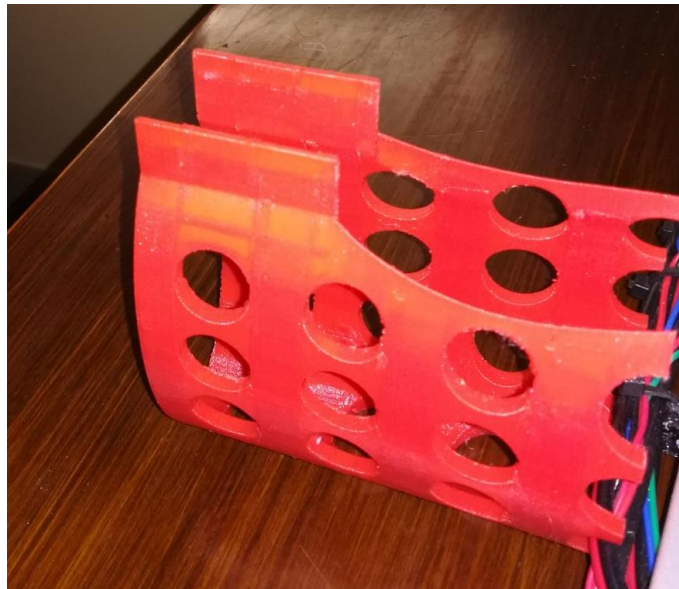


Figura 37 Prototipo Muñeca 1

El problema de este modelo reside en que al probarlo, nos damos cuenta que los agujeros pueden producir molestias y además hemos colocado perforaciones en la parte inferior de forma que al apoyar el brazo en la órtesis se notan los agujeros y resulta incómodo.

Por ello decimos realizar un segundo modelo en que los agujeros sean menores, pero una mayor cantidad de ellos, además suprimimos los de parte inferior e intentamos que las curvas sean más suaves en los lugares donde vaya a tener contacto con la piel, también variamos el diámetro de los agujeros en función del área a lo largo de la longitud de la pieza.



Figura 38 Prototipo Muñeca 2

## 6.2 Diseño Férula

Con ello una vez definido tanto la parte del brazo como la de la muñeca obtenemos un primer modelo del brazo, la férula de PLA completa resulta:

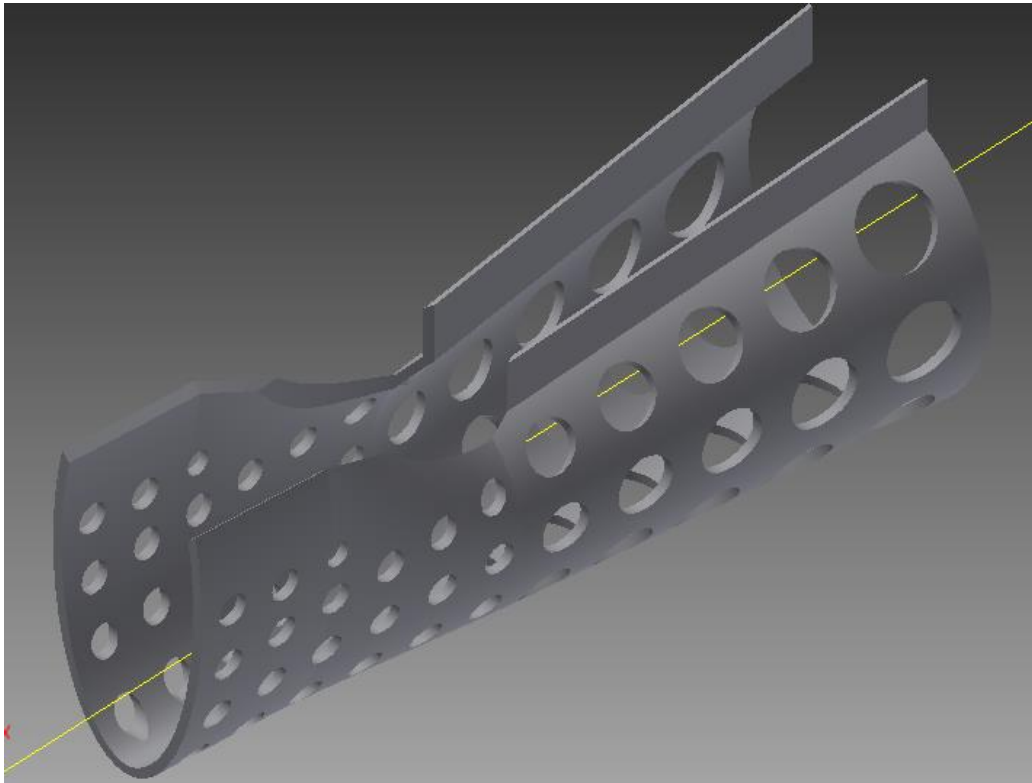


Figura 39 Prototipo Férula Completo

Este es el diseño de prototipo del que vamos a partir, una vez conocido este y con los ensayos anteriores realizados tanto de números de agujeros (favoreciendo estética y comodidad) y el espesor asociado necesario para que tenga la rigidez deseada así como el porcentaje de relleno para nuestra férula.

### 6.2.1 Diámetro Férula

En un primer momento, debemos de definir los diámetros de la órtesis a lo largo de la longitud del brazo, para ello tenemos que tener en cuenta tanto la longitud del brazo a medir como el movimiento que va a realizar la férula a la hora de cerrarse alrededor del brazo.

Por ello vamos a hacer una serie de modelos de ambos extremos, los cuales imprimiremos los modelos 3D.

#### 6.2.1.1 Diámetro Superior

Corresponde a la zona localizada en la parte del brazo más cercana al hombro, tomando como medida el diámetro de la extremidad a la que le vamos a colocar la órtesis de PLA, debido a la forma circular de la parte del brazo más cercana tomamos un círculo con diámetro 85mm (5 milímetros más que el medido en el brazo) y colocamos en él una apertura de 20 mm con una altura de 25mm para realizar el cerramiento de la férula mediante la aplicación de calor en la zona de la apertura, de forma que esta al llegar a una temperatura de 60°C estas partes se fundan y al retirar el aplicador de calor quede está completamente cerrada. A continuación ajustando las propiedades de la impresión conseguimos: [19]



Figura 40 Diámetro Mayor Férula

### 6.2.1.2 Diámetro Inferior

Para este caso operamos igual que en el caso anterior midiendo el diámetro necesario y dejando una holgura suficiente para poder proceder después al cerrar el contorno de la férula. En este caso tomamos como elemento de contorno una elipse con el tamaño adecuado después de tomar las medidas correspondientes en la extremidad en la que irá colocada, resultando



Figura 41 Diámetro Inferior Férula

## 6.2.2 Espesor Férula

Una vez obtenido los diámetros extremos y la geometría de la órtesis hasta la muñeca procedemos a diseñar la férula teniendo en cuenta las geometrías anteriores y las imposiciones de diseño.

Para un primer caso, tomamos la opción de reducir un 30% el volumen total de la férula con la inserción de los agujeros. Quedando el modelo de la férula del brazo:

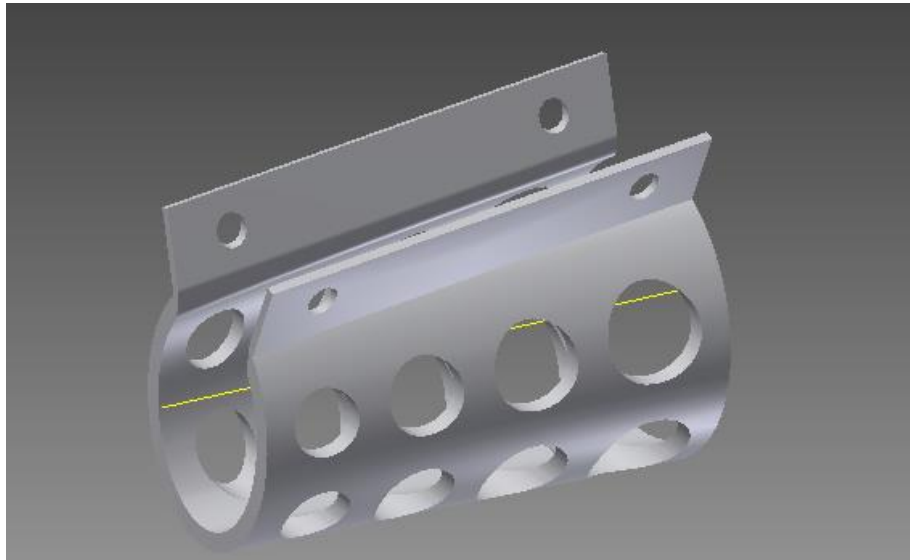


Figura 42 Modelo Férula PLA

Los agujeros superiores corresponden a perforaciones que vamos a realizar durante la impresión, cuya finalidad es colocar unos tornillos a través de ella de forma que ayude a la correcta colocación y sujeción de la férula, para dicho fin usaremos tornillos impresos también con la impresora 3D de forma que no exista interacción entre diferentes materiales lo que pueda provocar un distinto desgaste entre ambos además de unas propiedades diferentes, las cuales podrían provocar la rotura de la férula. Además de que dichos tornillos queremos evitar que sean de metal, para en el caso de que sea necesario una radiografía del hueso con la escayola, esta parte no interfiera en los resultados.

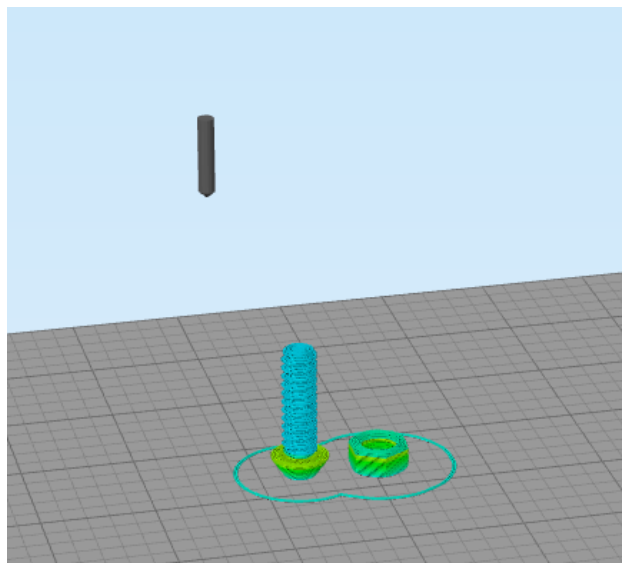


Figura 43 Tornillos de Sujeción Órtesis

Para el cálculo del espesor necesario de la férula para que tenga la resistencia adecuada con los valores que hemos ensayado con las férulas de Yeso París, tomamos como condiciones de contorno, las mismas que en el ensayo realizado, es decir la parte inferior fija y carga axial en la parte superior con las propiedades de PLA expuestas por el fabricante, cumpliéndose las condiciones de carga para un factor de seguridad:

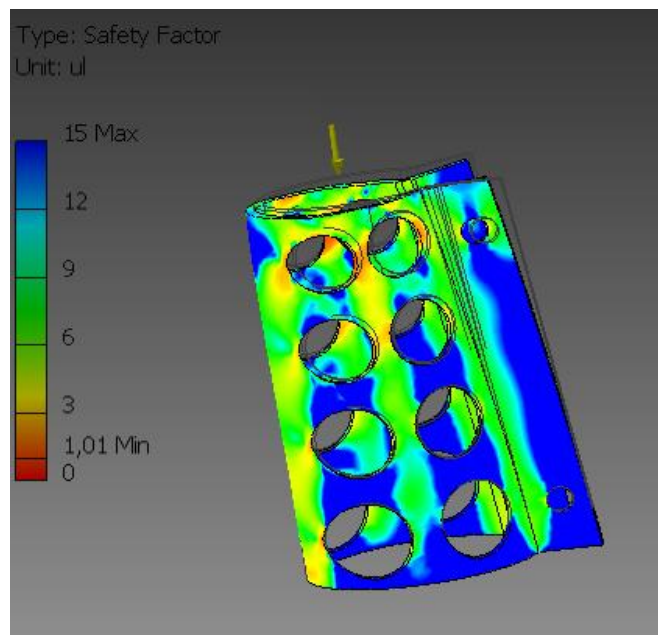


Figura 44 Ensayo Espesor Férula PLA 100%

Debemos de tener en cuenta que para la correcta impresión del modelo, el espesor de la férula debe de ser proporcional al diámetro de la boquilla del extrusor de la impresora 3D, en este caso resulta un espesor de 3,4mm y el diámetro del extrusor 0,4 mm. Dicho modelo calculado para un relleno del 100% del material.

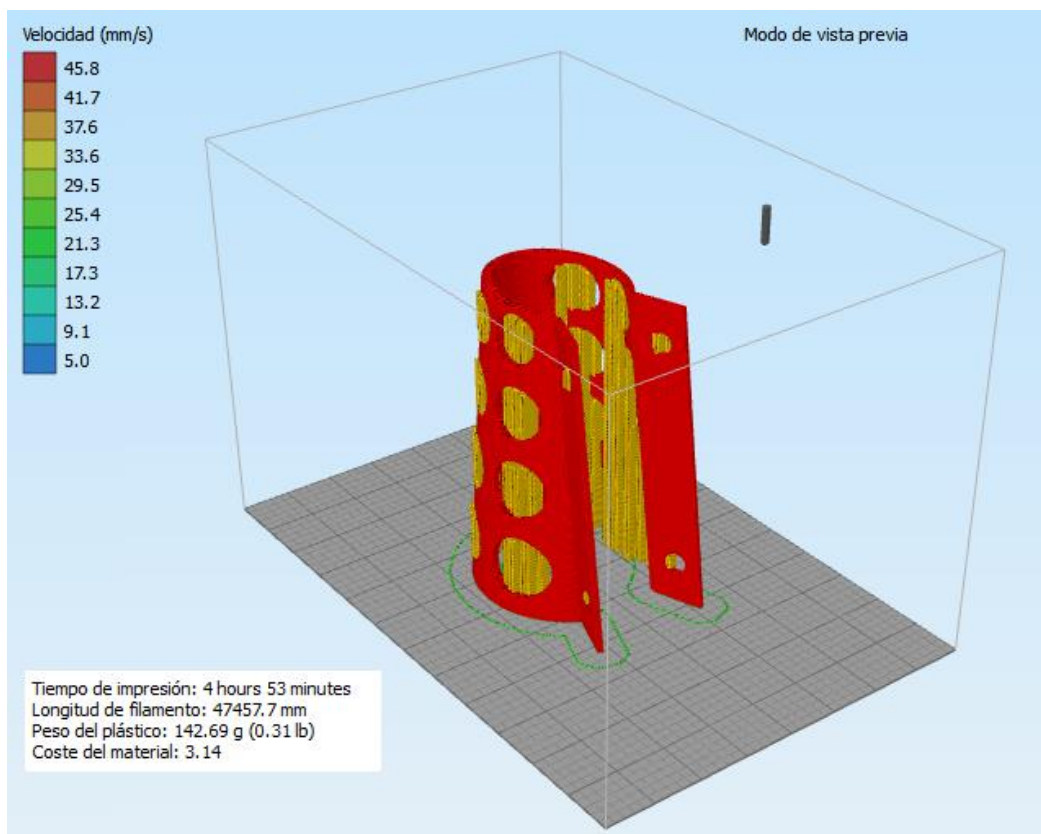


Figura 45 Configuración Impresión 3D de Férula

Para este caso hemos alineado el modelo de la forma más adecuada para su correcta impresión, hemos utilizado una configuración rápida de impresión para obtener un prototipo rápido, sin usar soportes, los cuales nos permiten obtener un adecuado resultado de la geometría y utilizando una altura de capa de 0,4mm. Quedando una vez finalizada la impresión de la pieza:

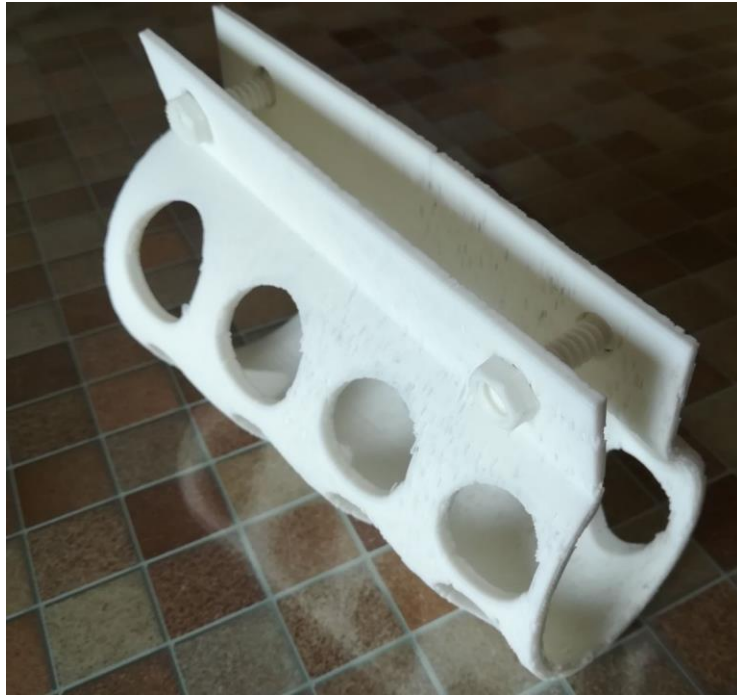


Figura 46 Órtesis PLA Imprimida en 3D

Después de estudiar el modelo imprimido nos damos cuenta que hemos dejado demasiada holgura en la apertura, de forma que la férula tiene que hacer un recorrido grande para mitigar los 40 mm de desplazamiento que tendría que hacer hasta el cierre, por ello reducimos esta distancia, después colocamos más cerca los agujeros de los tornillos entre sí para que no exista tanta distancia entre ellos y además reducimos la longitud y el ángulo de la apertura, dándole una geometría diferente para que resulte menos molesto para el usuario, una vez cerrada tenga las caras que se tocan estén paralelas y además produciendo un ahorro de material y coste. También redondeamos las esquinas para no obtener un concentrador de tensiones en dichos puntos y que la impresión en ellos sea más fácil, todo ello provoca que el diámetro de las caras extremas sean menores, quedando por tanto el modelo:

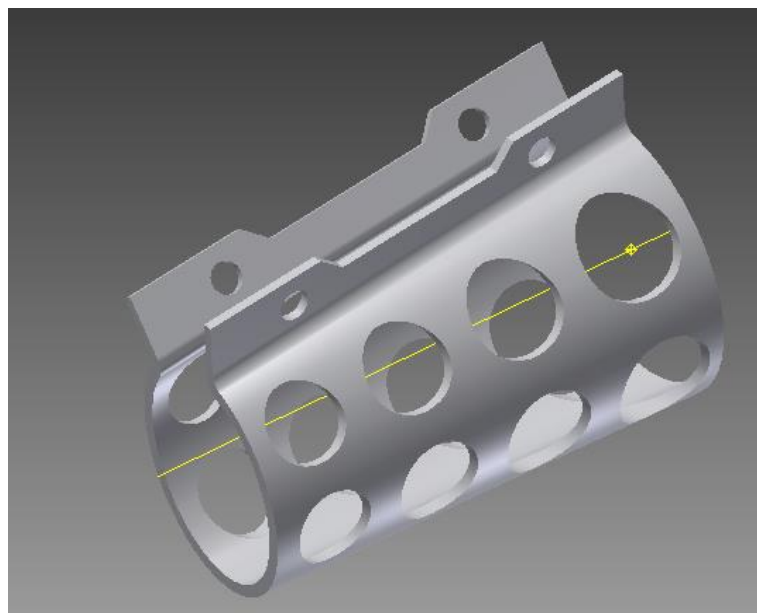


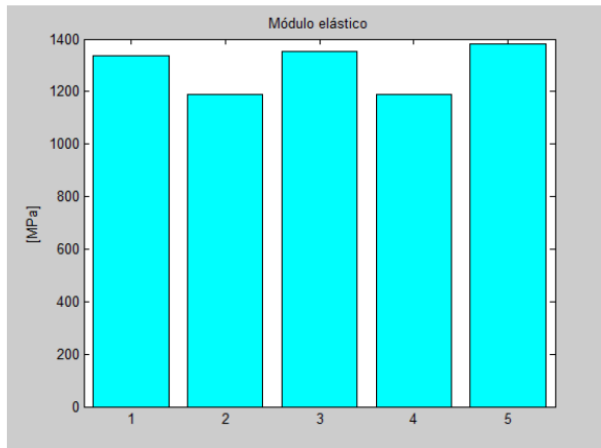
Figura 47 Modelo Férula Mejorado



En este modelo con un porcentaje de relleno del 100% es necesario un espesor de 3mm. Recalculando para los distintos porcentajes de relleno con los estudios de las variaciones de las propiedades de resistencia del material realizados por la alumna Alicia Pais durante 2015 en el departamento.

### 6.2.2.1 Relleno 60%

Utilizando las propiedades del módulo de Young para este porcentaje obtenido mediante los datos conseguidos por los ensayos realizados para una altura de capa de 0,2mm:



modulo

1.0e+03 \*

1.3356 1.1903 1.3545 1.1904 1.3802

El valor medio del módulo de Young es:

1.2902e+03

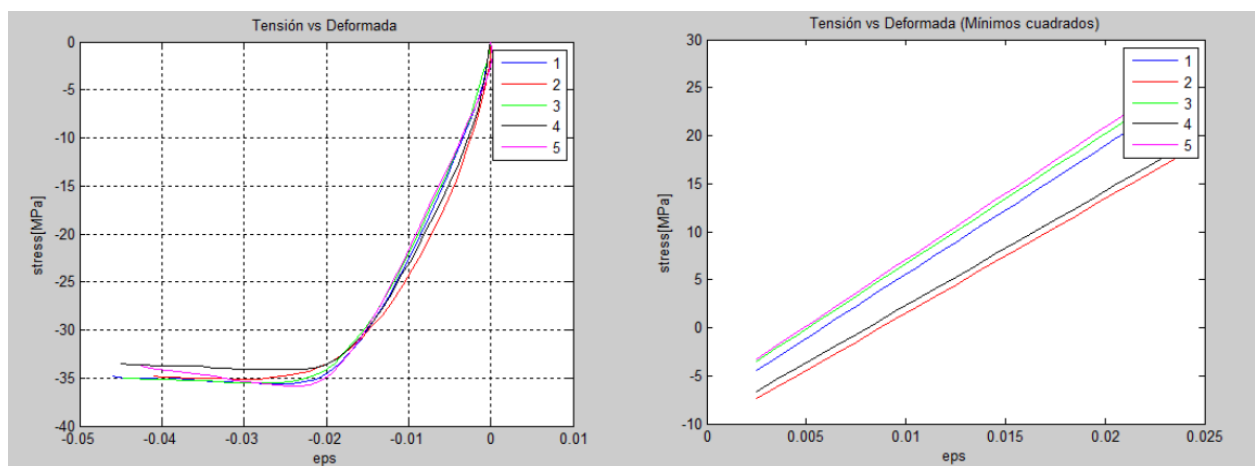
La desviación típica adquiere pues el valor de:

92.5021

El ensayo tiene una relación desviación/media por debajo del 10%. Muy aceptable

Gráfica 17 Módulo de Young Relleno 60%

Y un límite de rotura para este relleno correspondiente



Gráfica 18 Curva Tensión-Deformación PLA Relleno 60%

Tomamos como límite de rotura 35 MPa, ya que observando la gráfica corresponde al valor a partir del cual sin aumentar la carga se producen grandes desplazamientos en la probeta ensayada. Este valor corresponde al valor de la carga de rotura si esta se aplica de forma longitudinal a las fibras de PLA impresas en caso de que la carga sea transversal a la fibra este valor disminuirá hasta 27,3 MPa.

Con las mismas condiciones de contorno y de carga que el modelo anterior, el factor de seguridad obtenido para este modelo con la carga aplicada resulta:

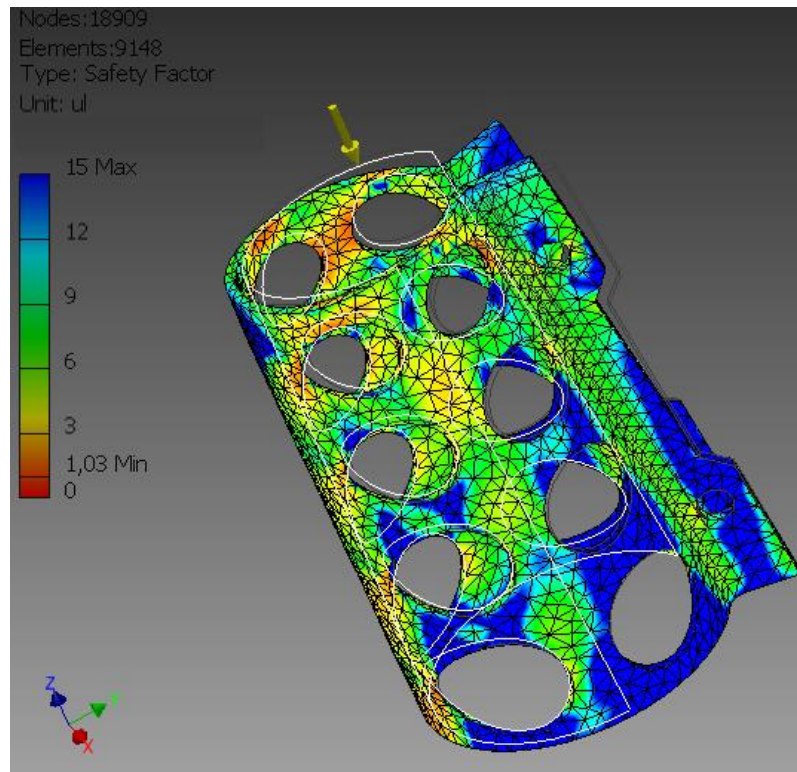
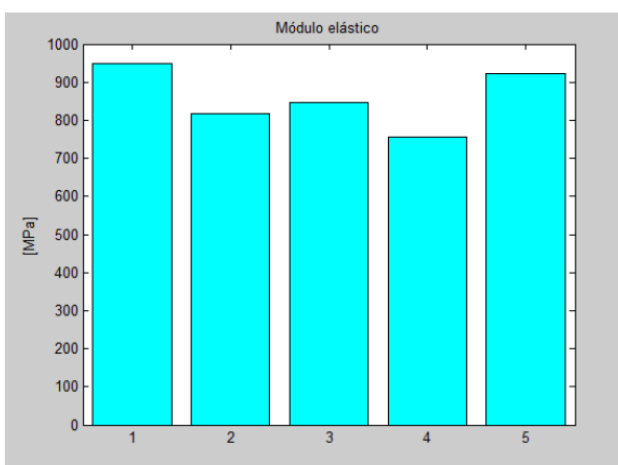


Figura 48 Ensayo Espesor Férula PLA 60%

En este caso el espesor necesario para cumplir con los requisitos de resistencia estipulados resulta de un valor de 3,6mm

**6.2.2.2 Relleno 30%**

Usando el valor de módulo de Young del valor medio de los cinco ensayos realizados para una altura de capa de 0,2 mm, es:



modulo  
948.7068 818.0984 845.3152 754.5720 921.7701

El valor medio del módulo de Young es:  
857.6925

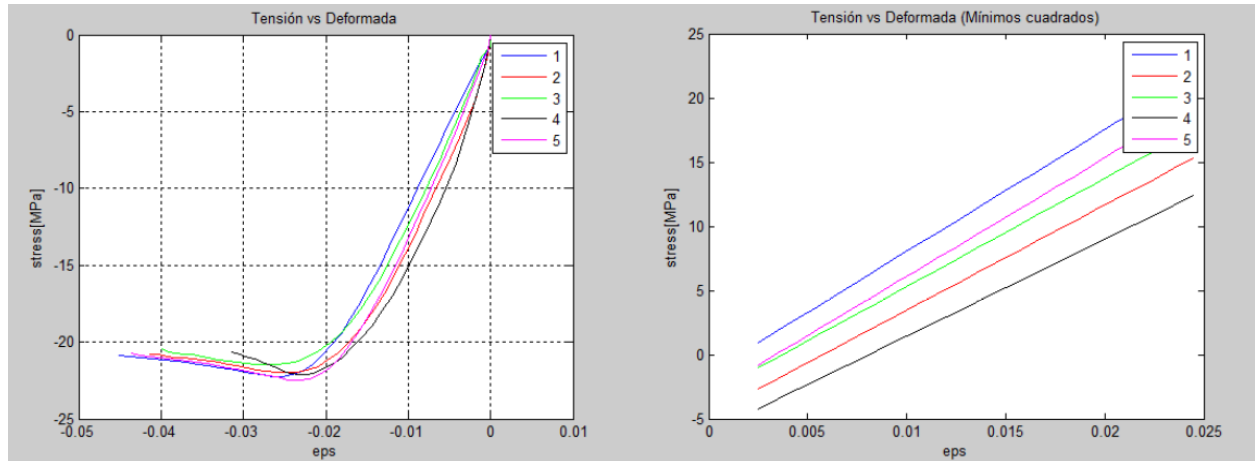
La desviación típica adquiere pues el valor de:  
78.6516

El ensayo tiene una relación desviación/media por debajo del 10%. Muy aceptable

Gráfica 19 Módulo de Young Relleno 30%

Tomamos el valor promedio obteniendo un valor en el ensayo de desviación muy por debajo del 10%, con los valores obtenidos de la realización de los cinco ensayos.

El límite de rotura asociado para un relleno del 30 %:



Gráfica 20 Curva Tensión-Deformación PLA Relleno 60%

El valor del límite de rotura aplicando la carga de forma longitudinal, en dirección paralela a las capas, tomando como ejemplo los valores dados por el fabricante y comparando ambos resultados según el diferente porcentaje de rellenos, obtenemos que el límite de rotura en dirección perpendicular a las capas resulta 17,55 MPa.

Con estos datos realizamos el ensayo en el programa de CAD 3D, usando como condiciones para este las mismas que para el ensayo de compresión realizado a la férula de Yeso Paris, obteniendo de resultado un espesor necesario de 5mm

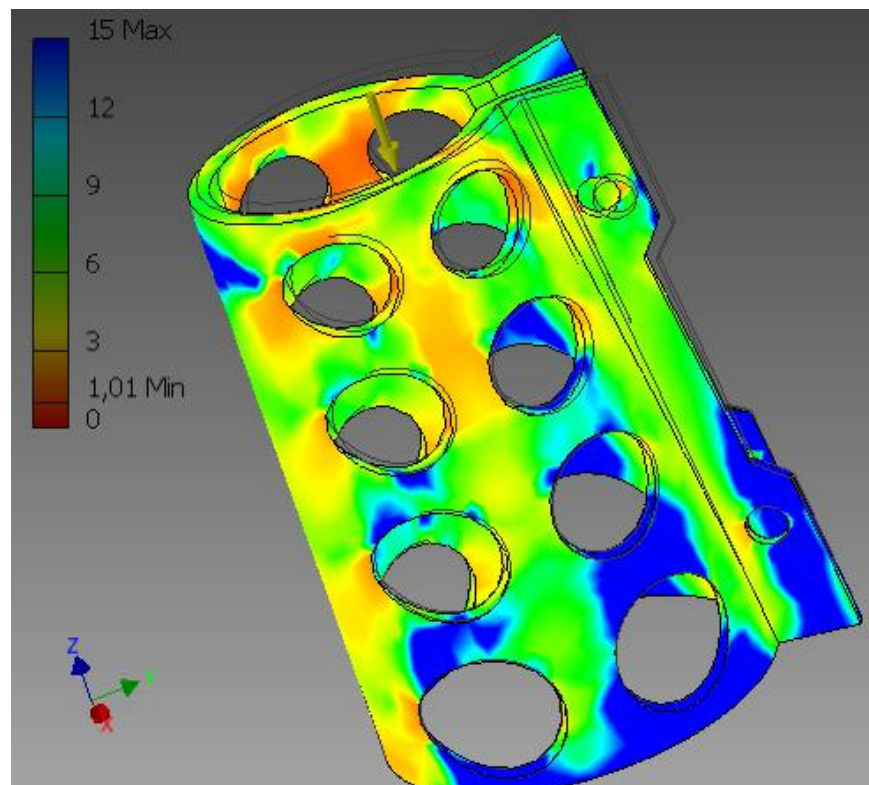


Figura 49 Ensayo Espesor Férula PLA 60%

A continuación con los datos anteriores, vamos a realizar una tabla en la que compararemos una serie de valores de nuestra férula entre los diferentes porcentajes de relleno expresados anteriormente, para ver cual resulta más aconsejable para nuestro caso basándonos en los datos obtenidos por el programa de impresión 3D:

Porcentaje Relleno			
Características	100%	60%	30%
Espesor Necesario	3 mm	3,6 mm	5 mm
Tiempo de Impresión	8 horas y 54 minutos	10 horas y 2 minutos	10 horas y 56 minutos
Longitud de filamento	43904,7 mm	50002,8 mm	55032,7 mm
Peso del Plástico	132 g	150,34g	165,46 g
Coste del Material	2,90 €	3,31 €	3,64 €

Tabla 4 Variación Características según relleno

Para el coste de material hemos tenido en cuenta tanto la longitud del filamento utilizado para la impresión de dicho prototipo como el coste de la bobina de la filamento PLA, que en este caso hemos puesto un coste de 22 €/kg de PLA

Por tanto observando los valores anteriores, podemos afirmar que resulta más conveniente el uso de una férula con 100% de porcentaje de relleno, ya que obtenemos la férula en un menor tiempo, necesitando menor filamento y por tanto con un menor coste. Esto es debido a que el espesor requerido para nuestro prototipo es pequeño y teniendo en cuenta las capas sólidas utilizadas en el contorno, el ahorro de material utilizando un porcentaje de relleno menor no es tanto como el aumento de espesor que estos requieren por las pérdidas de propiedades de material.

Por otro lado el uso de piezas con un menor porcentaje de relleno son más convenientes para aquellos casos en el que el espesor sea más grande y que no sea tan importante la resistencia de la pieza.

### 6.2.3 Modelo de Férula

Una vez definido el diámetro y el espesor de la férula así como haber especificado una geometría acorde con la férula procedemos a obtener el modelo mediante impresión 3D.

El problema fundamental que nos hemos encontrado a la hora de imprimir la pieza, resulta en la estrechez de las paredes de la férula que queremos extruir. En un principio hemos definido el proceso con una altura de capa de 0,2mm, un relleno del 100%, que como hemos visto anteriormente resulta el más ventajoso para nuestro y una temperatura de extrusión del filamento de 205 °C.

Al no terminar de extruir bien la pieza, he probado en reducir la distancia de retracción de 2 mm a 1mm, pero sigue sin conseguir extruir las capas intermedias bien. [20]



Figura 50 Error en la Extrusión debido a estrechez de las Paredes

Para solucionar estos errores de impresión, bajamos la velocidad de la primera capa un 35% de la velocidad de extrusión (inicialmente estaba al 50%), también reducimos aún más la distancia de retracción, la

velocidad de retracción y la temperatura tanto de extrusión como de la cama. [21]

Propiedades	Valores	
	Inicial	Final
Velocidad Primera Capa	3 mm	3,6 mm
Distancia de Retracción	2 mm	0,5 mm
Velocidad de Retracción	17 mm	12 mm
Temperatura de Extrusión	205 °C	210 °C
Temperatura de la Cama	50 °C	55 °C

Tabla 5 Modificación Parámetros de Impresión

Con la modificación de estos datos, conseguimos una correcta impresión de la férula, también durante la extrusión del material para la obtención de la correcta geometría deseada tenemos que tener en cuenta la adición a nuestra estructura de material de soporte, una serie de material adicional cuya función es ayudar al modelo a conseguir la forma que queremos obtener. Para este caso se puede observar claramente que los agujeros que deseamos eliminar de nuestra férula son difíciles de conseguir con una correcta forma sin ayuda de soportes, ya que en dicha técnica se adiciona material a 210° C capa a capa por lo que en la parte superior de los agujeros cuando procederíamos a cerrarlos, no tendríamos material debajo de este sobre el que se sustente el material para proseguir con la geometría de la férula, por tanto nos ayudamos de soportes para ello. Los soportes los puede generar automáticamente el programa que utilizamos para la definición de la impresión, el simplify 3D, pero intentamos reducir los soportes generados a fin de disminuir el tiempo de impresión. Por otro lado cabe mencionar que los soportes tienen una “calidad” de impresión peor que la pieza principal, ya que estos se extruyen a una velocidad mucho mayor adicionando menos material, la finalidad de ello es tanto facilitar la separación de estos de la pieza principal una vez finalizada la extrusión y también reducir el tiempo de impresión.

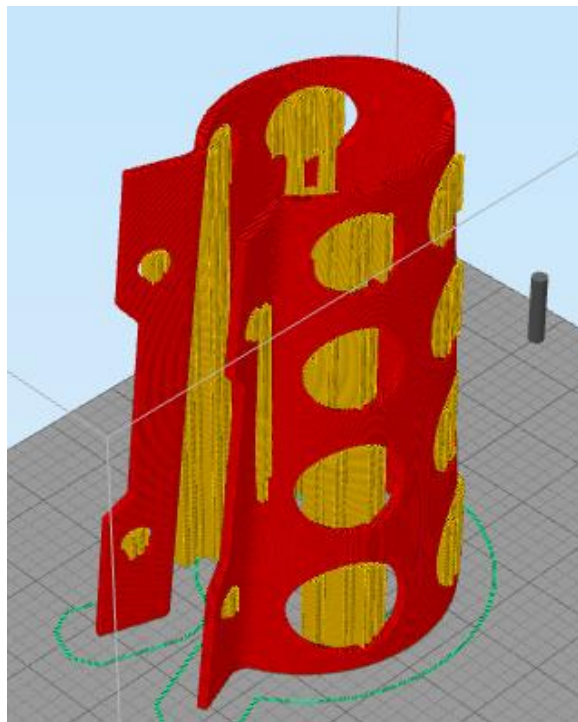


Figura 51 Soportes para Extrusión Férula

Y una vez imprimida la pieza con las modificaciones realizadas después de 8 horas y 54 minutos, el resultado corresponde:

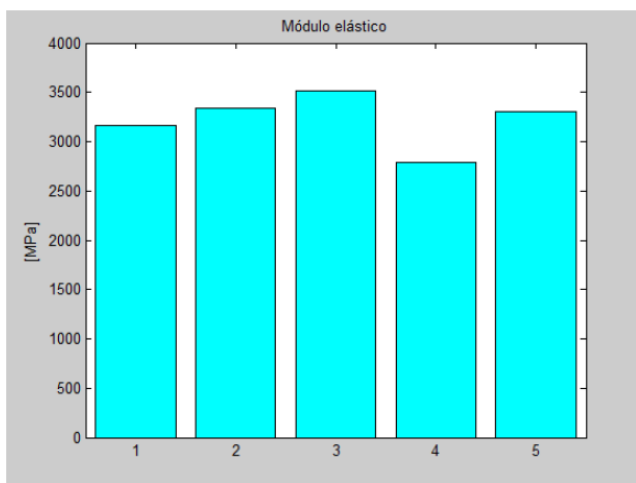


Figura 52 Modificación Órtesis 3D

Después de estudiar el modelo imprimido, nos damos cuenta que este presenta una gran porosidad, además que el punto de unión utilizado para el correcto cerramiento de la férula de PLA puede dificultar la movilidad al usuario, por ello decidimos realizar dos cambios importantes, uno referente a la altura de capa, la cual la reduciremos a 0,1 para evitar la porosidad y una mejora adherencia entre las capas y así obtener una férula mejor definida y con un acabado mucho mejor tanto exteriormente como en el interior y una mayor resistencia y por otro lado reducir la altura del cerramiento haciéndola más homogénea y continua al área de la órtesis.

Como hemos comentando antes, hemos optado como método de unión unos tornillos de plástico, esto es debido a que si elegimos de acero a la hora de realizar unas radiografías estas saldrán, y no queremos que esto ocurra. También modificamos la geometría de los agujeros para una mayor comodidad

Para el nuevo modelo usamos las propiedades del PLA para una altura de capa de 0,1mm, para este caso el módulo de Young corresponde:



modulo

1.0e+03 \*

3.1686 3.3366 3.5111 2.7953 3.3011

El valor medio del módulo de Young es:

3.2225e+03

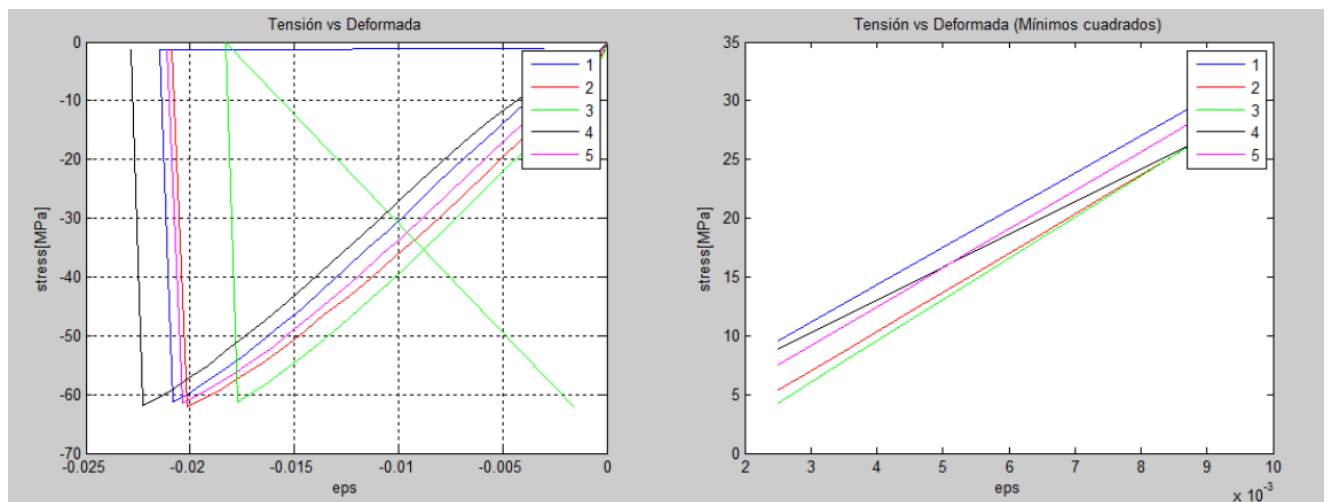
La desviación típica adquiere pues el valor de:

268.2795

El ensayo tiene una relación desviación/media por debajo del 10%. Muy aceptable

Figura 53 Módulo de Young Relleno 100%

El valor del límite de rotura es mayor debido a que utilizamos una altura de capa más pequeña y resulta:



Gráfica 21 Curva Tensión-Deformación PLA Relleno 100%

Según se explica durante los documentos adjuntos a la realización de los ensayos, la gráfica Tensión-Deformación muestra esa forma porque las probetas presentan mayor resistencia a compresión, y por ello se superan los límites establecidos por la máquina (5 KN) y tuvo que realizarse una descarga manual que quedó guardada en los datos. Todo esto se tuvo en cuenta a la hora de calcular el módulo de Young.

Tenemos que tener en cuenta que para nuestros ensayos aplicamos la carga en dirección perpendicular a las capas y con los resultados obtenidos por los ensayos y los datos definidos por el fabricante [22]

Probetas	Altura de capa (mm)	Grosor pared exterior (mm)	Grosor parte inferior/superior (mm)	Densidad del relleno (%)	Diseño de impresión
Probeta impresa en dirección paralela a las capas	0,2	2	0,2	100	
Probeta impresa en dirección perpendicular a las capas	0,3	1	0,3	100	

Figura 54 Valores de Propiedades dados por el Fabricante

Con todo ello y sabiendo que el espesor del prototipo tiene que ser un valor proporcional al del diámetro del extrusor utilizado para poder así facilitar la correcta impresión de la férula, obtenemos un espesor necesario de 3,6 mm

Para imprimir el modelo tardamos 8 horas, el cual lo hacemos a la calidad mayor posible, con una altura de capa de 0,1mm y una velocidad de impresión de 45 mm/seg y con todo ello y utilizando como fijaciones los tornillos estipulados anteriormente el modelo resulta:



Figura 55 Férula con altura capa 0,1mm

Una vez imprimido el modelo, nos damos cuenta de que aun habiéndolo imprimido a una altura de capa y velocidad de impresión baja, las capas de material no son uniformes, pasando en varias partes de la férula que no se adhieren bien entre sí. Otro inconveniente que le vemos al modelo reside en el uso de los tornillos como forma de cierre del área de la férula, ya que estos son incómodo de poner en la órtesis de PLA por parte del usuario o de otra persona. Hemos puesto cuatro puntos de sujeción, ya que queremos que el espesor necesario para contener a estos sea el menor posible, pero a su vez debe aguantar la carga requerida, por ello utilizaremos unos tornillos de Métrica 4, los cuales hemos ensayado con un modelo de Elementos Finitos y resisten al aguantar la carga que les corresponde al ensayar el modelo con la fuerza correspondiente.

Pero debido a la no adherencia de algunas capas entre sí y a la incomodidad en la colocación de los tornillos que hacen de cierre, vamos a intentar mejorar este último prototipo reduciendo la velocidad de impresión y modificando la forma de sujeción, en la cual no utilizaremos los agujeros expuestos anteriormente. Para ello usaremos agujeros más grande para facilitar la unión en la férula y de los cuales por tanto necesitaremos un menor número de ellos.

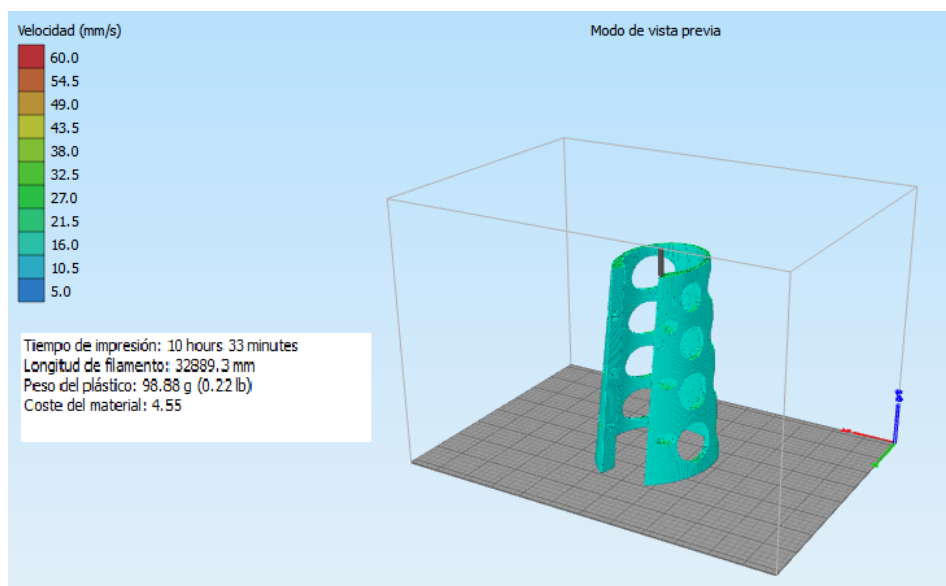


Figura 56 Impresión Órtesis velocidad 30 mm/s



Reduciendo la velocidad desde los 45mm/s a los 30 mm/s obtenemos un modelo de férula con las capas totalmente adheridas. Hemos aumentado el diámetro de los agujeros, de forma que utilizamos tornillos de M6 y 25 mm de longitud, los cuales al presentar una mayor área son más resistentes que los anteriores y utilizamos en este caso tres tornillos, usando para ellos también PLA como material por lo expuesto con anterioridad en relación a una posible radiografía del modelo. Para definir el diámetro necesario de los tornillos para que soporten la carga deseada realizamos un modelo sencillo en un programa de CAD 3D, en el cual aplicando la carga que soportaría el modelo, conseguimos una aproximación del valor de carga relativa que debe aguantar cada sujeción, de forma que vamos aumentando el diámetro necesario de los tornillos hasta que estos soporten dicha carga sin plastificar, para ello necesitamos unos tornillos de M6 [23]. Este modelo de EF ha sido muy sencillo, por ello hemos ponderado la carga que deben soportar y además con la realización de los ensayos experimentales, comprobaremos si estos tienen la dimensión adecuada.

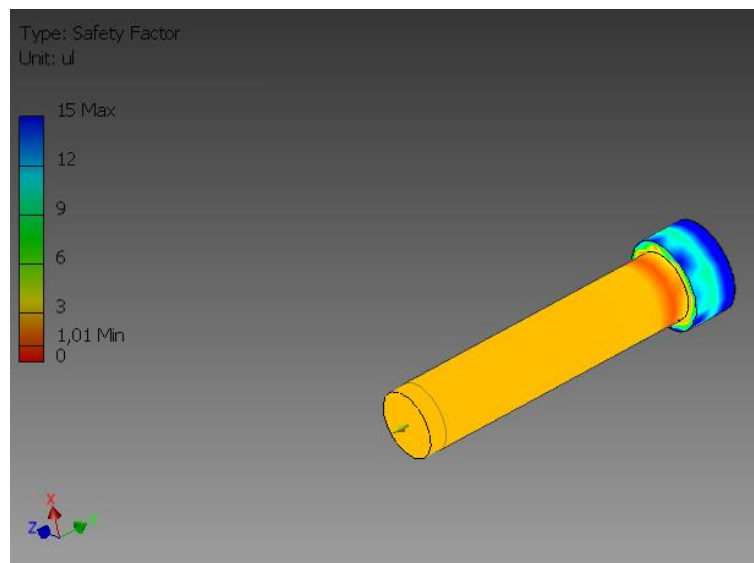


Figura 57 Comprobación de carga en Tornillos Resistentes

Con todo ello y la colocación de estos el modelo completo imprimido en 3d resultaría:



Figura 58 Férula altura capa 0,1 mm y velocidad 30 mm/s

Después de haber obtenido un modelo definitivo imprimido en 3D partiendo de los datos conseguidos durante los ensayos aplicados anteriormente en las férulas de yeso, queremos garantizar que este prototipo diseñado y modelado por un programa de Elementos Finitos, presenta la misma resistencia y rigidez que las férulas de yeso y que no se ha producido ningún error durante el diseño, cálculo de espesor con EF o incluso algún fallo provocado por la impresión 3D, como los expuestos anteriormente debido a una mala adherencia entre capas durante la impresión que puede producir que el comportamiento del material no sea el esperado. Para ello vamos a realizar un ensayo similar al aplicado a la férula de yeso para este prototipo usando el mismo procedimiento y estados de carga con la finalidad de obtener las propiedades de este último modelo y comparar ambos casos.

Antes de realizar el ensayo de carga debemos definir mediante un spray los puntos sobre la férula en los que vamos a medir los desplazamientos para una vez realizado el ensayo conocer las propiedades del elemento ensayado. Finalmente decidimos imprimir dos modelos de los prototipos definitivos para poder obtener unos resultados más exactos con un mayor número de datos. También vamos a hacer uso de la Videocorrelación en este caso, ya que aunque las propiedades del material no deberían cambiar tanto como en el caso del yeso París, al utilizar un prototipo con una sección variable, el área será diferente en cada uno de los puntos, por tanto también medidos los desplazamientos en las mismas tres zonas que el primer ensayo. La ventaja en este caso es que el área es constante para las distintas alturas por lo que en el cálculo de los desplazamientos, el valor de cada sección es constante para cada altura y por ello conseguiremos unos valores más exactos que para la escayola.



Figura 59 Definición de puntos a medir con Spray

A continuación realizaremos el ensayo igual que para el modelo de la férula de yeso, en la que aplicábamos escalones de 5 segundos de duración hasta un incremento de 10 N, después de ello se producirá una recta de pendiente 0 a carga constante durante 10 segundos. En ensayo de carga axial, resulta



Figura 60 Máquina Mini Bionix II, ensayo PLA

# 7 REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE CARGA AXIAL DE ÓRTESIS VERTICALES DE PLA

Con el modelo anterior de CAD hemos definido la férula de PLA, por que a priori conocemos los límites de rotura del elementos, aun así durante el proceso de fabricación aditiva con el uso de la impresora 3D, pueden haberse producido algunas alteraciones tanto de las propiedades como de la geometría del material, por ello vamos a realizar los ensayos de férula en el PLA a fin de definir completamente las propiedades de este y así poder obtener el valor de su rigidez real.

## 7.1 Primer Ensayo

### 7.1.1 Primer Ensayo en zona superior

En este primer ensayo, conociendo los datos previos por los modelos ensayados en modelo de CAD 3D, y siendo la geometría



Figura 61 Probeta Férulas PLA 1

Con los resultados obtenidos después de postprocesar los datos mediante la Videocorrelación comparando los desplazamientos de los puntos inferiores de la muestra con respecto a cada fotografía obtenemos la siguiente gráfica que nos muestra la evolución de los puntos respecto al eje y según las diferentes fotos.

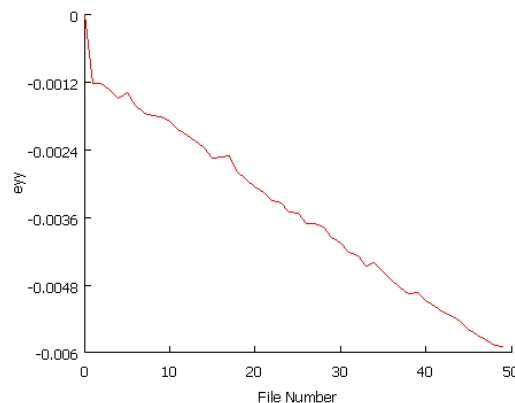
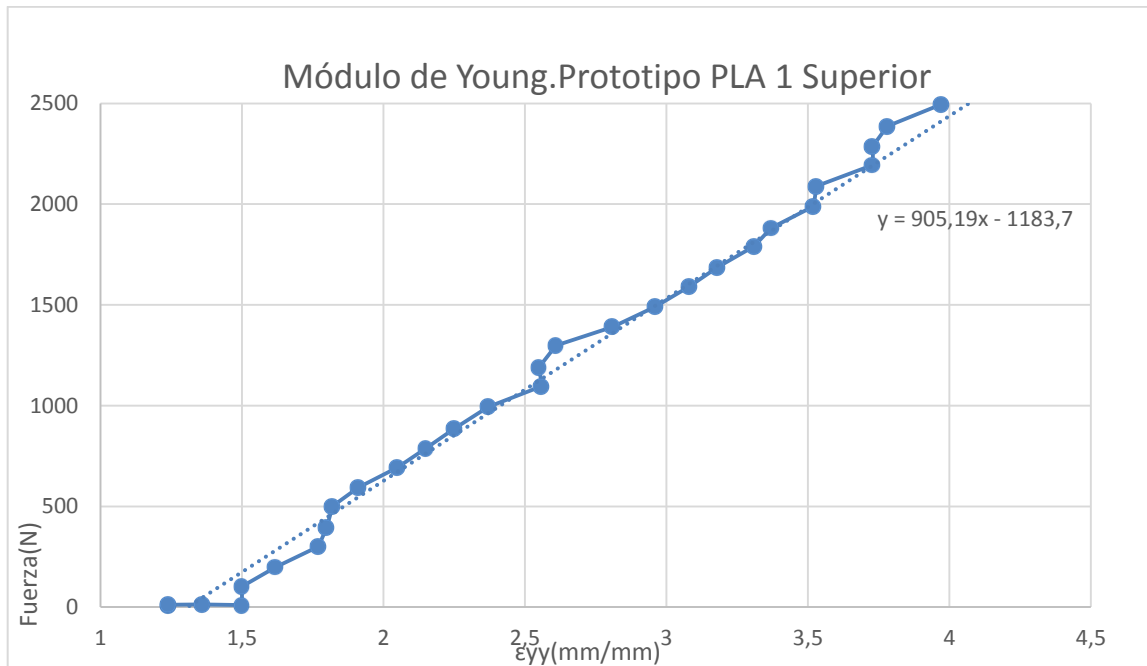


Figura 62 Desplazamiento en cada Foto, Superior, Ensayo 2

Conociendo los desplazamientos de las distintas fotografía para los distintos estados de carga, usamos la salida analógica de los datos de la MINI BIONIX II y pasándolos a digital y comparándolos en el tiempo y para cada fotografía con la fuerza aplicada para cada una de ellas, podemos relacionar el desplazamiento que se produce para cada escalón de fuerza, comparando ambos datos para hallar el valor del módulo de Young, resulta:



Gráfica 22 Módulo de Young del Prototipo 2, zona Superior

Con estos datos podemos proceder al cálculo de la rigidez local en dicho punto en MPa

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

Para el cálculo de la sección, midiendo en la parte superior, para el modelo de CAD 3D:

$$S_{superior} = 1243,854 \text{ mm}^2 = 1,243 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

Siendo la longitud de las probetas que hemos medido anteriormente:

$$l_0 = 150 \text{ mm}$$

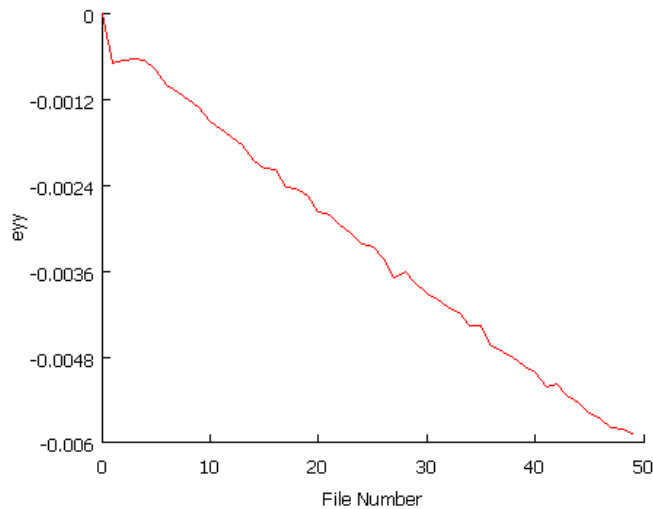
Conociendo la pendiente de la línea media:

$$y = 905,19x - 1183,7$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{626,68}{\frac{2\text{mm}}{150\text{mm}} * 1,243 * 10^{-3} \text{ m}^2} * 10^{-6} = 37,8 \text{ MPa}$$

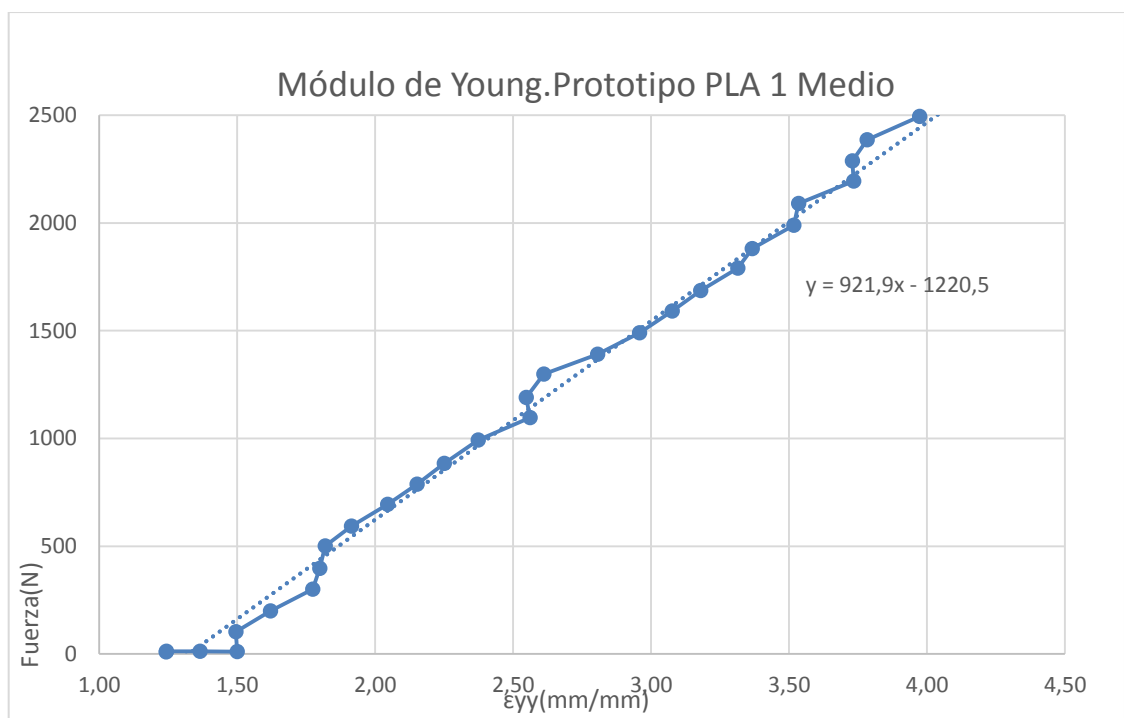
### 7.1.2 Primer Ensayo en zona media

Realizando el mismo ensayo que en el caso anterior pero para la zona media, los resultados obtenidos por a Videocorrelación para esta parte resultan:



Gráfica 23 Deformaciones en cada Foto zona Media del Ensayo PLA1

Podemos observar que se producen desplazamientos más o menos constantes a lo largo de las diferentes fotos, las cuales corresponden a diferentes estados de carga, esto es debido a que nos movemos durante todo el ensayo por la parte elástica lineal del material, algo que hemos hecho a propósito con la intención de no llegar a la rotura ni parte plástica del material, ya que no es necesario para conocer la rigidez de esta. Usando estos datos y comparándolos en el programa Excel con la fuerza obtenida asociada a dichos desplazamientos para las distintas fotos durante la aplicación del ensayo



Gráfica 24 Módulo de Young del Prototipo PLA 1 zona Media

Como hemos explicado en el caso anterior, conociendo el área y los demás valores, podemos proceder al cálculo de la rigidez local en dicho punto en MPa

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

Para el cálculo de la sección, calculándola en el modelo de CAD 3D para el punto medio de la sección, a una altura de 75 mm respecto a la base, sabiendo que la de ambos extremos resulta:

$$S_{superior} = 1243,854 \text{ mm}^2 = 1,243 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_{inferior} = 826,532 \text{ mm}^2 = 0,826 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

Por tanto en el punto intermedio resulta:

$$S_{medio} = 826,532 \text{ mm}^2 = 1,0345 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

Y la longitud de las probetas medidas antes resulta:

$$l_0 = 150 \text{ mm}$$

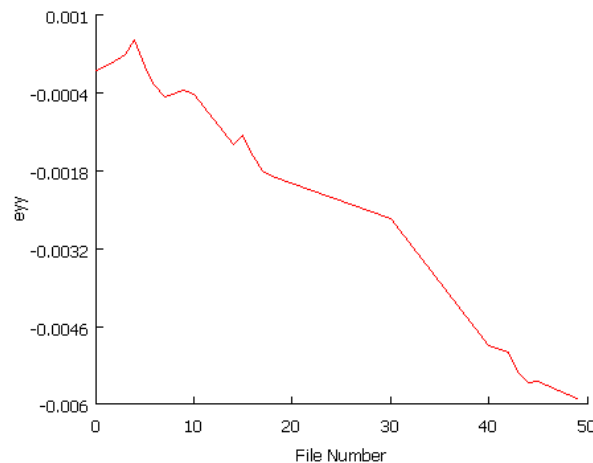
Sustituyendo todos los términos obtenemos, sabiendo la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 786,98x - 555,91$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{231,07N}{\frac{1mm}{150mm} * 1,0345 * 10^{-3} \text{ m}^2} * 10^{-6} = 33,488 \text{ MPa}$$

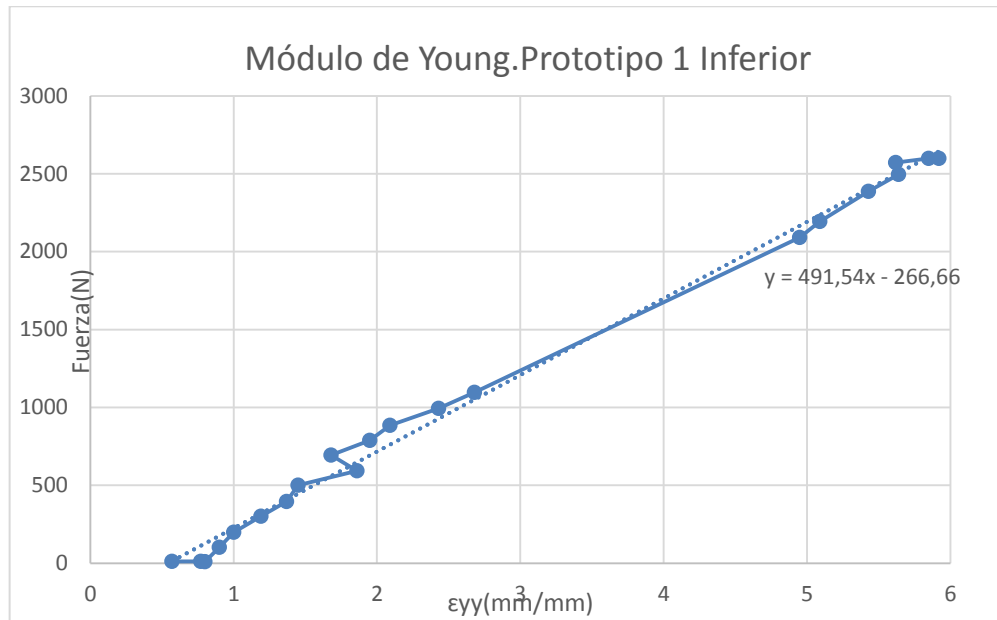
### 7.1.3 Primer Ensayo en zona inferior

Con los datos conseguidos en la parte inferior de la probeta, los desplazamientos de los puntos respecto al tiempo y las fotografías asociadas para cada uno de ellos:



Gráfica 25 Deformaciones en cada Foto zona Inferior del Ensayo PLA 1

Como en los casos anteriores, podemos observar que los desplazamientos que se obtienen son negativos, esto es debido a que realizamos un ensayo de compresión, y en la máquina MINI-BIONIX II este movimiento está definido como negativo siendo la tracción positiva. Partiendo de los desplazamientos y usando el programa VIC-SNAP, obtenemos las deformaciones longitudinales en el modelo y la comparamos respecto a la fuerza aplicada en cada una de las fotos para los distintos momentos, de forma que obtenemos una recta que compara ambos valores.



Gráfica 26 Módulo de Young. Prototipo PLA 1 Inferior

Con la obtención del área asociada a dicho punto, como en los casos anteriores:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

La sección para un cilindro hueco corresponde:

$$S_{inferior} = 826,532 \text{ mm}^2 = 0,826 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

Y la longitud de las probetas como hemos calculado antes resulta:

$$l_0 = 150 \text{ mm}$$

Sustituyendo todos los términos obtenemos, conociendo el valor de la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 491,54x - 266,66$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{224,88}{\frac{1 \text{ mm}}{150 \text{ mm}} * 0,826 * 10^{-3} \text{ m}^2} * 10^{-6} = 40,837 \text{ MPa}$$

### 7.1.4 Conclusión Primer Ensayo

Comparando los resultados con el anterior de la férula de yeso, podemos decir que obtenemos un material con unas propiedades similares de rigidez, con la diferencia que en este caso no ha sido necesario llegar a la rotura del material, Observando los datos de los tres casos anteriores, obtenemos unos valores parecidos, sin tantas fluctuaciones como para el ensayo de la férula de yeso, esto es debido a que el área en este caso es constante para cada altura así como homogéneo el material. Las modificaciones que se producen, son debido a que utilizamos una sección variable a lo largo de la longitud

## 7.2 Segundo Ensayo

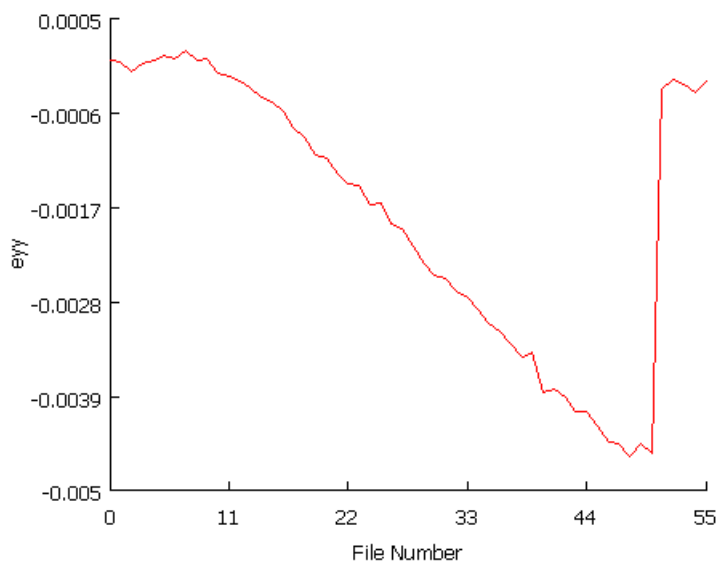
### 7.2.1 Segundo Ensayo en zona superior

En este último ensayo, vamos a realizar los mismos pasos que para el segundo ensayo, resulta:



Figura 63 Probeta Órtesis PLA 2

En esta primera zona, la parte superior, los desplazamientos de los puntos seleccionados para cada una de las fotos, resultan:

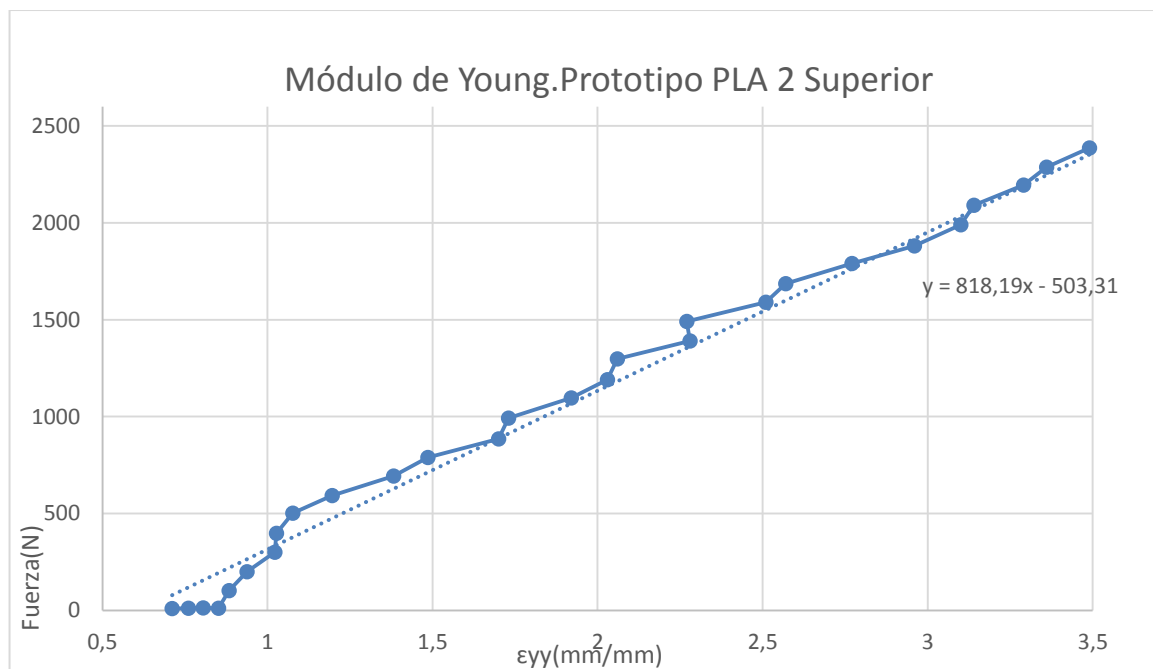


Gráfica 27 Deformación en cada Foto, zona Superior del Ensayo PLA 2



En este caso podemos observar que en las últimas fotografías se ha producido un desplazamiento positivo, esto es debido a que al terminar el ensayo, procedemos a retirar el pistón que estaba aplicando la carga sobre la parte superior de la probeta, y al estar durante el ensayo en la zona elástica lineal y eliminar la carga, la férula de PLA recupera el desplazamiento producido.

Con dichos datos obtenemos las deformaciones e introduciendo la fuerza a la que se producen cada una de las capturas:



Gráfica 28 Módulo de Young del Prototipo PLA2, zona Superior

Midiendo el área y los datos necesarios, podemos calcular la rigidez local del punto deseado

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

Para el cálculo de la sección:

$$S_{superior} = 1243,854 \text{ mm}^2 = 1,243 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

Y la longitud de las probetas como hemos calculado antes resulta:

$$l_0 = 150 \text{ mm}$$

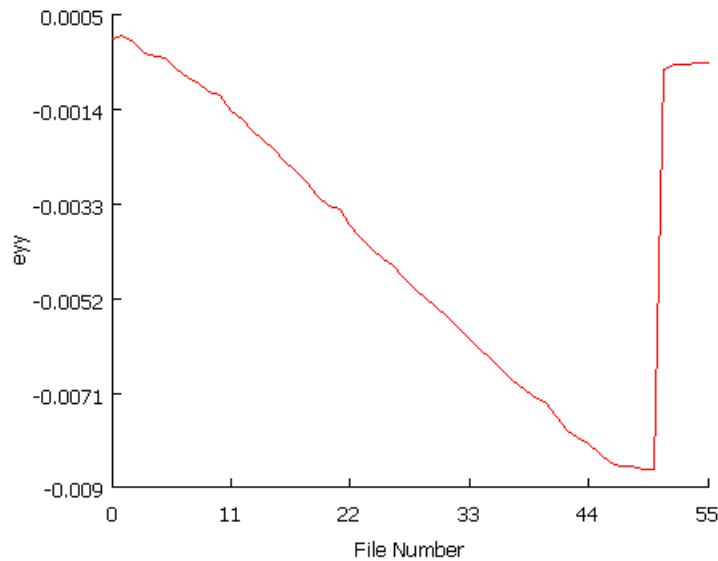
Sustituyendo todos los términos obtenemos, sabiendo la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 818,19x - 503,31$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{642,15}{\frac{1mm}{150mm} * 1,243 * 10^{-3}m^2} * 10^{-6} = 38MPa$$

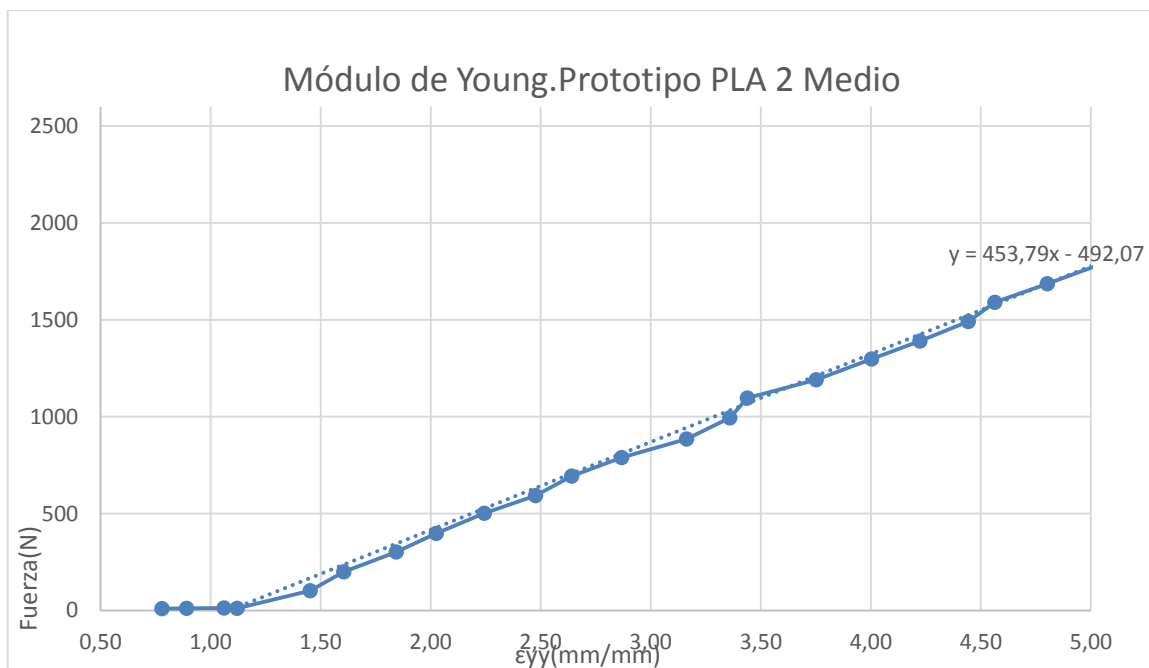
## 7.2.2 Segundo Ensayo en zona media

Para la zona media de la probeta, los datos obtenidos por Videocorrelación, resultan:



Gráfica 29 Deformación en cada Foto, Medio, Ensayo

Como en el caso anterior, las últimas fotos corresponden a la parte una vez finalizada el ensayo en la que se produce la descarga de la probeta a ensayar.



Gráfica 30 Módulo de Young del Prototipo PLA 2, zona Media

Obteniendo los datos del área y las fuerzas e incrementos de desplazamiento:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

La sección del área hueca:

$$S_{superior} = 1243,854 \text{ mm}^2 = 1,243 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_{inferior} = 826,532 \text{ mm}^2 = 0,826 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

Por tanto en el punto intermedio resulta:

$$S_{medio} = 826,532 \text{ mm}^2 = 1,0345 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

Y la longitud de las probetas como hemos calculado antes resulta:

$$l_0 = 150 \text{ mm}$$

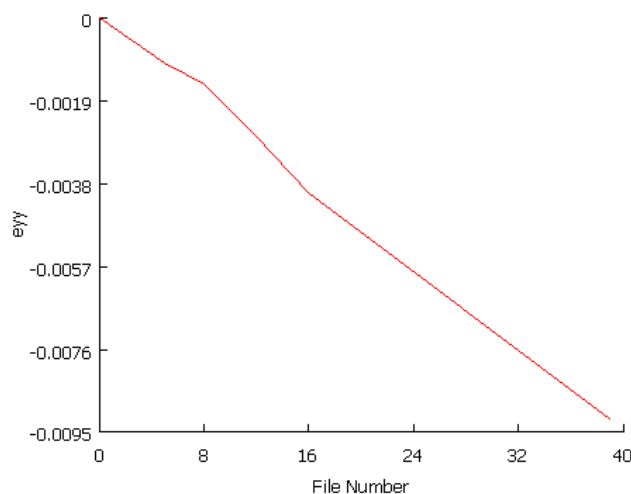
Sustituyendo todos los términos obtenemos, sabiendo la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 453,79x - 492,07$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{415,51}{\frac{2\text{mm}}{150\text{mm}} * 1,035 * 10^{-3} \text{ m}^2} * 10^{-6} = 32,7 \text{ MPa}$$

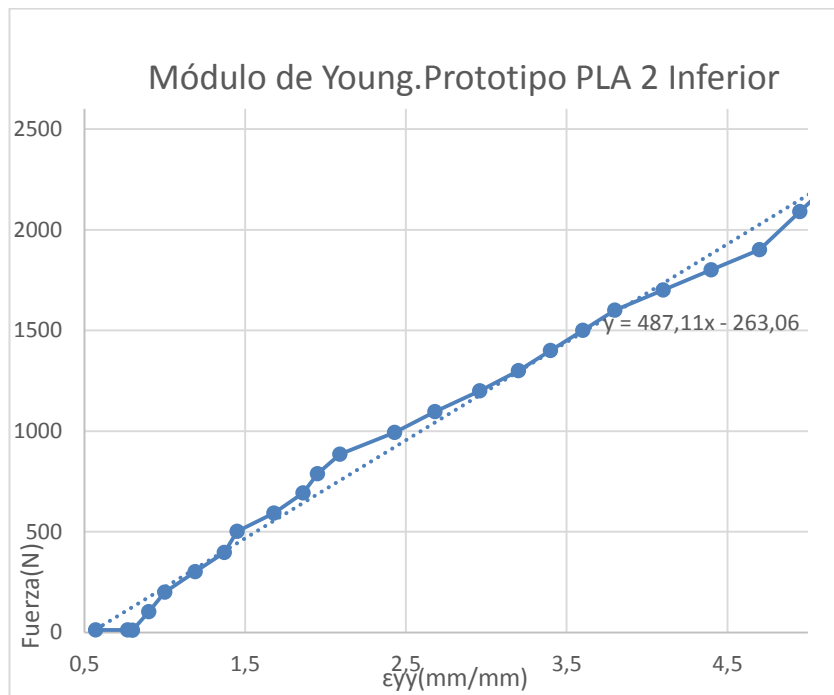
### 7.2.3 Segundo Ensayo en zona inferior

En esta zona inferior, las deformaciones de los puntos seleccionados para cada una de las fotos, resultan;



Gráfica 31 Deformaciones en cada Foto en zona Inferior del Ensayo PLA 2

Con dichos datos obtenemos las deformaciones e introduciendo la fuerza a la que se producen cada una de las capturas:



Gráfica 32 Módulo de Young del Prototipo PLA 2 en zona Inferior

Midiendo el área y los datos necesarios, podemos calcular la rigidez local del punto deseado

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

Para el cálculo de la sección:

$$S_{inferior} = 826,532 \text{ mm}^2 = 0,826 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

Y la longitud de las probetas como hemos calculado antes resulta:

$$l_0 = 150 \text{ mm}$$

Sustituyendo todos los términos obtenemos, sabiendo la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 487,11x - 263,06$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{224,05}{\frac{1\text{mm}}{150\text{mm}} * 0,826 * 10^{-3} \text{ m}^2} * 10^{-6} = 40,6 \text{ MPa}$$

#### 7.2.4 Conclusión Segundo Ensayo

Para la obtención de las imágenes, las cuales capturamos mediante el programa VIC-SNAP (2010) conseguimos los desplazamientos de los distintos puntos y con estos datos, usando el programa VIC-2D (2009) calculamos las deformaciones que se producen en la férula de PLA y con estos datos y los correspondientes a la geometría de la probeta calculamos la rigidez en tres puntos de esta. Durante este ensayo podemos observar que el valor de la rigidez también va aumentando conforme vamos disminuyendo en la altura de la probeta. Nos salen unos valores un poco menores a los del primer ensayo, y esto es debido a que disminuimos un poco el valor de la velocidad de impresión, aun así conseguimos unos valores muy similares tanto en ambos casos como con la primera probeta de férula ensayada.

## 8 DISEÑO E IMPRESIÓN POR FABRICACIÓN EN 3D DE MODELOS PLANOS

Partiendo de los valores anteriores, vamos a realizar unos modelos diferentes de la férula en los cuales imprimimos esta en plano, la intención de esta modificación reside en buscar un menor espesor de la férula, con un mejor acabado y una disminución del tiempo de impresión. Una vez terminada la impresión aplicaremos calor con un calentador hasta una temperatura media de 60 °C, valor a partir del cual el PLA empieza a derretirse y podemos variar más fácilmente la forma y adaptarla así a la del brazo que queremos que sirva como férula.

En un principio nos surge la duda de como diseñar el modelo plano, podríamos realizarlo en dos partes, la principal ventaja de este modelo reside en que al aplicar calor al prototipo, este en ambos casos no tiene que modificar en demasía su geometría, por tanto no nos arriesgamos a tener que aplicar demasiado calor para obtener la forma deseada y que este exceso de calor provoque una variación significativa en las propiedades del material. La fundamental desventaja de este caso, reside en que al ser dos partes separadas, requiere para su colocación completa y cerrada alrededor de la articulación a proteger, dos uniones en cada uno de los extremos de cada modelo, esto provocaría un punto de unión extra, y sabiendo que estos puntos pueden resultar la parte más crítica del sistema, tanto por ser el principal punto de concentración de cargas en la férula y por ello el lugar más débil, como por que estas zonas deben de tener un grosor mayor al de la férula para que la unión diseñada sea eficiente y no se produzca ninguna rotura y esto produciría otro punto que podría provocar incomodidad al usuario y restar funcionalidad al modelo.

Frente a este tipo de diseño se nos ocurre proponer un prototipo completo que no necesite ninguna unión entre diferentes modelos y simplemente una conexión entre sus extremos para que a la hora de aplicar calor sobre este y contener al brazo que se quiere inmovilizar, con el fin de cerrar la superficie de la férula alrededor de la extremidad. El inconveniente en este caso, reside en que el modelo debe modificar hasta 270 grados su geometría para adaptarse sobre el contorno circular de una extremidad, y como desconocemos el comportamiento ni la temperatura a la que tendremos que elevar el modelo para poder modificar dicha acción y si ello provocará una disminución significativa en las propiedades del material ,vamos a diseñar e imprimir los modelos y le aplicaremos el calor necesario para obtener la geometría deseada, y después de ello valorar cual de ambos resulta más útil para nuestro caso.



Figura 64 Secador Industrial Salki utilizada para aplicar calor al modelo

La principal ventaja de los dos modelos imprimidos en plano, reside en un menor tiempo de impresión y que las capas se imprimen de forma paralela al sentido en el que vamos a aplicar la carga, esto provoca que las propiedades de resistencia del material sean mejores y necesitemos por tanto un menor espesor para soportar la carga deseada, por ello necesitaremos un menor tiempo y cantidad de material para el prototipo deseado, reduciendo el coste y consiguiendo un modelo mucho más funcional y que produzca una menor incomodidad al usuario [24]

## 8.1 Espesor y Porcentaje de Relleno

Antes de definir ambos modelos a imprimir tenemos que tener en cuenta que depende del espesor de capa y del porcentaje de relleno elegido obtendremos un menor o mayor espesor necesario para poder soportar la carga deseada. Para obtener un valor de estas dos características vamos a utilizar las tablas que representan la variación de las propiedades según estas y elegiremos aquel con el cual obtengamos un menor tiempo de impresión y que además no necesitemos un espesor mayor de 5mm, lo cual pasaría a ser demasiado incómodo para el usuario.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, vamos a ir variando las propiedades del PLA del filamento BQ en función del porcentaje de relleno y altura de la capa deseada, comprobando para la carga aplicada cual es el espesor necesario para soportar dicha fuerza. En un primer caso tratamos de reducir en la mayor medida de lo posible el porcentaje de relleno y la altura de capa para un espesor límite de 5 mm. Este caso se da para una altura de capa de 0,2mm con 30% de relleno, para el cual necesitamos un espesor de 4,8 mm, al ser este un factor muy limitante en esta forma de impresión, obtenemos que tardamos 6 horas y 13 minutos en realizar este proceso.

Una vez conocido este valor límite vamos a intentar aumentar el porcentaje de relleno con la intención de reducir un poco el espesor tanto para una mayor comodidad del usuario, como para una mejor colocación de este, ya que como vamos a aplicar calor sobre la férula imprimida en 3D, con la intención de amoldarla a la extremidad elegida como sujeción de esta.

Por ello en un segundo caso, aumentamos el porcentaje de relleno hasta un 60%, con ello conseguimos que el espesor necesario sea de 3,6mm y tanto el tiempo de impresión como la longitud del filamento utilizado no excede en demasía al caso anterior.

Con estos datos y con lo expuesto anteriormente tomando los mismos valores de altura de capa y porcentaje de relleno que para el caso de la impresión vertical, obtenemos un espesor necesario de 3 mm, por tanto no disminuimos en demasía el espesor respecto al caso anterior pero aun así el tiempo de impresión necesario es casi el doble, teniendo en cuenta las variaciones del tiempo de impresión estipulado por el programa simplify 3D y el tiempo real que tarda, en la siguiente tabla podemos ver los tres casos expuestos, uno para una altura de capa de 0,1 mm y los otros dos de 0,2mm y variando el espesor de relleno. [25]

Porcentaje Relleno	100%	30%	60%
Características			
Altura capa	0,1 mm	0,2 mm	0,2 mm
Espesor Necesario	3 mm	4,8 mm	3,6 mm

Tabla 6 Tabla de Propiedades según Espesor y Porcentaje de Relleno.

Con todos estos valores y lo expuesto anteriormente, decidimos que la mejor solución corresponde al uso de un 60% de relleno y espesor de 0,2 mm para este prototipo. También tenemos que decir que las demás relaciones de porcentaje de relleno y altura de capas de las que conocemos las propiedades del material y no están expuestas en la tabla, han sido estudiadas y rechazadas debido a que o excedían el espesor deseado o el tiempo de impresión que requerían superaban por bastante el caso anterior.

A continuación vamos a diseñar e imprimir los distintos modelos, después tratamos de moldearlo alrededor de la extremidad, tanto para el modelo de una sola pieza como para el de dos y con ello observaremos si se producen problemas a la hora de ajustarlo al área cerrada del brazo y otras características con las que decidiremos cual es el mejor modelo y el que vamos a utilizar para realizar el ensayo de carga y comprobar sus propiedades físicas reales.

## 8.2 Modelo Férula PLA Plana, Dos Partes

En este primer caso, partimos de la consigna de diseñar un modelo de dos piezas que se unan entre sí por ambos extremos y que además tengan el espesor de 3,6 mm obtenidos y que a la hora del diseño utilicemos las especificaciones de 0,1 mm la altura de capa y 60% de porcentaje de relleno.

Realizamos diferentes diseños partiendo de que una vez adaptado a la extremidad que deseamos inmovilizar se parezca lo más posible a los prototipos que imprimimos verticalmente, usamos por ello el mismo número de agujeros extrayendo el mismo porcentaje de cantidad de ellos. Para la unión decidimos optar por el uso de tres tornillos de M4 en cada uno de los lados cerrados por el extremo por las tuercas correspondientes. Elegimos esta opción procurando que el espesor en el punto de unión resalte lo menos posible con el fin de que estorbe lo menos al usuario durante su funcionamiento normal.

El diseño del modelo y el tiempo de impresión requerido en dicho caso resultan:

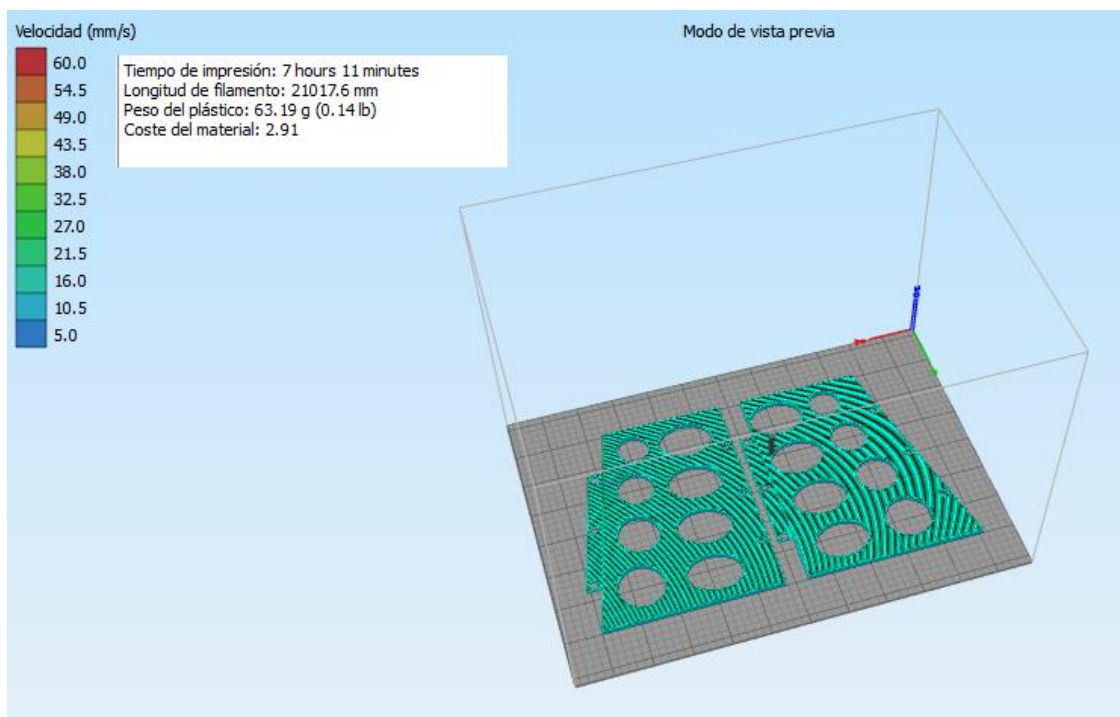


Figura 65 Modelo PLA Plano, dos partes

Una vez imprimido, procederemos al diseño de los tornillos también de PLA que se adapten al diámetro de los agujeros diseñados y a calentar mediante el secador industrial ambos y una vez alcanzados los 60°C temperatura a partir de la cual podemos amoldar el prototipo a la extremidad deseada para una vez hecho esto insertar los tornillos de unión para fijar la estructura.



El primer problema que obtenemos al imprimir ambos diseños es el punto de conexión entre ambos ya que además de producir problemas para unir los modelos, al ser tornillos pasantes la parte interior interferiría con el brazo a inmovilizar, lo que provocaría malestar por parte del usuario, además en dos partes, la solución a esto sería aumentar la zona de unión de forma que la conexión se produjera solo en la zona exterior pero también al resultar dos puntos, pensamos que sería bastante incómodo para el usuario ya que le obstaculizaría durante sus movimientos habituales.



Figura 66 Impresión órtesis PLA plano, dos Partes

Por otro lado, después de aumentar la temperatura del modelo y adaptarlo a la geometría deseada, nos encontramos que es difícil conectar ambas partes del diseño y que queden perfectamente adheridas, ya que al utilizar nosotros un procedimiento de modificación de la forma con un calentador industrial, los modelos no se ajustan perfectamente ni conectan entre sí a la hora de cerrar el prototipo, ya que al usar el calor para deformarlo se producen variaciones de la forma durante todo el proceso, por tanto el uso de un prototipo con tantas conexiones solo sería factible con el uso de una tecnología que te permitiera poder tener completamente definida y diseñada el modelo antes de imprimirlo y que por tanto se ajuste perfectamente tanto a la extremidad como entre ellos.



Figura 67 Modificación órtesis PLA plana, dos partes

### 8.3 Modelo Férula Pla Plana, Una Parte

En este segundo caso, después de poder observar los inconvenientes producidos en el primer caso, vamos a diseñar un modelo de una sola pieza. Debido a los problemas que se han ocasionado en el prototipo imprimido anteriormente, vamos a modificar el diseño realizando varios modelos para comprobar cuál de ellos se adapta mejor a nuestra circunstancia.

En todos estos casos intentamos no aumentar el espesor fijo de 3,6 mm, el punto más frágil de la férula reside en la unión entre los extremos, de forma que una vez deformada esta se cierre alrededor de la extremidad. El uso como en el caso de las dos partes de que una zona de la férula se introduzca en la otra como se puede observar en la figura 66, no es recomendable ya que al aplicar calor una zona se deforma y no se introducen bien las partes.

Por ello procederemos a otro tipo de conexión que resulte más efectiva y menos incómoda para el usuario

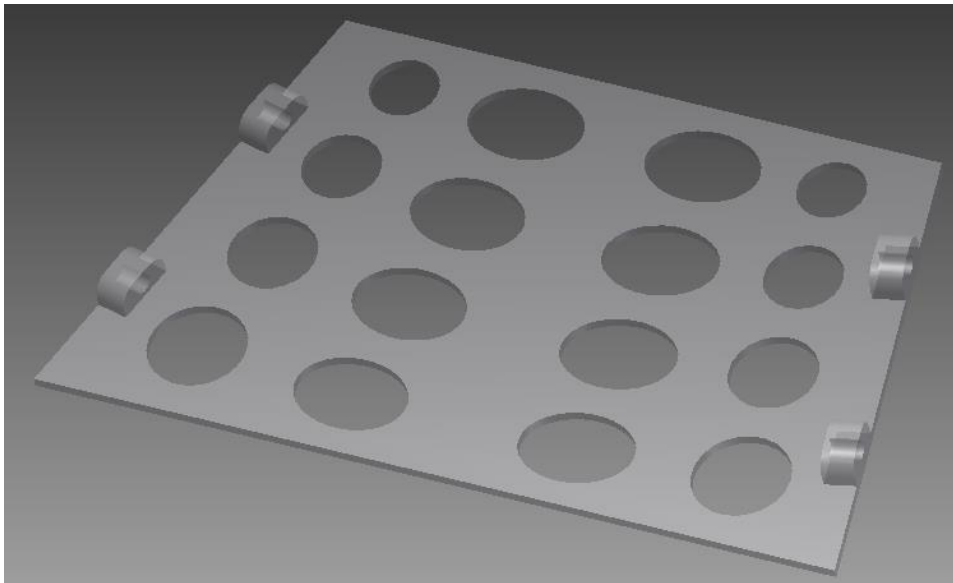


Figura 68 Modelo PLA plana, una pieza reducido

Con este prototipo el problema principal resulta en que a la hora de aplicar calor para modificar la geometría de la férula, el cierre diseñado no cumple enteramente su función, ya que deja espacios abiertos y no cierra el área por completo, dejando partes sin conectar, y que produce que a la hora de aplicar la carga, esta zona vaya a ser menos resistente, por ello a continuación vamos a realizar otro modelo que consiste en una variación del anterior en el que cual intentamos minimizar el tiempo de impresión y que sea lo menos engorroso para el consumidor, reducimos el diámetro del agujero para los tornillos que tienen en la fijación, de forma que añadimos un agujero más, disminuyendo la altura de esta capa y la hacemos continua entre las distintas perforaciones, a fin de que se distribuya la carga y que al aplicar calor también aporte para fijar ambas partes.

En todos estos casos intentamos no aumentar el espesor fijo de 3,6 mm, el lugar más frágil de la férula reside en los puntos de uniones en las que se fija la férula una vez deformada para adaptarla a la extremidad.

Procediendo con el modelo a de conexión que resulta más efectivo:

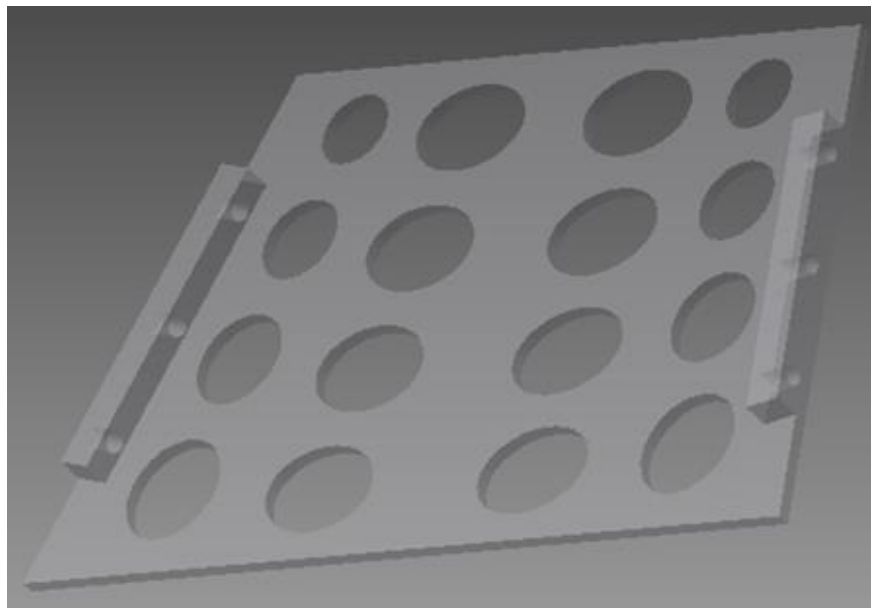


Figura 69 Modelo PLA plana, una pieza

Con este prototipo buscamos una mayor zona de contacto en la parte del cierre de la férula para que la resistencia de esta zona sea acorde a la del modelo e intentar que no sea la parte menos resistente de la órtesis. Al aplicar calor en esa zona conseguiremos que ambas zonas se unan entre sí a lo largo de toda la superficie de contacto y tengan una mayor resistencia.

Como en el caso anterior utilizaremos un espesor de 0,2mm y porcentaje de relleno de 60%, pero ahora con el modelo ya definido podemos ir variando las propiedades para los distintos casos y así poder obtener los datos de tiempo de impresión, longitud de filamento y coste total de cada uno de los distintos diseños según la variación de altura de capa y porcentaje de relleno que realicemos.

Características \ Porcentaje Relleno	100%	30%	60%
Altura capa	0,1 mm	0,2 mm	0,2 mm
Espesor Necesario	3 mm	4,8 mm	3,6 mm
Tiempo de Impresión	12 horas y 2 minutos	7 horas y 58 minutos	8 horas y 47 minutos
Longitud de filamento	29816,9	33177,3 mm	35289,7 mm
Peso del Plástico	89,65 g	99,75 g	106,10 g
Coste del Material	1,97 €	2,29 €	2,33 €

Tabla 7 Características según Espesor y Porcentaje de Relleno.

Nos damos cuenta que el tiempo de impresión no varía en demasía con el modelo previo imprimido verticalmente, esto es debido a que utilizábamos una altura de capa de 0,1 mm y un relleno de 100%, así como en el caso anterior no afectaba demasiado al tiempo el porcentaje de relleno, debido a que al imprimir la prótesis en vertical el relleno era solo de 3,6 mm sin tener en cuenta las capas sólidas exteriores e interiores utilizamos una mayor calidad con la intención de reducir lo máximo posible el espesor.

En este caso el porcentaje de relleno es algo determinante en el tiempo y material utilizado, por ello aumentaremos la altura de capa y reduciremos el relleno con la intención de disminuir la longitud de filamento utilizando todo ello teniendo en cuenta que el espesor de la férula no supere los 5mm, espesor a partir del cual con las pruebas realizadas imprimiendo los diferentes modelos, la órtesis puede resultar incómoda y demasiado aparatosa para el usuario. Cambiando las propiedades en función de esto llegamos a un modelo en el que cumplimos todos los requisitos.

## 9 REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE CARGA AXIAL DE ÓRTEISIS PLANAS DE PLA

---

Una vez definidos los prototipos a ensayar preparamos los modelos adecuadamente para el ensayo utilizando la misma definición de cargas y modelo de ensayo que en los casos anteriores, también haremos uso de la Videocorrelación. Por otro lado vamos a ensayar los dos prototipos anteriores para ver si la segunda solución de cierre es más efectiva o si por el contrario con la inicial sería suficiente.

### 9.1 Primer Ensayo

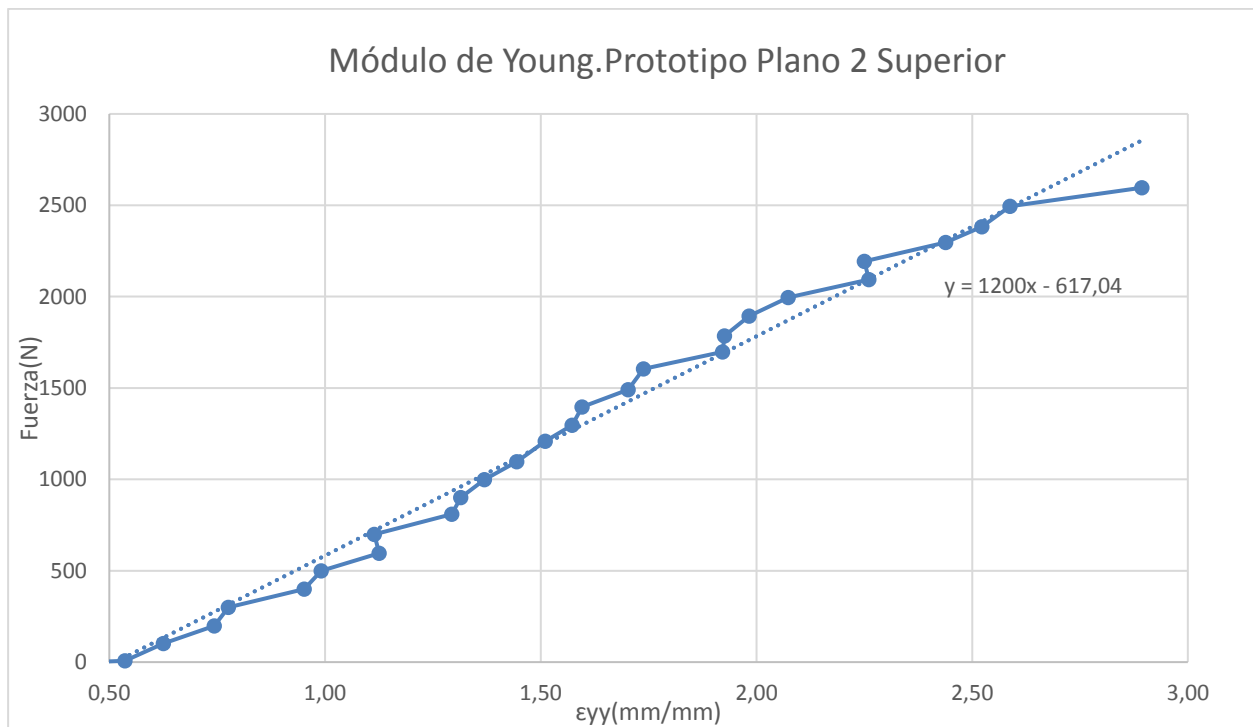
#### 9.1.1 Primer Ensayo en zona superior

En este primer ensayo, utilizando el modelo inicial, aplicamos los mismos pasos que para los ensayos con los modelos anteriores, pintamos la probeta y también analizaremos el ensayo en tres puntos, uno superior, uno medio y otro inferior, ya que aunque se supone una homogeneidad de características que no teníamos en las férula de yeso, también podemos observar las pequeñas variaciones que se produzcan y ver como varían a lo largo de la aplicación de la carga y de las diferente sección a lo largo de la longitud del modelo, siendo la probeta para este caso:



Figura 70 Probeta Férula PLA plana modificada

Obtenemos unos valores de desplazamiento y usando el programa VIC 2D-2009 conseguimos las deformaciones necesarias para calcular la rigidez del prototipo. La deformación unitaria que se produce respecto a la carga corresponde a:



Gráfica 33 Módulo de Young del Prototipo plano 1 en zona Superior

Midiendo el área y los datos necesarios, podemos calcular la rigidez local del punto deseado

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

Para el cálculo de la sección:

$$S_{superior} = 576 \text{ mm}^2 = 0,576 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Y la longitud de las probetas como hemos calculado antes resulta:

$$l_0 = 150 \text{ mm}$$

Sustituyendo todos los términos obtenemos, sabiendo la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 1200,7 x - 617,04$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{583,66}{\frac{1 \text{ mm}}{150 \text{ mm}} * 0,576 * 10^{-4} \text{ m}^2} * 10^{-6} = 15,1 \text{ MPa}$$

### 9.1.2 Segundo Ensayo en zona media

Para este caso tomamos la zona media de la probeta para tomar los datos necesarios para una correcta obtención de las deformaciones, la zona elegida para ello es la siguiente:

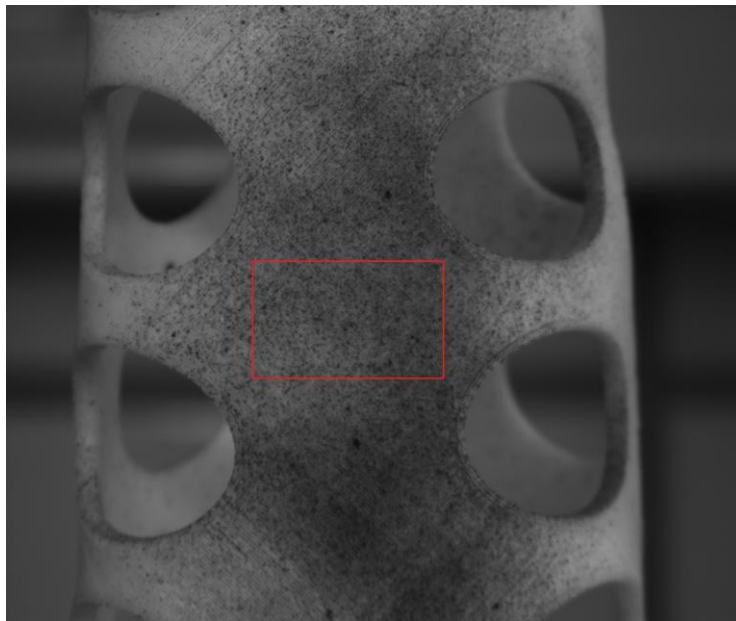
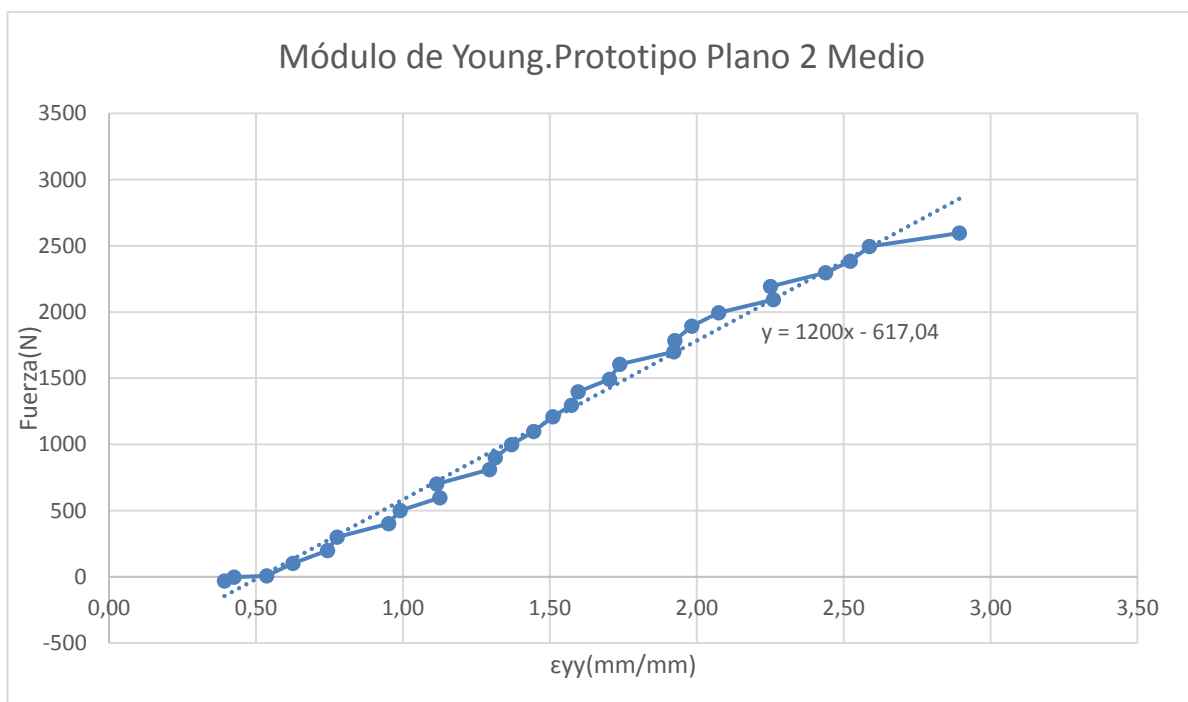


Figura 71 Zona Media captura desplazamientos Férula Plana 1

Para la zona media de la probeta, con los datos obtenidos por Videocorrelación y posteriormente con el programa, obtenemos unos valores de deformaciones respecto a fuerzas que corresponde a:



Gráfica 34 Módulo de Young del Prototipo plano 2 en la zona Media

Consiguiendo los datos del área y las fuerzas e incrementos de desplazamiento:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

La sección del área del medio resulta, partiendo de los dos extremos:

$$S_{inferior} = 774 \text{ mm}^2 = 7,74 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$S_{superior} = 576 \text{ mm}^2 = 5,76 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Por tanto en el punto intermedio resulta:

$$S_{medio} = 675 \text{ mm}^2 = 6,75 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Y la longitud de las probetas como hemos calculado antes resulta:

$$l_0 = 150 \text{ mm}$$

Sustituyendo todos los términos obtenemos, sabiendo la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 627,97x - 24,1$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{S}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{603,82}{\frac{1\text{mm}}{150\text{mm}} * 6,75 * 10^{-4} \text{ m}^2} * 10^{-6} = 13,4 \text{ MPa}$$

### 9.1.3 Segundo Ensayo en zona inferior

Por último calcularemos las deformaciones a partir de los desplazamientos mediante el criterio de correlación de mínimos cuadrados, en la zona inferior

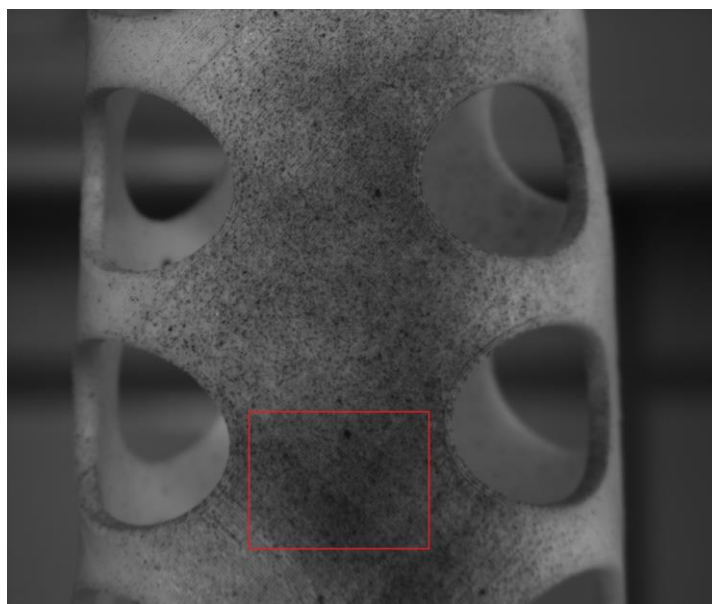
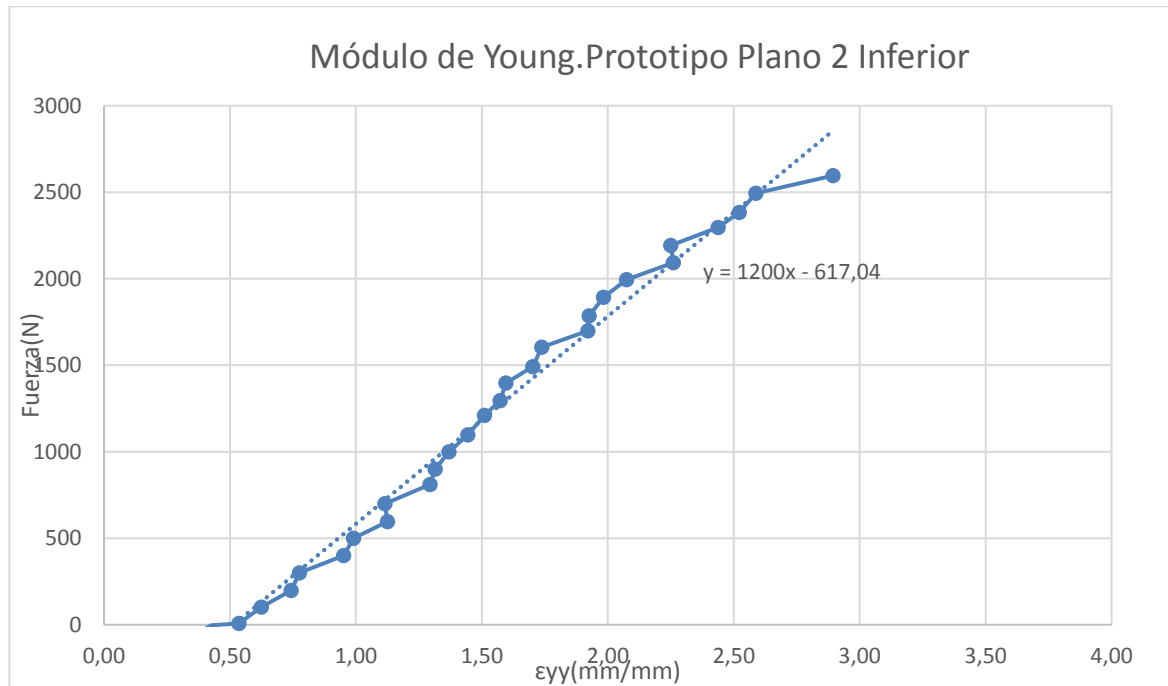


Figura 72 Zona Inferior captura desplazamientos Férula Plana 1

En esta zona inferior, calculamos las deformaciones de los puntos seleccionados para cada una de las fotos y con dichos datos obtenemos las deformaciones e introduciendo la fuerza a la que se producen cada una de las capturas:



Gráfica 35 Módulo de Young del Prototipo 3 en zona Inferior

Midiendo el área y los datos necesarios, podemos calcular la rigidez local del punto deseado

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

Para el cálculo de la sección:

$$S_{inferior} = 775 \text{ mm}^2 = 0,775 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Y la longitud de las probetas como hemos calculado antes resulta:

$$l_0 = 150 \text{ mm}$$

Sustituyendo todos los términos obtenemos, sabiendo la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 775,3x - 4,8$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{770,5}{\frac{1 \text{ mm}}{150 \text{ mm}} * 0,775 * 10^{-4} \text{ m}^2} * 10^{-6} = 14,9 \text{ MPa}$$



### 9.1.4 Conclusión Segundo Ensayo

Una vez obtenido los datos del módulo de Young podemos observar que hemos obtenidos unos valores bastante más pequeños que los deseados(30 % menos), esto es debido a varios factores , en primer lugar al modificar su geometría aumentando la temperatura del modelo hemos podido variar las características del material, por otro lado al variar su superficie, las caras extremas no quedan perfectamente paralelas, aunque hemos hecho todo lo posible por que así sea, por ello la carga seguramente no se ha aplicado en todo el área deseado y tampoco se ha apoyado en la parte inferior, completamente en el área, esto puede provocar que las condiciones del ensayo no sean iguales a las deseadas y que la carga no se aplique totalmente vertical pudiendo tener un componente a cortante, por último otro factor que ha podido afectar a la obtención de la resistencia corresponde a que en el modelo de CAD 3D suponemos un cierre perfecto de forma que no sea una parte del modelo donde se produzca una gran concentración de tensiones que provoquen que sea la parte menos resistente de este, cosa que podemos comprobar con los datos que obtuvimos que si ocurre con el modelo imprimido.

## 9.2 Segundo Ensayo

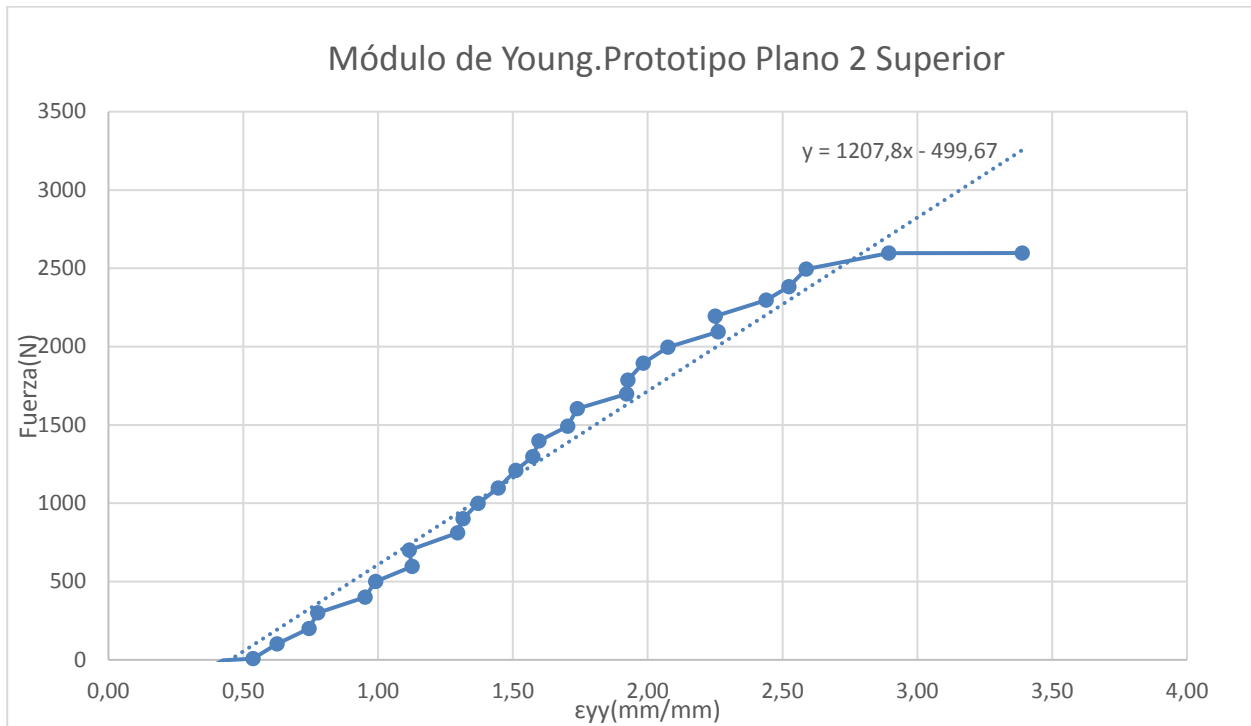
### 9.2.1 Segundo Ensayo en zona superior

Para esta segunda probeta, usaremos el modelo de unión completa, con el uso de este modelo buscamos un aumento significativo de la resistencia del material.



Figura 73 Probeta Órtesis PLA 2

Postprocesado los datos mediante la Videocorrelación comparando los desplazamientos de los puntos inferiores y obteniendo con ellos las deformaciones podemos hallar la variación del módulo de Young, el cual resulta:



Gráfica 36 Módulo de Young del Prototipo 1 en zona Superior

Con estos datos podemos proceder al cálculo de la rigidez local en dicho punto en MPa

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

Para el cálculo de la sección, midiendo en la parte superior, para el modelo de CAD 3D:

$$S_{superior} = 576 \text{ mm}^2 = 0,576 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Siendo la longitud de las probetas que hemos medido anteriormente:

$$l_0 = 150 \text{ mm}$$

Conociendo la pendiente de la línea media:

$$y = 1207,8x - 499,67$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{708,13}{\frac{1mm}{150mm} * 0,576 * 10^{-4}m^2} * 10^{-6} = 18,4 MPa$$

### 9.2.2 Segundo Ensayo en zona media

Realizando el mismo ensayo que en el caso anterior pero para la zona media, los resultados obtenidos por a Videocorrelación, esta parte corresponde:

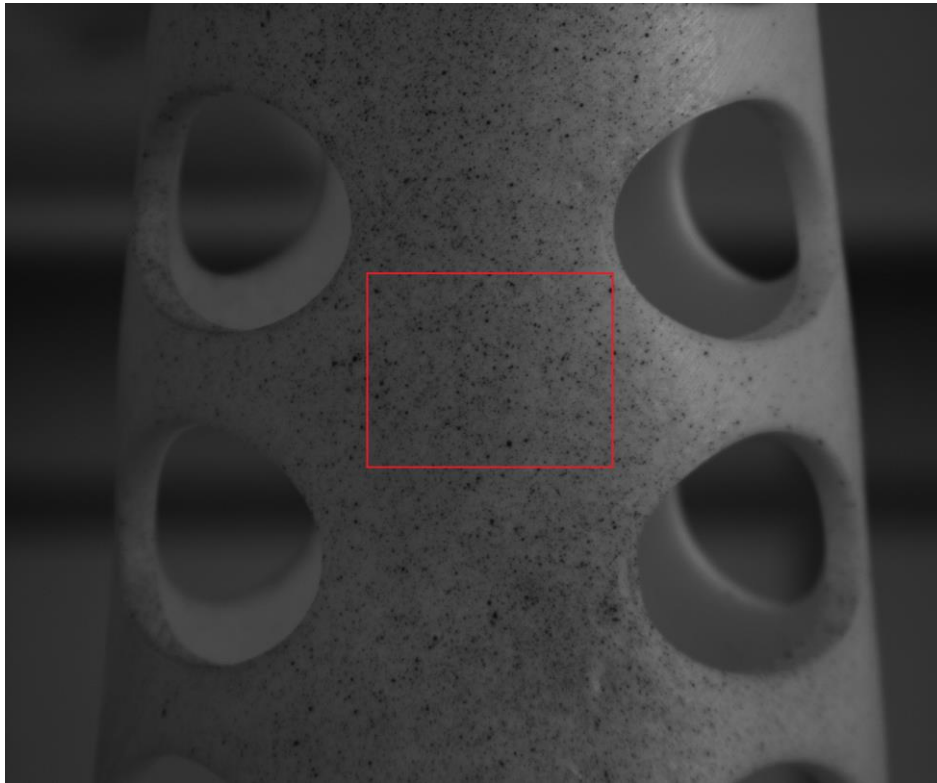
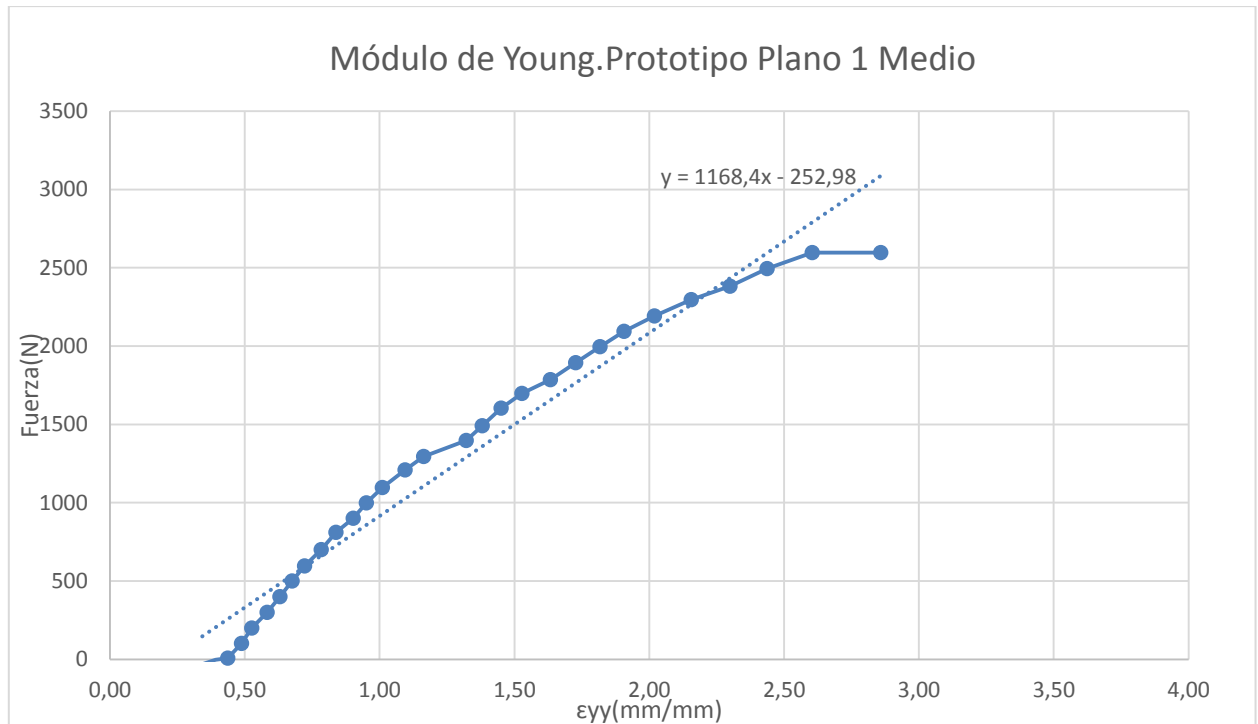


Figura 74 Zona Media captura desplazamientos Férula Plana 2

Realizando el mismo ensayo que en el caso anterior capturando los datos de la zona anteriormente expuesta, los resultados obtenidos por a Videocorrelación y posteriormente usando estos datos y comparándolos en el programa Excel con la fuerza obtenida asociada a dichos desplazamientos para las distintas fotos durante la aplicación del ensayo



Gráfica 37 Módulo de Young del Prototipo PLA 2, zona Media

Como hemos explicado en el caso anterior, conociendo el área y los demás valores, podemos proceder al cálculo de la rigidez local en dicho punto en MPa

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

Para el cálculo de la sección, calculándola en el modelo de CAD 3D para el punto medio de la sección, a una altura de 75 mm respecto a la base, sabiendo que la de ambos extremos resulta:

$$S_{inferior} = 774 \text{ mm}^2 = 0,774 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$S_{superior} = 576 \text{ mm}^2 = 0,576 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Por tanto en el punto intermedio resulta:

$$S_{medio} = 675 \text{ mm}^2 = 0,675 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Y la longitud de las probetas medidas antes resulta:

$$l_0 = 150 \text{ mm}$$

Sustituyendo todos los términos obtenemos, sabiendo la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 1168,4 x - 252,98$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{915,42}{\frac{1mm}{150mm} * 0,675 * 10^{-4}m^2} * 10^{-6} = 20,3 MPa$$

### 9.2.3 Segundo Ensayo en zona inferior

Usando ahora la parte inferior de la probeta, los desplazamientos de los puntos respecto al tiempo y las fotografías asociadas para cada uno de ellos:

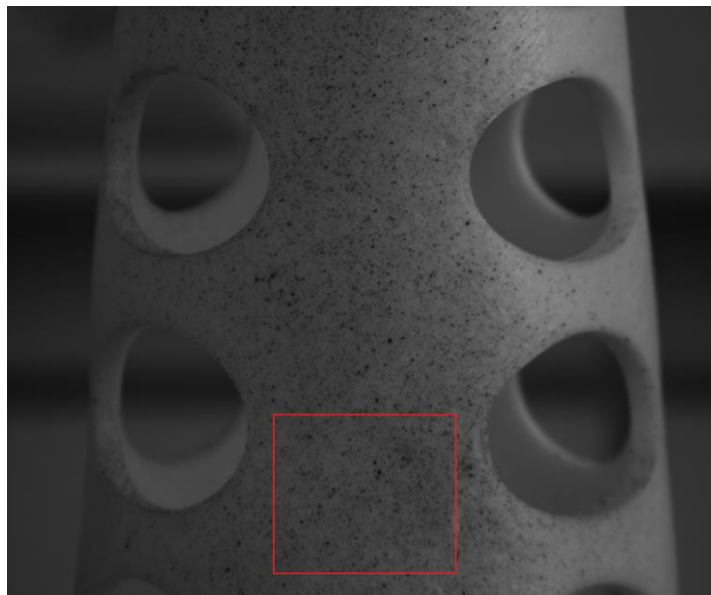
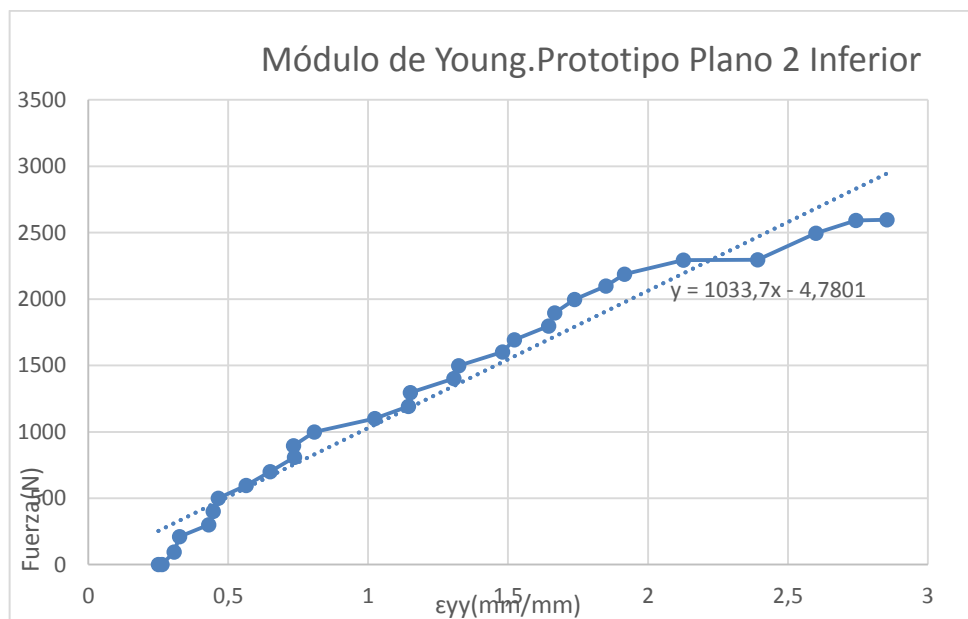


Figura 75 Zona Inferior captura desplazamientos Férula Plana 2

Como en los casos anteriores podemos observar que los desplazamientos que se obtienen son negativos, esto es debido a que realizamos un ensayo de compresión, y en la máquina MINI-BIONIX II este movimiento está definido como negativo siendo la tracción positiva. Partiendo de los desplazamientos obtenemos las deformaciones longitudinales en el modelo y la comparamos respecto a la fuerza aplicada en cada una de las fotos para los distintos momentos resultando:



Gráfica 38 Módulo de Young del Prototipo PLA plano 2 en zona Inferior

Con la obtención del área asociada a dicho punto, como en los casos anteriores:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

La sección para un cilindro hueco corresponde:

$$S_{inferior} = 774 \text{ mm}^2 = 0,774 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Y la longitud de las probetas como hemos calculado antes resulta:

$$l_0 = 150 \text{ mm}$$

Sustituyendo todos los términos obtenemos, sabiendo la pendiente de la línea de pendiente media:

$$y = 1033,7 \times 10^{-4},78$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L} * S} = \frac{1028,92}{\frac{1 \text{ mm}}{150 \text{ mm}} * 0,774 * 10^{-3} \text{ m}^2} * 10^{-6} = 19,9 \text{ MPa}$$

#### 9.2.4 Conclusión Segundo Ensayo

Comparando los resultados anteriores podemos ver que al realizar una mejor fijación de la zona de conexión, el módulo de Young ha aumentado casi en 5 MPa, esto quiere decir que teníamos razón con que aumentando la resistencia de esta parte de la férula esta provocaría un aumento de la resistencia. Por ello creemos que todavía podemos mejorar la conexión entre ambos extremos y así además conseguimos que las caras resulten totalmente paralelas de forma que la carga se aplique totalmente axial a la geometría a ensayar, podríamos cuantificar la variación de las propiedades que se producen debido al aumento de temperatura.

## 10 CONCLUSIÓN

Como conclusión de este proyecto, podemos decir que hemos conseguido la finalidad de este, que consistía en definir un prototipo de férula en PLA que cumpliera las mismas especificaciones que los modelos tradicionales de Yeso París, después de caracterizar la órtesis y de diseñar los modelos de PLA, ensayándolos también a su vez para comprobar que cumplían los requerimientos de resistencia con los que se habían diseñado, tanto el modelo vertical como la impresión plana.

Con todos estos datos, podemos decir que hemos conseguido un modelo que presenta unas características mejores respecto a resistencia y rigidez que el Yeso París. A nivel de funcionalidad resulta un modelo mucho más ligero, de menor espesor, y con una mayor transpirabilidad debido a la dimensiones de los agujeros que permiten hasta poder rascarse en las zonas de mayor irritabilidad. Además el material utilizado de impresión, el PLA es de origen natural, se puede mojar lo cual da una mayor comodidad al usuario, ya que puede realizar cualquier actividad, tanto en invierno como en verano. Por otro lado el proceso de fabricación, es un poco más largo que el de Yeso París pero es mucho menos sucio, además de que las propias ortopedias podrían tener su propia impresora y no tener el paciente que moverse hasta un centro de salud, como en la actualidad, coger cita y esperar hasta que exista un técnico que les pueda atender, por lo que a la larga resultaría menos tiempo, con la intervención de menos personal y con la utilidad de no tener que desplazarse a otro sitio al paciente. Por otro lado, las órtesis de PLA son más baratas 2€, frente a los 3-4€ que cuesta el yeso París. [18]

Por otro lado tenemos que decir que nosotros hemos realizado los diseños tomando mediciones en un brazo para adaptar el prototipo a dicha extremidad, pero que con las tecnologías existentes hoy en día se puede escanear el brazo deseado a inmovilizar y tomando el negativo de este, tener un diseño que se adapte totalmente a dicha extremidad e incluso mediante unos algoritmos predecir cómo se debería de comportar el hueso durante la sanación de este para utilizar una férula que facilite, mejore y reduzca el tiempo de curación. Por tanto se puede decir que el material y el proceso de fabricación se adaptan bastante bien al modelo deseado y por lo visto en este proyecto y en la bibliografía documentada, en pocos estos modelos sustituirán completamente a los de la órtesis actual.

Respecto a los modelos actuales, los imprimidos verticalmente se pueden adaptar mejor y ser más eficientes que los que imprimimos en plano, tanto con los modelos de diseño y fabricación que hemos utilizado en este proyecto (mediciones y aplicación de calor) como teniendo a disposición un escáner que permita obtener una réplica exacta de la extremidad a inmovilizar. Ya que las horizontales es verdad que en un principio podrían presentar más resistencia, si la carga fuera axial, paralela al eje longitudinal, que además de no ser así ya que durante su vida la férula va a recibir cargas de diferente índole, para imprimir modelos verticales usando los obtenidos por el escáner, con dos particiones necesitaríamos el uso de soportes, lo que provocaría un aumento tanto del coste como del tiempo de impresión.

Como futuros estudios del proyecto, me gustaría haber realizado más ensayos y diseños, centrados principalmente en el cierre del modelo, ya que pienso que con pocas iteraciones más se podría haber llegado a un modelo totalmente funcional y que permitiera que se pudiera desmontar, tanto para una revisión como con alguna otra finalidad y después volver a cerrarse de una manera mucho más ergonómica y rápida.

Por otro lado me he quedado con las ganas también de estudiar en mayor profundidad el comportamiento del PLA frente al calor y como varían sus propiedades frente a él, y pienso que es un campo de estudio muy interesante y que puede provocar que se amplíe el abanico de usos que tienen la impresión 3D actualmente.

Modelos	Yeso	PLA Vertical	PLA Plano
<b>Características</b>			
<b>Rigidez</b>	35 MPa	37 MPa	18 MPa
<b>Precio</b>	3-4€	3,31 €	3,31 €
<b>Espesor</b>	8-10 mm	3,6 mm	3,6 mm
<b>Densidad</b>	2,96 g/cm <sup>3</sup>	1,24 g/cm <sup>3</sup>	1,24 g/cm <sup>3</sup>
<b>Peso</b>	213 g	150,34 g	106,34 g
<b>Tiempo Fabricación</b>	20 min(necesidad de operario y paciente)	10 horas (impresión 3D)	8 horas y 45 min
<b>Propiedades</b>	- $\rho = 2,96 \text{ cm}^3$ -Heterogéneo -Rotura Frágil	- $\rho = 1,24 \text{ g/cm}^3$ -Alturacapa=0,1 mm -% relleno= 100%	- $\rho = 1,24 \text{ cm}^3$ -Alturacapa= 0,2 mm -% relleno= 60 %
<b>Comodidad Usuario</b>	-No transpirable -No se puede mojar -Falta de higiene -Irritación piel -No inspección visual	-traspirable(huecos) -Se puede mojar -Inspección visual	-traspirable(huecos) -Se puede mojar -Inspección visual
<b>Adaptabilidad</b>	Molde se ajusta a posición hueso	Puede predecir y reducir tiempo rehabilitación	Puede predecir y reducir tiempo rehabilitación



# 11 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «fisioterapiaonline,» [En línea]. Available: <https://www.fisioterapia-online.com/videos/fracturas-de-muneca-radio-y-cubito-fases-de-curacion-y-tratamiento>. [Último acceso: 2017].
- [2] «kidshealth,» [En línea]. Available: <http://kidshealth.org/es/kids/casts-esp.html>. [Último acceso: 2017].
- [3] Autor, «Este es el ejemplo de una cita,» *Tesis Doctoral*, vol. 2, nº 13, 2012.
- [4] «wikipedia,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Escayola>. [Último acceso: 2017].
- [5] «hxx,» [En línea]. Available: <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>. [Último acceso: 2017].
- [6] «wikipedia,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Impresi%C3%B3n\\_3D#cite\\_note-2](https://es.wikipedia.org/wiki/Impresi%C3%B3n_3D#cite_note-2). [Último acceso: 2017].
- [7] «hxx,» [En línea]. Available: <http://hxx.es/2015/03/23/materiales-de-impresion-3d-ii-abs-acrilonitrilo-butadieno-estireno/>. [Último acceso: 2017].
- [8] «makershop,» [En línea]. Available: <https://makershopbcn.com/abs-vs-pla-que-diferencia-existe-entre-estos-dos-filamentos-para-impresora-3d>. [Último acceso: 2017].
- [9] «wikipedia,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo\\_de\\_los\\_elementos\\_finitos](https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos). [Último acceso: 2017].
- [10] «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Ley\\_de\\_elasticidad\\_de\\_Hooke](https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_elasticidad_de_Hooke). [Último acceso: 2017].
- [11] «grupoalava,» [En línea]. Available: <http://www.grupoalava.com/ingenieros/actualidad/sistema-de-videocorrelacion-vic-3d/>. [Último acceso: 2017].
- [12] «AlavaIngenieros,» [En línea]. Available: <http://www.grupoalava.com/ingenieros/productos/instrumentacion-y-ensayos/sistemas-para-ensayos/ensayos-de-materiales-y-no-destructivos/ensayos-de-materiales/image-correlation---videocorrelacion/>. [Último acceso: 2017].
- [13] «zagan,» [En línea]. Available: [https://zagan.unizar.es/record/7414/files/TAZ-TFG-2012-234\\_ANE.PDF](https://zagan.unizar.es/record/7414/files/TAZ-TFG-2012-234_ANE.PDF). [Último acceso: 2017].
- [14] «sandvik,» [En línea]. Available: [https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/general\\_turning/formulas-and-definitions/pages/default.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/general_turning/formulas-and-definitions/pages/default.aspx). [Último acceso: 2017].
- [15] «Wikipedia,» [En línea]. Available: <https://www.bq.com/es/pla>. [Último acceso: 2017].
- [16] «El confidencial,» [En línea]. Available: [https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2016-08-09/xkelet-escayola-impresion-3d-traumatologia\\_1244136/](https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2016-08-09/xkelet-escayola-impresion-3d-traumatologia_1244136/). [Último acceso: 2017].

- [17] «imprimalia3D,» [En línea]. Available: <http://imprimalia3d.com/noticias/2013/09/28/0090/la-3d-como-sustituto-de-la-escayola-en-las-fracturas-seas>. [Último acceso: 2017].
- [18] «github,» [En línea]. Available: <https://github.com/Foxandxss/tutoriales-impresora-3d/blob/master/simplify3d.md>. [Último acceso: 2017].
- [19] «Leon3d,» [En línea]. Available: <http://www.leon-3d.es/guia-de-resolucion-de-problemas/>. [Último acceso: 2017].
- [20] «Spainlabs,» [En línea]. Available: <https://www.spainlabs.com/foros/tema-GUIA-DEFINITIVA-de-impresion-3d-todos-tus-problemas-resueltos--5081>. [Último acceso: 2017].
- [21] «Foro minifab,» [En línea]. Available: <http://foro.minifab.es/t/deja-de-extruir-con-paredes-estrechas/52>. [Último acceso: 2017].
- [22] «Impresoras 3d,» [En línea]. Available: <https://impresoras3d.com/blogs/noticias/122774855-filamento-pla-consejos-caracteristicas-y-mucho-mas>. [Último acceso: 2017].
- [23] «trimaker,» [En línea]. Available: <https://trimaker.com/consejos-imprimir-3d-velocidad/>. [Último acceso: 2017].
- [24] W. C. S. F. A. C. Miguel Fernandez-Vicente, «liebertpub,» [En línea]. Available: <http://online.liebertpub.com/doi/full/10.1089/3dp.2015.0036>.
- [25] «scielo,» [En línea]. Available: <http://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v24nEspecial/art03.pdf>. [Último acceso: 2017].
- [26] «Promofarma,» [En línea]. Available: <https://www.promofarma.com/salud/ortopedia/sistemas-de-sujecion/venda-enyesada>. [Último acceso: 2017].
- [27] O. Autor, «Otra cita distinta,» *revista*, p. 12, 2001.
- [28] jaedo, «colido,» [En línea]. Available: <http://colido.es/impresion-3d-y-protesis>. [Último acceso: 2017].

# 12 ANEXOS

## Anexo A: Ensayos de compresión PLA

Los ensayos de compresión que vamos a exponer a continuación, son los resultados de los realizados por Alicia Pais en el departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de Sevilla durante 20015, los resultados de estos los hemos utilizado durante nuestro proyecto para definir la resistencia que presentaba el PLA en función de la variación de altura de capa y porcentaje de espesor, por tanto agradecer a ella y a mi tutora, Esther Reina, por facilitarme estos datos y así poder realizar un trabajo fin de máster más completo.

PLA [MPa]		30 %	60 %	100 %
0.1	1	885.9	1744.0	3168.6
	2	799.5	1535.1	3336.6
	3	824.3	1477.8	3511.1
	4	812.3	1582.8	2795.3
	5	953.9	1607.3	3301.1
0.2	1	948.7	1335.6	3796.2
	2	818.1	1190.3	3475.2
	3	845.3	1354.5	3407.7
	4	754.6	1190.4	3284.9
	5	921.8	1380.2	3265.0
0.3	1	837.2	1534.1	2973.0
	2	916.4	1719.7	2901.6
	3	776.9	1461.0	3202.1
	4	880.1	1386.7	2904.6
	5	844.4	1407.7	2740.7



