

# Proyecto Fin de Carrera

Fabricación aditiva, aplicación a órtesis de la  
extremidad inferior

Autor

Ana Belén Gilarte Gómez

Director

José Luis Huertas Talón

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación

Diciembre 2013



*Me gustaría dedicar este proyecto a todas las personas que me han apoyado y ayudado a lo largo de este período de mi vida. En general, a todos mis amigos y familiares que nunca han dudado de mí y me han animado a continuar.*

*A mis padres y a mi hermana que siempre han confiado en mí.*

*A Sergio por ayudarme simplemente con su presencia.*

*Al director del proyecto, José Luis Huertas, por su ayuda y asesoramiento y a César García por su colaboración con muy buenas ideas.*

## RESUMEN

La fabricación aditiva es un método de elaboración de piezas basada en la deposición de material que posteriormente será consolidado. La impresión 3D, incluida en este grupo, fabrica sus piezas a partir de la consolidación de un composite de alto rendimiento mediante un aglutinante (que puede ser de color o transparente). Para la realización de este proyecto se dispone de una impresora 3D Zprinter 650.

La aplicación que se ha estudiado ha sido la posibilidad de fabricar mediante esta tecnología una órtesis para el conjunto pierna-pie que ayude a levantar el pie al caminar a una persona que tiene imposibilitada esta acción a causa de un problema neurológico. Para ello, analizando la anatomía del pie y sus restricciones de movimiento, se ha diseñado una férula articulada compuesta por dos partes, la inferior y la superior; que giran una con respecto a la otra por la acción de un muelle de torsión unido a las dos. Este muelle debe contrarrestar el peso del pie caído y elevarlo.

Para que la férula posea la resistencia adecuada se han estudiado una serie de adhesivos con los que puede ser impregnada: Araldite 2020, cianocrilato y poliuretano alifático. Además, se ha analizado la posibilidad de dotarla con una estructura para que la férula sea más ligera. Se han desarrollado las estructuras Kelvin, cúbica simple, cónica centrada en el cuerpo y maciza. Estos análisis se han llevado a cabo realizando probetas con diferentes combinaciones de adhesivo y estructura; realizando ensayos de tracción y de avance de grieta según las normas UNE-EN ISO 527-2 *Determinación de las propiedades en tracción* y UNE-EN ISO 17289:2009 *Ensayos de propagación de grietas utilizando probetas prefisuradas* respectivamente. Los resultados de estos ensayos muestran que el aditivo más resistente es el Araldite 2020, basado en resina epoxi. Del mismo modo estos ensayos definen la estructura maciza como la más fuerte.

Además se ha comparado este sistema de fabricación con el mecanizado de un bloque de polipropileno mediante una fresadora de tres ejes, ya que esta tecnología se utiliza actualmente para la fabricación de plantillas. También se ha realizado un estudio económico de cada uno de los métodos para comprobar si su explotación es rentable y compararlos entre sí. En él se ha visto que sería más rentable la fabricación mediante impresión 3D obteniéndose la recuperación de la inversión en el segundo año.

Para el desarrollo de este proyecto se han utilizado diferentes programas: Solid Edge y Rhinoceros para el diseño, Netfabb para la reparación de mallas y aplicación de estructuras, Edge-CAM para la simulación del mecanizado y Zprint para lanzar las impresiones a la impresora 3D.

## INDICE DE CONTENIDOS

### MEMORIA

<b>1. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>8</b>
Fabricación aditiva .....	8
Impresión 3D.....	10
Problema podológico: marcha equina.....	11
<b>2. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>12</b>
Motivación .....	12
Objetivo del proyecto .....	12
Contenido .....	12
<b>3. DISEÑO DE LA FÉRULA ARTICULADA .....</b>	<b>14</b>
Elección del muelle de torsión .....	18
<b>4. ELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA .....</b>	<b>20</b>
<b>5. ESTUDIO DE DIFERENTES ADHESIVOS.....</b>	<b>22</b>
<b>6. ENSAYOS.....</b>	<b>24</b>
Tipos de probetas.....	24
Ensayo de tracción.....	25
Interpretación de los resultados .....	27
Ensayo de avance de grieta.....	29
Interpretación de los resultados .....	31
Dificultades.....	32
<b>7. PROGRAMAS UTILIZADOS .....</b>	<b>34</b>
<b>8. COMPARACIÓN CON OTRO MÉTODO (MECANIZADO).....</b>	<b>36</b>

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>9. ESTUDIO ECONÓMICO.....</b>	<b>39</b>
<b>10. CONCLUSIONES.....</b>	<b>43</b>
<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....</b>	<b>44</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>45</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>46</b>
 <b>ANEXOS</b>	
<b>A1. Z-PRINTER 650 .....</b>	<b>48</b>
Materiales.....	48
Descripción.....	48
Funcionamiento .....	49
Mantenimiento .....	50
<b>A2. GUÍA DE USO DE NETFABB.....</b>	<b>51</b>
Elección o diseño de la estructura.....	51
Aplicación a una probeta .....	54
Aplicación a la férula.....	59
<b>A3. PROCESO DE PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS PARA LOS ENSAYOS .....</b>	<b>64</b>
<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....</b>	<b>68</b>

# **MEMORIA**

## 1. ESTADO DEL ARTE

### Fabricación aditiva

La fabricación aditiva es un método de fabricación de piezas a partir de un modelo en 3D. Al contrario que los métodos de mecanizado, basados en la eliminación de material, como se ve en la tabla 1, este método se basa en la deposición de un material y su posterior consolidación por diferentes procesos [1,2].

Existen diferentes modalidades de fabricación aditiva, dependiendo del material básico, su estado y del método de consolidación.

Tabla 1. Diferentes métodos de fabricación aditiva.

Estado Material Básico	Variantes	Métodos	Materiales utilizados
LÍQUIDO	Solidificación de líquidos poliméricos	Mediante láser Estereolitografía (STL)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fotopolímeros</li> <li>• Resinas rellenas (cristal, metal, cerámica)</li> </ul>
		Mediante Rayos UV Polyjet	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polímero acrílico</li> </ul>
	Solidificación de material fundido	Deposición de hilo fundido (FDM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polímeros</li> <li>• Cera</li> <li>• Metales y cerámicas con aglutinante</li> </ul>
POLVO		Deposición de gotas (IPJ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polímeros</li> <li>• Cera</li> </ul>
		Impresión 3D (3DP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cerámica</li> <li>• Metal + Aglutinante</li> <li>• Polímero</li> </ul>
		Sinterizado Láser (SLS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polímeros</li> <li>• Metales</li> <li>• Cerámicas</li> </ul>
LÁMINAS SÓLIDAS		Revestimiento Láser	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metales</li> </ul>
		Unión con adhesivo (LOM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Papel</li> <li>• Polímeros</li> <li>• Composites</li> <li>• Cerámica</li> <li>• Metales</li> </ul>
		Unión con luz (SFP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polímeros fotosensibles</li> </ul>

Utilizado en primera instancia para la realización de prototipos, el uso de la fabricación aditiva ha evolucionado hacia la producción de piezas funcionales. Este hecho trae consigo un cambio

en el sistema de producción industrial, que ha llevado a algunos investigadores a afirmar que la fabricación aditiva supondrá una nueva revolución industrial, equiparando la invención de este sistema de fabricación al de la máquina de vapor [3].

La fabricación aditiva se puede aplicar a múltiples campos:

- Medicina: fabricación de prótesis a medida, piezas dentales y generación de tejidos orgánicos [4].
- Arqueología: reproducción de elementos encontrados en yacimientos para su estudio por parte de diferentes especialistas evitando el daño de la pieza original [5].
- Investigación forense: se puede hacer una reproducción del cráneo de una persona asesinada de un disparo en la cabeza para averiguar con qué tipo de arma se le ha disparado y la trayectoria seguida por la bala.
- Industria: con este método se pueden crear piezas únicas sin el coste añadido de los moldes para la producción.
- Cine: la técnica de animación *stop motion* está empleando impresoras 3D para la fabricación de sus personajes.

Las principales ventajas de este sistema de producción con respecto a otras tecnologías son:

- Ahorro de los costes de moldes y utillajes y por tanto flexibilidad para tamaños de lote pequeños.
- No necesita procesos de acabado.
- Disminución del tiempo de desarrollo del producto.
- No existe desperdicio de material.
- Se puede utilizar en piezas de repuesto, sin necesidad de previsión.
- Fabricación de formas complejas.

También tiene algunas particularidades que hacen que la fabricación aditiva no sea recomendable para ciertos casos:

- Resistencia de las piezas menor que con otras tecnologías
- Mayor precio para grandes lotes de producción
- Precisión más baja
- Limitación de materiales

## Impresión 3D

Se puede analizar el impacto que está teniendo esta tecnología en el mercado observando la evolución de la curva de sobreexpectación de Gartner de julio de 2013, que muestra el grado de madurez, adopción y aceptación comercial de las tecnologías emergentes [6].

Este ciclo se divide en 5 partes diferenciadas:

- Lanzamiento: la nueva tecnología es presentada a los medios. De momento no existen prototipos ni estudio de viabilidad del producto.
- Pico de expectativas sobredimensionadas: la publicidad genera expectativas no realistas. Algunas empresas se lanzan a probarla obteniendo tanto éxitos como fracasos.
- Abismo de desilusión: las expectativas no se cumplen y la tecnología deja de ser publicitada. Las inversiones continúan si los proveedores mejoran los productos.
- Rampa de consolidación: se ven los beneficios que aporta la implantación de la nueva tecnología ya que se ha mejorado el producto creando expectativas más realistas.
- Meseta de productividad: la viabilidad de la implantación de la tecnología está más definida y la tecnología se asienta en el mercado.

Analizando la situación de la impresión 3D en la curva a lo largo de los últimos años se ve que se introdujo en el año 2008 entre las dos primeras fases, donde se mantuvo hasta el año 2012. Ese año se situó en la cúspide de la segunda fase. Actualmente se encuentra en la cuarta fase del ciclo: algunas empresas están realizando estudios en profundidad para incorporar esta tecnología en sus procesos de producción y otras crean programas piloto para ello mientras que las empresas conservadoras se mantienen cautias. Se prevé que de 2 a 5 años esté asentada en el mercado.

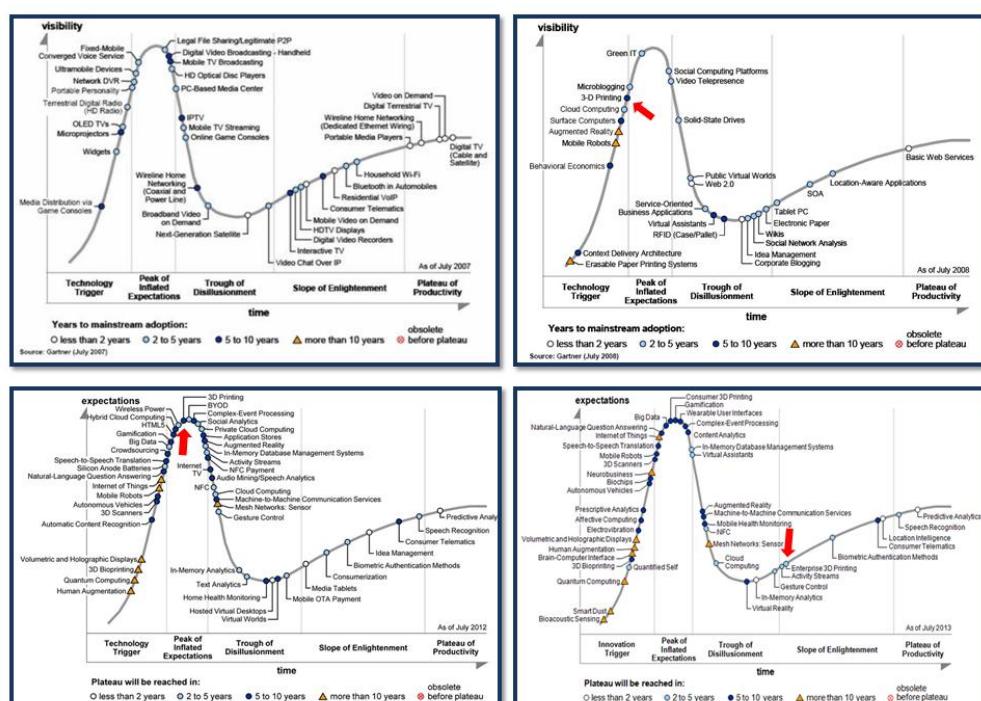


Ilustración 1 Curvas de Sobreexpectación de los últimos 6 años.

## Problema podológico: marcha equina

La marcha equina es causada por una parálisis de los músculos pretibiales o peroneros. Se presenta con incapacidad de dorsiflejar y hacer eversión del pie, es decir la persona que lo padece no puede flexionar hacia arriba el pie al caminar por lo que arrastra la punta, produciendo tropiezo en algunos casos. Comúnmente se llama pie caído [7]. Esta disfunción puede ser debida a una parálisis cerebral, accidente cardiovascular, esclerosis múltiple o espina bífida.

En la ilustración 2 pueden verse marcados en rojo, la postura del pie que una persona que presenta marcha equina en el pie derecho no puede adoptar.

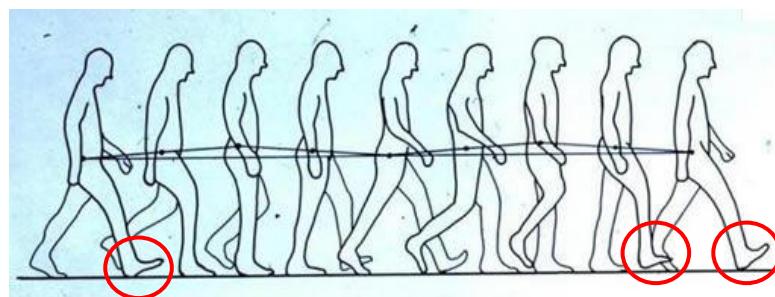


Ilustración 2. Desplazamiento normal de una persona [8].

Para ayudar al paciente actualmente se le prescribe una férula rígida que fija el ángulo del pie a 90°, evitando así que la persona tropiece al caminar. Esta corrección causa un movimiento antinatural en los adultos mientras que en el caso de los niños provoca, además, que el crecimiento no se desarrolle de manera adecuada, permaneciendo las fibras más cortas de lo normal y el tobillo rígido, sin ninguna movilidad.

## 2. INTRODUCCIÓN

### Motivación

La empresa Podoactiva S.L, dedicada a la podología, ortopedia y biomecánica, contactó con la Escuela Universitaria de Ingeniería y Arquitectura debido a la necesidad de creación de una órtesis que permitiera corregir la deficiencia que una persona aquejada de marcha equina tiene al caminar. Después de una entrevista con ellos se llegó a la conclusión de que la solución sería una férula articulada que, además, ayudara a la persona a levantar el pie evitando así el tropiezo.

Barajando los distintos materiales con los que se podría trabajar se pensó en utilizar la impresora 3D Zprinter situada en el *Centro Integrado de Formación Profesional Corona de Aragón*. Utilizada hasta ahora para la fabricación de prototipos, esta impresora utiliza una base de composite de alto rendimiento que se consolida con un aglutinante que hace, a su vez, la función de tinta coloreando las piezas. Las propiedades de estos materiales no serían las adecuadas para la realización de piezas funcionales, por ello se planteó la impregnación con un adhesivo tras el proceso de impresión.

Teniendo en cuenta que mediante la impresión 3D se pueden fabricar piezas completamente personalizables se decidió completar el estudio de la férula articulada con el de fabricación de piezas funcionales con una máquina hasta ahora utilizada para la elaboración de prototipos.

### Objetivo del proyecto

Con este proyecto se pretende diseñar una férula articulada dotada de unos materiales con unas características tales que, siendo impresa en una impresora 3D, permitan que la férula pueda ser utilizada de manera regular por el paciente. Los materiales con los que se va a experimentar son los adhesivos con que se impregna la pieza una vez es fabricada, ya que la impresora Zprinter 650 funciona con un composite especial que no puede ser sustituido.

Para la realización de este estudio se considerarán diferentes estructuras con las que pueda estar dotada la férula. Estas estructuras proporcionarán ligereza a la pieza y ejercerán de depósito del adhesivo con el que sean impregnadas.

Además se quiere demostrar que la fabricación de la férula por este método de producción es el más adecuado.

### Contenido

Se comenzará con los pasos seguidos para el diseño de la férula articulada que permita solucionar el problema objeto de estudio. Esto es, una férula articulada consistente en dos partes conectadas por un muelle de torsión que eleva la parte inferior para ayudar a la persona a caminar. Este muelle es elegido en función de las características del paciente.

La férula tiene que ir dotada con una estructura e impregnada con un aditivo, por tanto se mostrarán diferentes posibilidades y se elegirán las más representativas para realizar ensayos

de tracción y de avance de grieta, que desvelarán cuál es la combinación más adecuada para la aplicación al caso estudiado.

Otro de los posibles materiales con que fabricar la férula sería polipropileno que es utilizado actualmente para la fabricación de plantillas. Así pues se mostrará una comparación entre este método de fabricación y el mecanizado de polipropileno con una fresadora de 3 ejes. A continuación se verá un estudio económico que desvelará cuál de las dos es la opción más rentable.

Para realizar este trabajo se ha contado con diferentes programas informáticos que se detallan más adelante además de una guía de uso del programa del que se considera más desconocido por venir de la mano de la fabricación aditiva.

Para terminar, en los anexos, se incluyen las diferentes partes y el funcionamiento de las impresoras 3D, más concretamente del modelo del que se dispone para la realización de este proyecto así como una guía de uso y de limpieza de la misma. También, una descripción del proceso de preparación de las probetas para los ensayos de tracción.

### 3. DISEÑO DE LA FÉRULA ARTICULADA

El objetivo de esta parte del proyecto es el diseño de una férula articulada que simule el movimiento del pie al caminar. Para ello debe llevar incorporado un mecanismo que produzca el movimiento de dorsiflexión (levantar la punta del pie) cuando se despega el pie del suelo para dar un paso. Además este movimiento se debe anular cuando el talón toca el suelo y se realiza la flexión plantar. Estos dos movimientos están limitados angularmente, el ángulo máximo de dorsiflexión es de 10° mientras que el de flexión plantar es de 20° [9].

La rotación debe realizarse en el eje que une los maléolos lateral y medial. Como se ve en la ilustración 3 el lateral se encuentra, con respecto al medial, más abajo y retrasado cuando el pie forma 90° con el eje vertical.

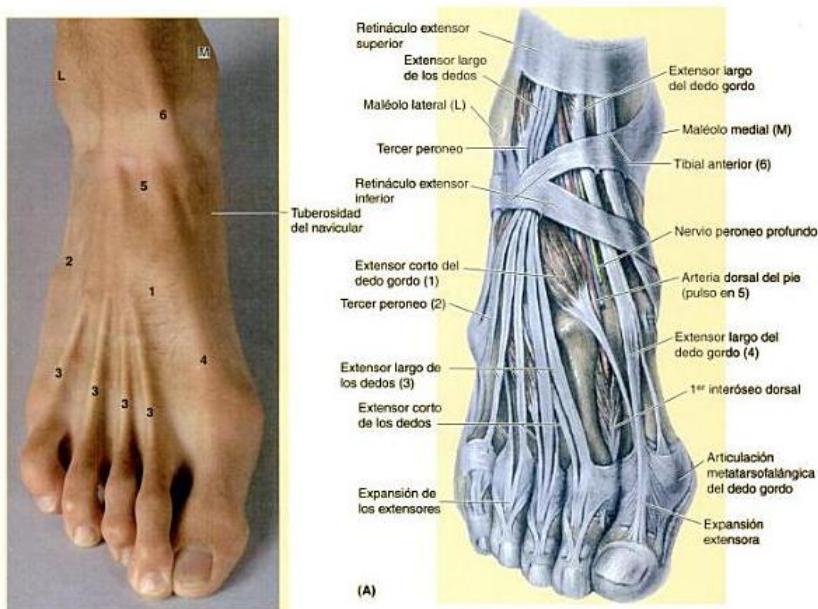


Ilustración 3. Anatomía del pie [10]

En un primer estudio se pensó en la posibilidad de utilizar un mecanismo similar al de un bolígrafo automático con dos posiciones, la del tobillo distendido y la del tobillo flexionado. Esto presentaba como principal inconveniente que el paciente tropezara y el dispositivo quedara bloqueado en la posición opuesta a la de la marcha. Esto contrariaría al paciente y haría incómoda la situación de llevar la férula.

Por esta razón se optó por un mecanismo basado en un muelle de torsión. De esta forma la férula rota alrededor del eje debido a la fuerza ejercida con el muelle y a la ejercida por el pie.

La función del muelle sería la de realizar la dorsiflexión cuando el paciente levante el pie del suelo y tiene que tener una resistencia tal que la fuerza que el paciente ejerce sobre el pie en el momento de apoyarlo contrarreste la fuerza que está realizando el muelle y permita que se produzca la flexión plantar.

En la ilustración 4 se muestra la férula rígida desde la que se parte. Esta se ha obtenido a partir del tratamiento de los datos resultantes del escaneado en 3D del pie y pierna de un paciente, es por esta razón que está mallada triangularmente. Para poder ver con mayor claridad el proceso seguido para el diseño de la férula articulada se ocultará el mallado.

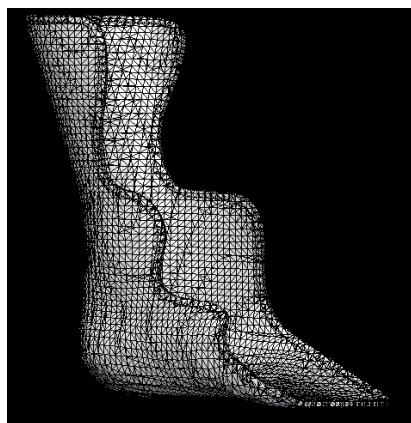


Ilustración 4. Modelo rígido proporcionado por Podoactiva

Para el diseño de esta férula se han seguido los siguientes pasos:

1. Partiendo de una férula rígida de una sola pieza se divide en dos partes, superior e inferior. La superior se ha obtenido mediante un corte por un plano oblicuo mientras que la inferior ha sido fruto de un diseño curvado que permitiera que recogiera ambos maléolos y dejara la parte de atrás descubierta.

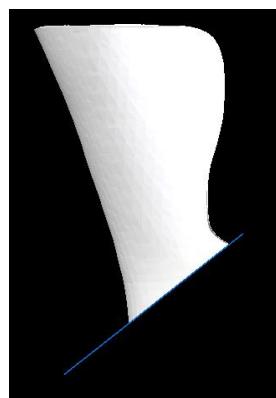
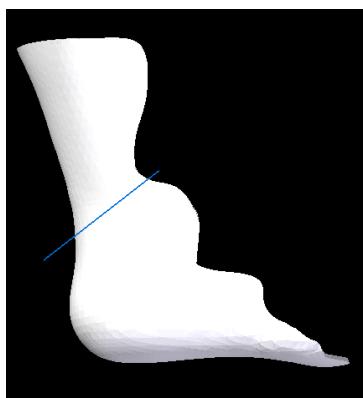


Ilustración 5. Obtención de la parte superior de la férula.

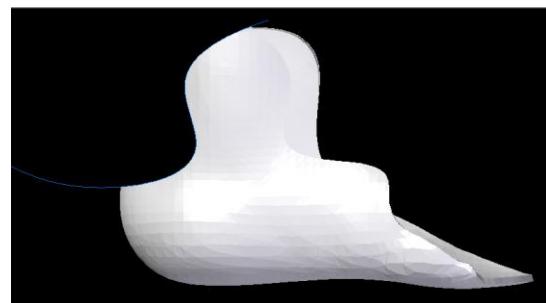
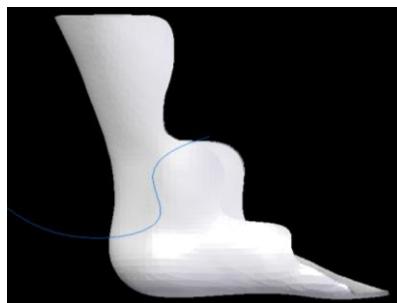


Ilustración 6. Obtención de la parte inferior de la férula.

2. Se localizan los maléolos y se traza un eje que los une. El pie se moverá realizando una rotación alrededor de ese eje. Para que la parte inferior pueda rotar con respecto a la superior es necesario extraer un eje de la inferior para realizar el acoplamiento. El diámetro de este eje vendrá determinado por el diámetro del muelle de torsión necesario según el peso del paciente. La elección del muelle se verá en el siguiente apartado.

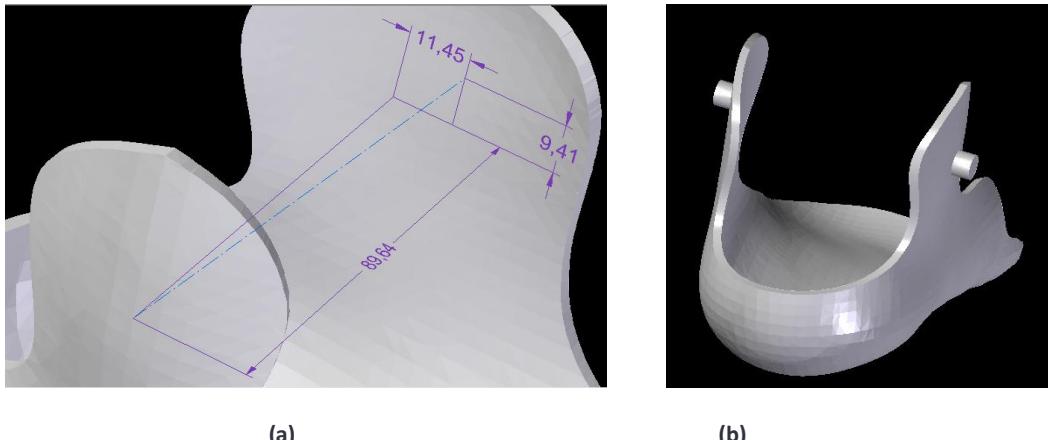


Ilustración 7. (a) Vista de las distancias entre maléolos en los tres ejes. (b) Acoplamiento de los ejes de rotación de la férula.

3. A la parte superior se le acoplan los alojamientos para el eje. Al igual que el diámetro del eje, el diámetro del alojamiento quedará determinado por el diámetro del alambre que forma el muelle. En la primera fase quedan aristas vivas que habrá que redondear para evitar acumulación de tensión en esas zonas y bordes que habrá que recortar con los programas de tratamiento de mallas.



Ilustración 8. Parte superior con acoplamientos.

4. Después se trata la pieza en Rhinos para redondear las aristas de los alojamientos del eje y a continuación se corrigen los errores resultantes de dicho redondeo (ver corrección de errores en Anexo 2). También se eliminan los bordes sobrantes con Netfabb. Se utiliza este programa porque se puede eliminar cada elemento de la malla individualmente y a continuación cerrarla para que vuelva a ser un sólido. Con Solid

Edge se podría hacer cortando la superficie, pero al estar mallada se convierte en una operación muy costosa en términos de tiempo.

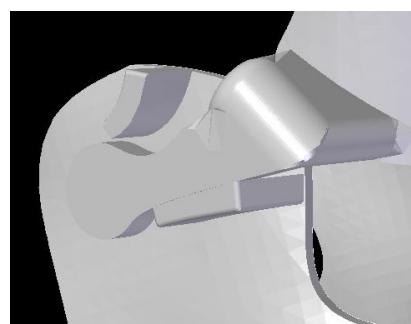


Ilustración 9. Parte superior con acoplamientos redondeada y corregida.

5. Se añaden unos limitadores de movimiento en ambos lados de la parte inferior maximizando la superficie de contacto con la parte superior para repartir los esfuerzos soportados a ambos lados de la férula. Para la colocación de estos limitadores se han tenido en cuenta los ángulos adoptados por el pie al caminar vistos al principio de esta sección.



(a)



(b)

Ilustración 10. Limitadores del movimiento en la parte exterior (a) e interior (b)

6. Por último se diseñan rendijas en la parte del empeine y pantorrilla para hacer pasar sendas tiras de velcro que sujetarán la férula al pie.



Ilustración 11. Férula completa.

Una vez terminado el diseño de la férula, es necesario definir la estructura con la que dotarla. Para ello se han realizado una serie de diseños estructurales que serán aplicados a probetas impregnadas con distintos aditivos y sometidas ensayos de tracción y crecimiento de grieta. A partir de estos ensayos se determinará la estructura y aditivo más adecuados para esta aplicación.

La estructura seleccionada se aplicará a la férula mediante el programa Netfabb (ver anexo 2).

El último paso es importar la férula con la estructura deseada al programa Zprinter y comenzar la impresión. Cuando termine este proceso se impregnará la férula con el adhesivo elegido para darle la resistencia necesaria a la pieza.

El acabado final consiste en el recubrimiento con goma eva para evitar roces con la piel.

### Elección del muelle de torsión

La colocación del muelle se realiza cuando la pieza ha curado en el acoplamiento entre las dos partes de la férula. Esto es, rodeando el eje de la parte inferior y por dentro del alojamiento de la parte superior. Las varillas del muelle irán insertadas en la dirección del eje en ambas partes.

En el cálculo del muelle de torsión necesario durante la elevación del pie, se analizan las fuerzas necesarias para levantar el pie el ángulo necesario para caminar. Con ayuda de un dinamómetro se mide que la fuerza necesaria para girar el pie los 10° del movimiento de dorsiflexión que resulta ser de 25 N a 65 mm del eje que une los maléolos. Este dato deriva en un momento aplicado de 1625 Nmm en el mismo eje. Se busca un muelle con este momento de torsión y se encuentra uno que tiene 10 mm de diámetro y 2.5 mm de diámetro del alambre. A partir de estos datos se diseñan el eje y alojamiento en sendas partes de la férula.

Para evitar que las varillas del muelle dañen la férula se pueden insertar en unos alojamientos de acero colocados previamente.

**KERN-LIEBERS TMG**

ESPAÑA

Tel: 093-6926493

Fax: 093-5802491

info@kern-liebers-tmg.es

**Torsion springs**

**Wire EN 10270-3-1.4310**

Product No. right wound	Product No. left wound	Wire dia d [mm]	Iner dia Di [mm]	Arbor dia Dd [mm]	Active coils n	Leg length Ls [mm]	Max torsion angle an [°]	Max torque Mn [Nmm]	Spring rate [Nmm/°]	Leg position [°]	Picture	Price group
RSF-1220-R	RSF-1220-L	1,60	18,40	16,50	7,00	60,00	205,33	484,53	2,36	0	A	A10
RSF-1221-R	RSF-1221-L				8,25	60,00	242,00	484,53	2,00	90	B	A10
RSF-1222-R	RSF-1222-L				9,50	60,00	278,67	484,53	1,74	180	C	A10
RSF-1223-R	RSF-1223-L				10,75	60,00	315,33	484,53	1,54	270	D	A10
RSF-1224-R	RSF-1224-L	2,00	11,00	9,90	2,00	65,00	29,11	903,01	31,02	0	A	A10
RSF-1225-R	RSF-1225-L				3,25	65,00	47,31	903,13	19,09	90	B	A10
RSF-1226-R	RSF-1226-L				4,50	65,00	65,51	903,15	13,79	180	C	A10
RSF-1227-R	RSF-1227-L				5,75	65,00	83,70	903,15	10,79	270	D	A10
RSF-1228-R	RSF-1228-L				7,00	65,00	101,90	903,15	8,86	0	A	A10
RSF-1229-R	RSF-1229-L				8,25	65,00	120,10	903,15	7,52	90	B	A10
RSF-1230-R	RSF-1230-L				9,50	65,00	138,29	903,15	6,53	180	C	A10
RSF-1231-R	RSF-1231-L				10,75	65,00	156,49	903,15	5,77	270	D	A10
RSF-1232-R	RSF-1232-L	2,00	15,00	13,50	2,00	65,00	38,07	903,15	23,72	0	A	A10
RSF-1233-R	RSF-1233-L				3,25	65,00	61,87	903,15	14,60	90	B	A10
RSF-1234-R	RSF-1234-L				4,50	65,00	85,66	903,15	10,54	180	C	A10
RSF-1235-R	RSF-1235-L				5,75	65,00	109,46	903,15	8,25	270	D	A10
RSF-1236-R	RSF-1236-L				7,00	65,00	133,25	903,15	6,78	0	A	A10
RSF-1237-R	RSF-1237-L				8,25	65,00	157,05	903,15	5,75	90	B	A10
RSF-1238-R	RSF-1238-L				9,50	65,00	180,85	903,15	4,99	180	C	A10
RSF-1239-R	RSF-1239-L				10,75	65,00	204,64	903,15	4,41	270	D	A10
RSF-1240-R	RSF-1240-L	2,00	18,00	16,20	2,00	70,00	44,79	903,15	20,16	0	A	A10
RSF-1241-R	RSF-1241-L				3,25	70,00	72,79	903,15	12,41	90	B	A10
RSF-1242-R	RSF-1242-L				4,50	70,00	100,78	903,15	8,96	180	C	A10
RSF-1243-R	RSF-1243-L				5,75	70,00	128,78	903,15	7,01	270	D	A10
RSF-1244-R	RSF-1244-L				7,00	70,00	156,77	903,15	5,76	0	A	A10
RSF-1245-R	RSF-1245-L				8,25	70,00	184,76	903,15	4,89	90	B	A10
RSF-1246-R	RSF-1246-L				9,50	70,00	212,76	903,15	4,24	180	C	A10
RSF-1247-R	RSF-1247-L				10,75	70,00	240,75	903,15	3,75	270	D	A10
RSF-1248-R	RSF-1248-L	2,00	23,00	20,70	2,00	70,00	55,99	903,15	16,13	0	A	A10
RSF-1249-R	RSF-1249-L				3,25	70,00	90,98	903,15	9,93	90	B	A10
RSF-1250-R	RSF-1250-L				4,50	70,00	125,98	903,15	7,17	180	C	A10
RSF-1251-R	RSF-1251-L				5,75	70,00	160,97	903,15	5,61	270	D	A10
RSF-1252-R	RSF-1252-L				7,00	70,00	195,96	903,15	4,61	0	A	A10
RSF-1253-R	RSF-1253-L				8,25	70,00	230,96	903,15	3,91	90	B	A10
RSF-1254-R	RSF-1254-L				9,50	70,00	265,95	903,15	3,40	180	C	A10
RSF-1255-R	RSF-1255-L				10,75	70,00	300,94	903,15	3,00	270	D	A10
RSF-1256-R	RSF-1256-L	3,50	10,00	9,00	3,00	76,00	31,77	1683,20	78,76	0	A	A11
RSF-1257-R	RSF-1257-L				3,25	75,00	34,73	1683,20	48,47	90	B	A11
RSF-1258-R	RSF-1258-L				4,50	75,00	48,09	1683,20	35,00	180	C	A11
RSF-1259-R	RSF-1259-L				5,75	75,00	61,45	1683,20	27,39	270	D	A11
RSF-1260-R	RSF-1260-L				7,00	75,00	74,81	1683,20	22,50	0	A	A11
RSF-1261-R	RSF-1261-L				8,25	75,00	88,17	1683,20	19,09	90	B	A11
RSF-1262-R	RSF-1262-L				9,50	75,00	101,53	1683,20	16,58	180	C	A11

Ilustración 12. Página 134 del catálogo de muelles de torsión de Kern-Liebes TMG.

## 4. ELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Una vez que la férula ha sido diseñada es necesario definir la estructura con la que va a ser fabricada en la impresora 3D. Este diseño proporcionará la ligereza y flexibilidad de los que el composite fabricado de forma compacta no dispone. Por otro lado el aglomerante podrá infiltrarse más fácilmente, accediendo a todos los espacios sin dejar ninguna zona sin impregnar.

A la hora de elegir la estructura adecuada hay que tener en cuenta que ésta tiene que poder repetirse en el espacio, además de tener el tamaño adecuado para poder constituir la férula, cuyo espesor es de 4 mm. Este espesor se ha considerado el adecuado para poder disimular la férula dentro del zapato.

En un primer momento se pensó en la posibilidad de utilizar una estructura dodecaédrica [11], por su semejanza a una esfera. Pero tras unas pruebas se comprobó que no era una estructura consistente, al reproducir en el espacio quedarían zonas sin unir, lo cual podría derivar en una rotura al someter el cuerpo a un esfuerzo.

Por esta razón se opta por la llamada *Kelvin Cell* que consiste en un octaedro truncado de tal forma que se produce un poliedro de 14 caras con 6 de ellas cuadradas y el resto pentagonales. Esta estructura se puede distribuir espacialmente en todas las direcciones proporcionando una pieza consistente en la que las cargas se distribuyen uniformemente a través de sus barras [12].

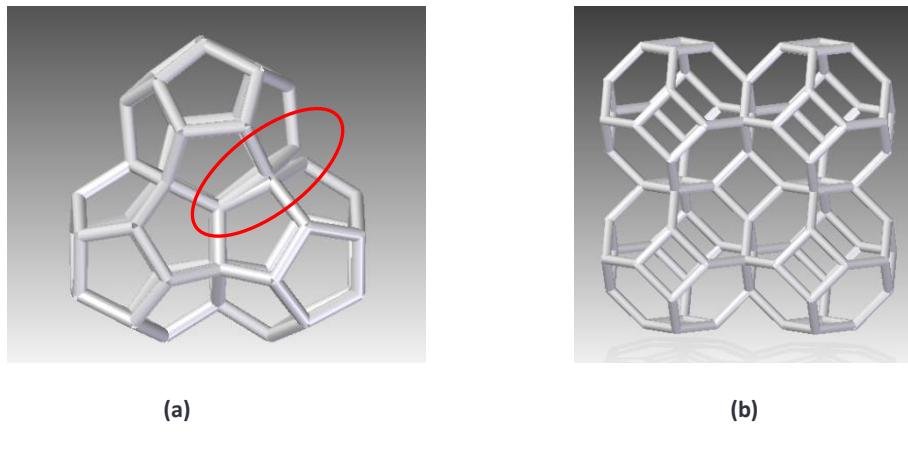


Ilustración 13. Repetición en el espacio de la estructura dodecaédrica (a) y de la estructura Kelvin (b)

Para analizar el comportamiento de esta estructura, se va a comparar con otras dos estructuras espaciales: estructura cúbica, en la que las barras son las aristas de un cubo y estructura cúbica reforzada; en la que se han añadido las barras que unen los vértices con el centro, es decir las diagonales del cubo. Además se comparará también con la probeta completamente maciza [13].

En la ilustración 14 se muestran las células unitarias que deberán repetirse en el espacio simplificadas para que no haya repetición de aristas.

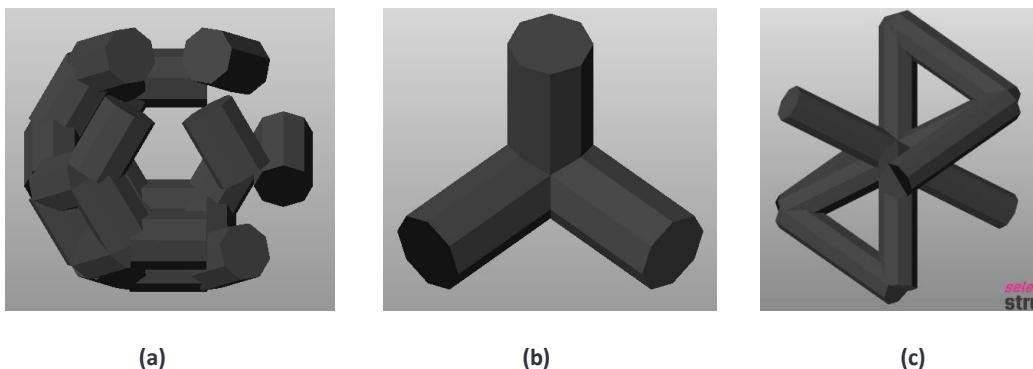


Ilustración 12. Célula unitaria Kelvin (a), cúbica simple (b) y cúbica reforzada (c).

La célula Kelvin y la estructura cúbica centrada en el cuerpo tienen de 4 mm de lado y sus barras tienen un perfil octogonal inscrito en una circunferencia de 1 mm de diámetro. En el caso de la estructura cúbica simple se crearon células de 2 y 4 mm de lado y 1 y 2 mm de perfil de barra respectivamente. Se tomaron estos tamaños de perfiles como los óptimos para cada célula, ya que, si se ponía un perfil de 2 mm en la célula Kelvin, las barras interferían demasiado y quedaba una estructura cerrada, de la que no podría salir el composite. Lo mismo ocurría con la estructura cónica reforzada o centrada en el cuerpo. En el caso del a estructura básica de tamaño de célula 4 mm sucedía lo contrario, si se elegía un perfil de 1 mm, la estructura quedaba muy delgada y con un aspecto más frágil.

Para analizar las propiedades de la resistencia a la tracción de las diferentes estructuras se procederá a realizar ensayos según la norma UNE-EN ISO 527-2:2012 *Determinación de las propiedades en tracción*. También se hará un estudio del comportamiento de la estructura ante una grieta mediante un ensayo de crecimiento de grieta según la norma UNE-EN ISO 18782-2:2009 *Ensayos de propagación de grietas utilizando probetas prefisuradas*.

## 5. ESTUDIO DE DIFERENTES ADHESIVOS

Para lograr que la pieza tenga una resistencia mayor es necesario impregnarla con un adhesivo. Éste se infiltrará por los poros de la pieza y la dotará de sus propiedades.

Para saber qué aditivo es más conveniente se ha hecho un estudio de los diferentes tipos que existen en el mercado. Zcorp recomienda Zbond y Zmax, basados en cianocrilato y resina epoxi respectivamente. Pero éstos no dotarán a la férula de la resistencia necesaria para hacerla funcional. Así que se pensó en la posibilidad de usar pegamentos fuertes con la fluidez apropiada para que penetraran en un tiempo adecuado en la pieza de escayola y no se escurrieran durante el tiempo de secado.

A continuación se muestra una tabla con las propiedades de los adhesivos elegidos en una evaluación preliminar [14]

Tabla 2. Propiedades de los adhesivos a analizar

ADITIVO	Materiales en los que se utiliza	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Viscosidad (mPas)	Tiempo de curado
Cianocrilato	Todo tipo de materiales	1.1	5	15 minutos a 20° C
Poliuretano Alifático	Hormigón, mortero, cerámica	1.07	350	9h a 23° C 4 h a más de 30°C
Araldite 2020	Cerámicas, cauchos, plásticos, vidrio	1.1	150	25 h a 23°C 2.5 h a 60°C

Se pensó en la posibilidad de diluir el Araldite 2020, pegamento bicomponente basado en resina epoxi, para ver cómo si mejoraba la penetración en la pieza. Para elegir la tasa de dilución se hicieron pruebas con una dilución al 5% y al 10% sobre el componente A del Araldite 2020 con Araldite DY P026. Mientras que la dilución al 5% curaba bien y proporcionaba consistencia a la probeta, la pieza impregnada con la dilución al 10% tenía una menor consistencia entre las láminas creadas en la impresión.

Teniendo en cuenta que el curado es más rápido si se someten las piezas a una temperatura elevada, se procedió a la exposición a 80°C durante 24 horas de una probeta impregnada con cada pegamento.

A continuación se realizaron ensayos de resistencia a la tracción según la norma ISO 527-2:2012 *Determinación de las propiedades en tracción* a probetas impregnadas con la variedad de pegamentos elegidos, obteniendo los resultados que se exponen en la tabla 3.

Tabla 3. Resultado del ensayo de tracción para estudio preliminar.

ADITIVO	H (S/N)	P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	D	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )
Cianocrilato	S	20.80	25.63	25.61	0.02	9
	N	21.05	25.95	25.93	0.02	7.15
Poliuretano Alifático	S	20.93	25.19	21.38	3.81	7.18
	N	19.82	24.80	21.20	3.60	6.75
Araldite 2020	S	19.73	26.88	24.78	2.10	15.35
	N	19.95	26.49	24.83	1.66	7.37
Araldite 2020 diluido al 5%	S	20.57	27.87	22.37	5.50	13.95
	N	19.83	24.30	22.49	1.81	3.11

Siendo

H: determinación de si la probeta ha sido horneada o no (S/N)

P<sub>0</sub>: peso de la probeta antes de impregnarla (g)

P<sub>1</sub>: peso inmediatamente después de impregnarla (g)

P<sub>2</sub>: peso después del curado (g)

D: desperdicio de pegamento (g)

$\sigma$ : tensión de rotura a la tracción (N/mm<sup>2</sup>)

Como puede observarse las resistencias mayores las da el Araldite 2020 diluido y sin diluir con las probetas horneadas. El que no está diluido presenta un 10% más resistencia y 60 % menos de desperdicio de material. Esto significa que se elegirá trabajar con Araldite 2020 sin diluir. Lo cual producirá, además, un ahorro en el coste de material.

En el caso del poliuretano alifático (comúnmente llamado endurecedor de pintura) y del cianocrilato no hay diferencias significativas en el horneado y los dos presentan una resistencia aproximadamente igual. Por tanto la decisión final se basa en el coste. El endurecedor de pintura supondría un gasto del 76 % menos así que, entre los dos, se elige éste. (Los costes de ambos se verán en el estudio económico).

Como información interesante, en la tabla se puede ver la cantidad de material que se elimina durante el curado; sin tener en cuenta el Araldite 2020 diluido (pues no se tienen datos sobre la viscosidad de la mezcla) se observa que el aditivo con mayor viscosidad (poliuretano alifático) es el que más se desperdicia. Esto era de esperar pues su fluidex es menor, por tanto, tarda más en escurrirse, pero no lo suficiente como para quedarse atrapado dentro de la estructura. Mientras que los otros dos aditivos se escurren inmediatamente después de ser impregnados.

La conclusión a la que se ha llegado con este estudio ha sido que los ensayos de tracción se van a realizar con probetas de fabricadas con diferentes estructuras e impregnadas con Araldite 2020 y poliuretano alifático.

## 6. ENSAYOS

### Tipos de probetas

Para la realización de los ensayos de tracción y de crecimiento de grieta que se realizaron se diseñaron diferentes probetas de acuerdo a la normativa correspondiente. Se analizó cada estructura introduciendo, además, recubrimientos en algunas de ellas para analizar su resistencia.

Se estableció una nomenclatura para poder codificar cada probeta. Esta depende de:

- Su estructura
  - KC : Kelvin Cell
  - CS: Cubo simple
  - CC: Cubo reforzado
- El tipo de ensayo a realizar
  - T: Tracción
  - G: Crecimiento de grieta
- El tamaño de su celda
  - 2: 2mm
  - 4: 4mm
- El recubrimiento que lleva
  - R1: recubrimiento por un lado
  - R2: recubrimiento en ambos lados
  - R3: sin recubrimiento
- El aditivo con el que se ha impregnado
  - A1: Poliuretano alifático
  - A2: Araldite 2020
- El número de probeta de esa serie del 1 al 5

De todas las combinaciones posibles se eligen las siguientes probetas para la realización de los ensayos:

Tabla 4. Listado de probetas para el ensayo de tracción.

Código	CST2R3A1	CST2R2A1	CCT4R2A1	KCT4R2A1	MacizaT_A1
	CST2R3A2	CST2R2A2	CCT4R2A2	KCT4R2A2	MacizaT_A2

Tabla 5. Listado de probetas para el ensayo de crecimiento de grieta.

Código	CSG4R2A1	CSG4R3A1	MacizaG_A1
	CSG4R2A2	CSG4R232	MacizaG_A2

Las probetas elegidas son las más representativas. Para simplificar el estudio se han desechado las que no aportaban información adicional al estudio. Estas son las recubiertas sólo por uno de los lados y las estructuras Kelvin y cúbica reforzada sin recubrimientos.

Esta decisión se tomó después de considerar que las recubiertas solamente por una lado tendrían una resistencia intermedia entre las recubiertas por ambos y las no recubiertas. Además, para determinar si convenía recubrir o no la estructura sólo era necesario recubrir las dotadas con una estructura en concreto. Las conclusiones para las demás podrían obtenerse por analogía.

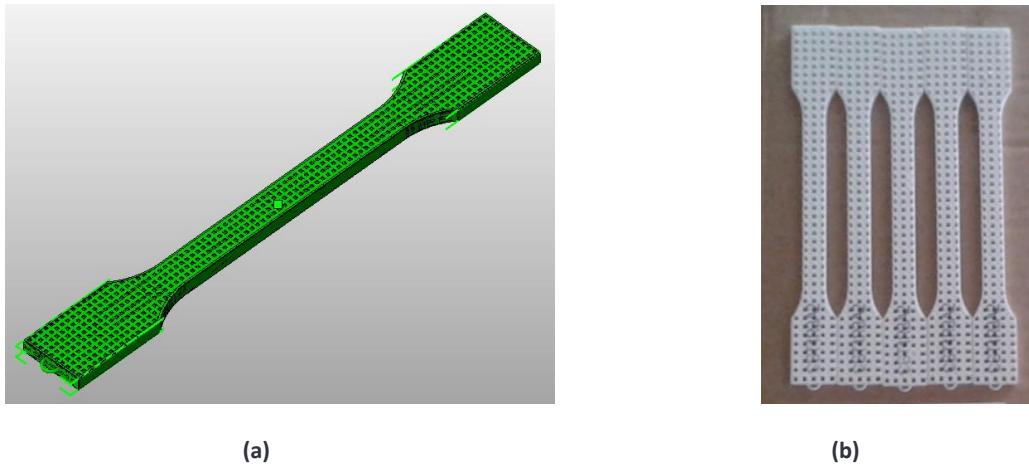


Ilustración 13. CST2R3 diseñada(a) e imprimida (b).

## Ensayo de tracción

De acuerdo con los dos aditivos elegidos y las estructuras seleccionadas se procedió a realizar un conjunto de probetas. 5 de cada tipología, para someterlas a un ensayo de tracción conforme a la norma UNE-EN ISO 527-2 *Determinación de las propiedades en tracción*.

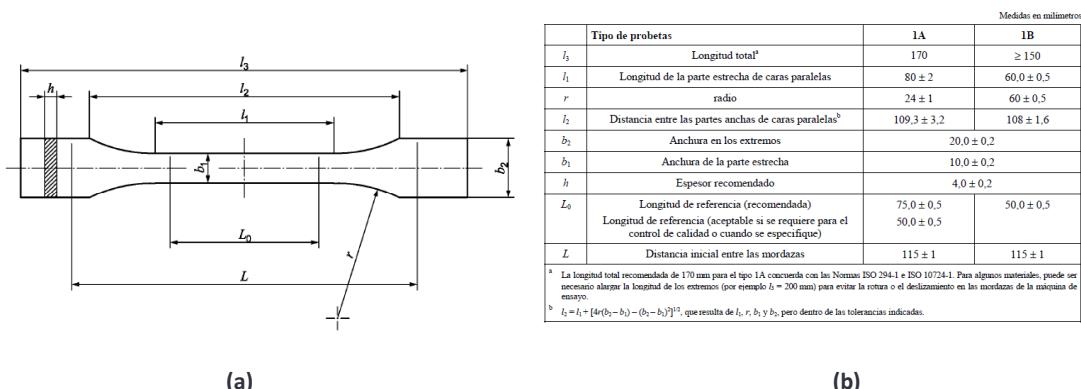


Ilustración 14. Plano (a) y medidas (b) de probeta 1A para realizar los ensayos de tracción.

Dichos ensayos realizaron con una máquina de ensayos de tracción JBA modelo 85 (ilustración 15) situada en el Centro de Integración de Formación Profesional *Corona de Aragón*.

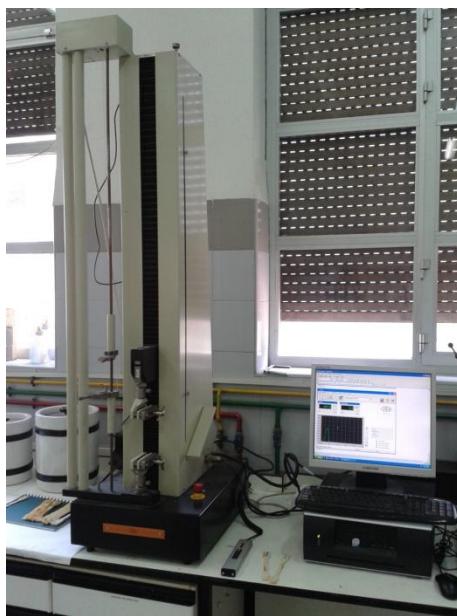


Ilustración 15. Máquina de ensayos de tracción JBA modelo 85.

Para cada ensayo el programa *Conus*, instalado en el ordenador conectado con la máquina de tracción, ofrece el dato de fuerza máxima en la rotura. Al no disponer de galgas extensométricas no se analizó la deformación en la rotura.

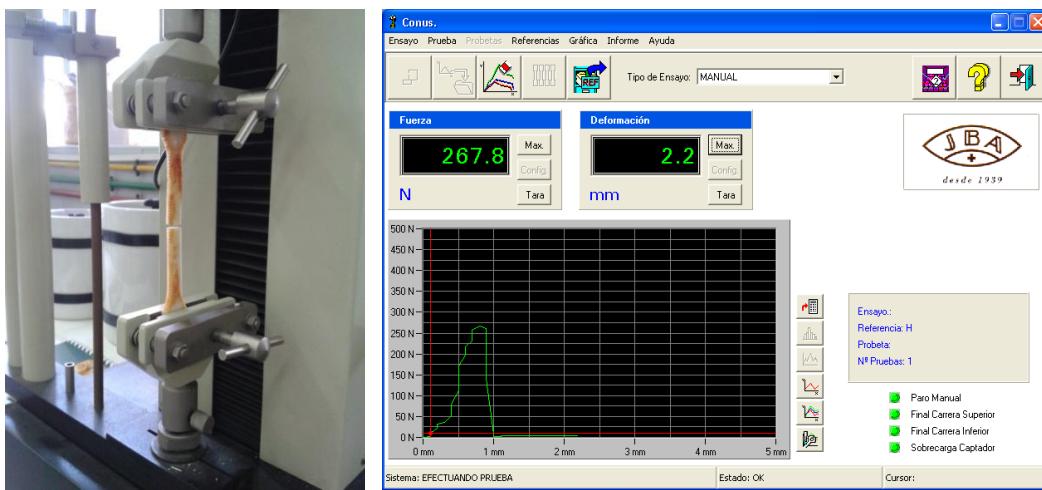


Ilustración 16. Ensayo de tracción de CST2R2A2\_2 (a) con su gráfica correspondiente (b).

En la tabla 6 se muestra resultado de los ensayos en los que se incluye la siguiente información para cada tipología de probeta:

- Peso medio antes y después de la aplicación del aditivo y curado. De este modo se puede ver la cantidad de aditivo absorbido por cada tipología de probeta.
- Esfuerzo medio al que está sometido cada tipología de probeta en el momento de la rotura.
- Desviación típica y coeficiente de variación de cada conjunto de valores. Así se puede ver qué estructuras presentan un comportamiento más homogéneo.

Tabla 6. Resultados de los ensayos de tracción.

CÓDIGO	P <sub>i</sub>	S	Cv	P <sub>f</sub>	S	Cv	σ	S	Cv
CST2R3A1	6,04	0,13	2,16%	6,91	0,18	2,60%	1,05	0,74	70,54%
CST2R3A2	5,92	0,18	3,07%	9,06	0,18	2,02%	5,61	2,39	42,69%
CST2R2A1	8,79	0,41	4,61%	9,91	0,44	4,41%	2,81	0,28	9,92%
CST2R2A2	8,82	0,28	3,15%	12,30	0,36	2,94%	6,43	2,75	42,80%
CCT4R2A1	7,35	0,21	2,91%	8,31	0,24	2,95%	2,14	0,27	12,85%
CCT4R2A2	7,46	0,16	2,19%	10,64	0,18	1,73%	4,92	1,08	21,94%
KCT4R2A1	7,49	0,18	2,40%	8,42	0,21	2,52%	2,67	0,17	6,37%
KCT4R2A2	7,28	0,22	3,07%	10,73	0,27	2,50%	6,44	0,77	11,97%
MacizaT_A1	13,36	0,49	2,44%	14,34	0,48	2,25%	7,86	0,61	7,82%
MacizaT_A2	13,32	0,42	2,09%	16,52	0,29	1,18%	18,51	1,95	10,55%

Siendo

P<sub>i</sub>: Peso inicial (g)

P<sub>f</sub>: Peso después curado (g)

σ: Esfuerzo al que está sometida la probeta en el momento de la rotura (Mpa)

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

Con F en N y A en mm<sup>2</sup>.

S: Desviación típica del conjunto de datos de la correspondiente tipología, según la norma UNE-ISO 3534 *Términos estadísticos generales y términos empleados para el cálculo de probabilidades*.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Siendo x<sub>i</sub> el valor de la variable correspondiente,  $\bar{x}$  la media de las variables y n el número de probetas de la tipología. En este caso siempre será 5.

CV: coeficiente de variación de Pearson.  $Cv = \frac{S}{|\bar{x}|}$

### Interpretación de los resultados

Como puede verse en la tabla 6, las medidas de tensión tomadas en las probetas CST2R3A1, CST2R3A2 y CST2R2A2 presentan una alta dispersión con respecto de las otras. Esto puede ser debido a un fallo de impresión en alguna de las probetas de la serie o a la acumulación de polvo o aditivo en el interior de ellas.

A simple vista se ve que el mejor resultado lo ofrece la combinación de estructura maciza con el adhesivo Araldite 2020 con una variabilidad de datos relativamente baja. Por tanto podemos considerar el dato fiable.

De todas formas, se van a realizar dos estudios adicionales. Con el primero se analizará cómo afecta la estructura a la tensión de rotura analizando la relación entre la resistencia y el peso específico (resistencia específica); y la segunda cómo afecta la cantidad de adhesivo absorbido por la probeta a la tensión de rotura [15].

Para ello se calcula el peso específico de cada probeta:  $\gamma$  (N/mm<sup>3</sup>)

$$\gamma = \frac{P_f * 9.81}{V}$$

Con  $P_f$  en Kg y  $V$  en mm<sup>3</sup>.

La proporción de adhesivo que lleva ( $\delta$ ) se calcula de la siguiente forma:

$$\delta = \frac{P_f - P_i}{P_f} * 100$$

A continuación, en la tabla 7, se muestran ordenadas de mejor a peor resultado las probetas según los diferentes estudios.

Tabla 7. Comparativa de los diferentes métodos para analizar la combinación más adecuada.

CÓDIGO	$\sigma$ (Mpa)	CÓDIGO	$R_{\sigma/\gamma}$ (mm)	CÓDIGO	$\delta$	$\sigma/\delta$ (Mpa)
MacizaT_A2	18,51	MacizaT_A2	1,09E+06	MacizaT_A1	6,83 %	115,01
MacizaT_A1	7,86	CST2R3A2	6,04E+05	MacizaT_A2	19,36 %	95,60
KCT4R2A2	6,44	KCT4R2A2	5,86E+05	CST2R2A1	11,30 %	24,86
CST2R2A2	6,43	MacizaT_A1	5,35E+05	KCT4R2A1	11,05 %	24,17
CST2R3A2	5,61	CST2R2A2	5,10E+05	CST2R2A2	28,29 %	22,73
CCT4R2A2	4,92	CCT4R2A2	4,51E+05	KCT4R2A2	32,15 %	20,03
CST2R2A1	2,81	KCT4R2A1	3,09E+05	CCT4R2A1	11,55%	18,52
KCT4R2A1	2,67	CST2R2A1	2,77E+05	CCT4R2A2	28,29 %	16,46
CCT4R2A1	2,14	CCT4R2A1	2,51E+05	CST2R3A2	34,66 %	16,19
CST2R3A1	1,05	CST2R3A1	1,48E+05	CST2R3A1	12,59 %	8,34

Como se puede ver las probetas macizas obtienen los mejores resultados en todos los casos, luego se considera que para este tamaño de pieza es más adecuado el uso de una probeta rellena completamente. Como la que mayor tensión soporta es la impregnada con Araldite 2020, se va a considerar esta la combinación estructura-aditivo a aplicar.

El peor resultado lo ofrece en los tres casos la probeta con estructura cúbica básica sin recubrimiento. Comparando este resultado con el de la probeta con el mismo aditivo y estructura pero con recubrimiento se puede ver que las probetas son más resistentes recubiertas.

Por otro lado se ve que la probeta con estructura Kelvin soporta mayor tensión que las demás probetas con estructura y tiene una buena resistencia específica. Por lo tanto si hubiera que escoger una estructura sería ésta. Una forma de aumentar su resistencia sería realizando la

estructura con unas barras de mayor diámetro. Para este tamaño de férula no es posible, puesto que las barras interferían unas con otras cerrando la estructura, para ello la estructura también tendría que ser mayor. En el caso de la aplicación a la férula no es posible porque está limitado el espesor 4 mm, pero puede ser interesante para otras.

Por último, con relación a los adhesivos utilizados se observa que el que mejor resultados da es el Araldite 2020 para todas las estructuras de los dos primeros análisis ( $\sigma$  y  $R_{\sigma/\gamma}$ ). En el análisis de  $\sigma/\delta$  se puede ver que esto no se cumple. De todo esto se puede extraer la conclusión de que si el endurecedor de pintura penetrara más las probetas serían más resistentes.

### Ensayo de avance de grieta

Para la realización de estos ensayos se ha considerado suficiente una comparativa entre las probetas de las estructuras maciza y cúbica simple de lado 4 mm. La última de ellas dotada con dos o ningún recubrimiento. De esta forma se han podido comparar las probetas con y sin estructura y se ha analizado el comportamiento de las probetas dotadas con dicha estructura, que en los ensayos de tracción no se probó.

Este ensayo se ha hecho en la misma máquina que los ensayos de tracción con un accesorio que permitía la aplicación de la tensión en los agujeros diseñados para ello.

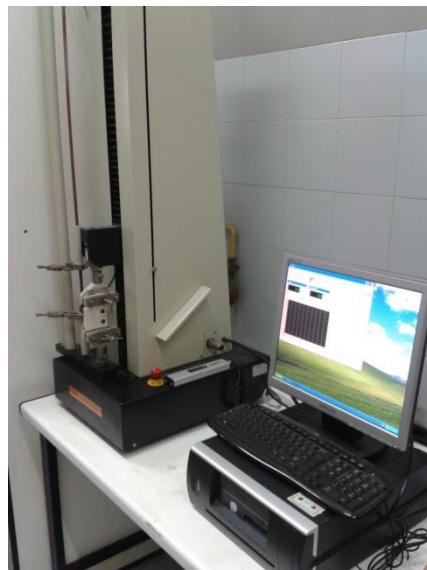


Ilustración 17. Máquina de ensayos de tracción JBA modelo 85 con probeta de ensayo de grieta colocada

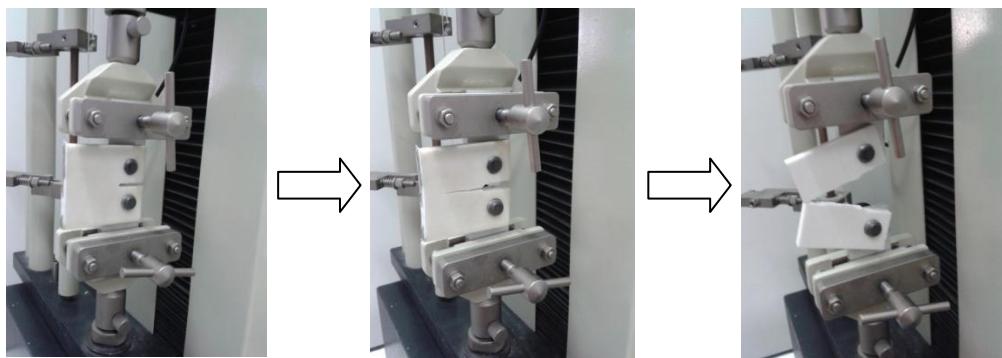


Ilustración 18. Proceso de rotura de la probeta MacizaT\_A1.

La norma seguida para la realización de este ensayo ha sido UNE-EN ISO 17289:2009 *Ensayos de propagación de grietas utilizando probetas prefisuradas*.

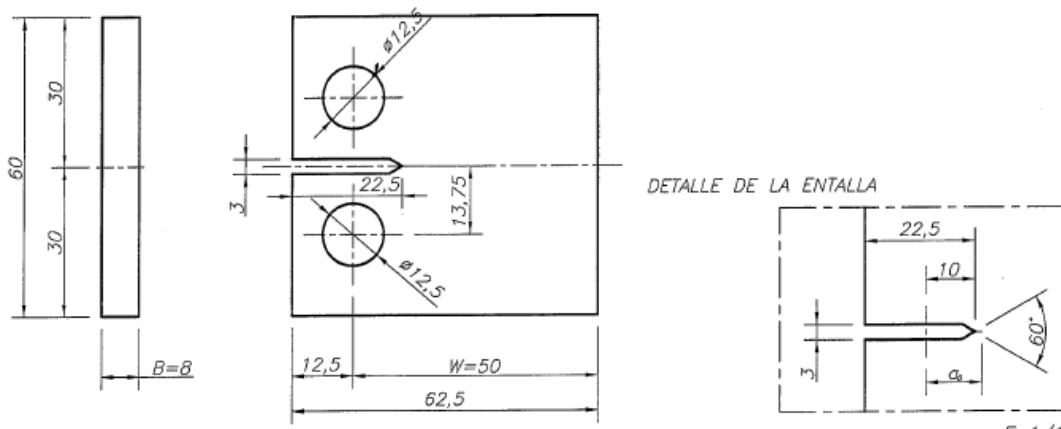


Ilustración 19. Plano y detalle de las probetas de ensayo de crecimiento de grieta.

En la siguiente tabla se pueden observar los resultados de los ensayos realizados, interpretados según la norma UNE 7540 *Mecánica de la fractura, terminología*.

Tabla 8. Resultados del ensayo de avance de grieta.

CÓDIGO	P <sub>i</sub>	S	C <sub>v</sub>	P <sub>f</sub>	S	C <sub>v</sub>	$\sigma$	S	C <sub>v</sub>
CSG4R2A1	15,94	1,06	6,67%	17,8	1,22	6,90%	4,26	0,42	9,86%
CSG4R2A2	15,15	1,31	8,62%	20,8	1,72	8,26%	11,27	3,30	29,23%
CSG4R3A1	13,56	0,54	3,98%	15	0,64	4,25%	2,48	0,26	10,55%
CSG4R3A2	13,29	0,63	4,72%	18,2	0,74	4,04%	5,62	0,34	6,01%
MacizaG_A1	35,88	1,50	4,19%	38,9	1,46	3,75%	13,23	1,57	11,84%
MacizaG_A2	35,58	1,61	4,53%	45,1	1,61	3,57%	33,75	1,11	3,28%

Siendo

P<sub>i</sub>: Peso inicial (g)

P<sub>f</sub>: Peso después del impregnado y curado (g)

$\sigma$ : Esfuerzo al que está sometida la probeta en el momento de la rotura (Mpa)

$$\sigma = \frac{2P(2W + a)}{B(W - a)^2}$$

Con

$P$ = Carga en la rotura (N)

$W = 50\text{ mm}$

$a = 22.5\text{ mm}$

$B = 8\text{ mm}$

S: Desviación típica del conjunto de datos de la correspondiente tipología

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Siendo  $x_i$  el valor de la variable correspondiente,  $\bar{x}$  la media de las variables y  $n$  el número de probetas de la tipología. En este caso siempre será 5.

CV: coeficiente de variación de Pearson.  $Cv = \frac{S}{|\bar{x}|}$

### Interpretación de los resultados

Como se esperaba, al igual que en el ensayo de tracción, la pieza que mejores resultados ofrece es la maciza impregnada con Araldite 2020. Haciendo una comparación entre ambos ensayos, en la tabla 9 se ve que la tensión máxima soportada en este ensayo es 82,23 % mayor que en los ensayos de tracción. A partir de este dato se llega a la conclusión de que con esta combinación de material y aditivo la pieza sometida a un esfuerzo posee una gran resistencia a la rotura con la presencia de grietas.

Tabla 9. Comparativa de las tensiones máximas en los dos ensayos

CÓDIGO	$\sigma_T$	$\sigma_G$	Variación
Maciza_A1	7,86	13,23	68,32 %
Maciza_A2	18,51	33,75	82,23 %

Siendo

$\sigma_T$ : tensión de rotura en el ensayo de tracción (MPa)

$\sigma_G$ : tensión de rotura en el ensayo de avance de grieta (MPa)

Realizando el estudio de la resistencia específica y la relación entre la tensión máxima soportada con respecto al porcentaje de adhesivo de la pieza, se obtienen los siguientes resultados, ordenados de mayor a menor:

Tabla 10. Comparativa de los diferentes métodos para analizar la combinación más adecuada.

CÓDIGO	$\sigma$ (Mpa)	CÓDIGO	$R_{\sigma/\gamma}$ (mm)	CÓDIGO	$\delta$	$\sigma/\delta$ (Mpa)
MacizaG_A2	33,75	CSG4R3A1	2,10E+06	MacizaG_A1	7,76 %	170,41
MacizaG_A1	13,23	MacizaG_A1	1,52E+06	MacizaG_A2	21,11 %	159,89
CSG4R2A2	11,27	CSG4R2A1	9,54E+05	CSG4R2A2	27,16 %	41,49
CSG4R3A2	5,62	CSG4R3A2	8,66E+05	CSG4R2A1	10,45 %	40,77
CSG4R2A1	4,26	MacizaG_A2	6,72E+05	CSG4R3A1	9,60 %	25,83
CSG4R3A1	2,48	CSG4R2A2	4,64E+05	CSG4R3A2	26,98 %	20,83

### Leyenda

$R_{\sigma/\gamma}$ : Resistencia específica (mm).

$$R_{\sigma/\gamma} = \frac{\sigma}{\gamma}$$

Donde  $\gamma = \frac{P_f * 9.81}{V}$  con  $P_f$  en Kg y  $V$  en  $mm^3$ .

$\delta$ : proporción de adhesivo que lleva la probeta

$$\delta = \frac{P_f - P_i}{P_f}$$

En este estudio se ve que la probeta CSG4R3A1 tiene la mayor resistencia específica, luego podría considerarse la utilización de esta estructura con este tamaño de célula para piezas más grandes ya que, como se ve en el resultado de tensión en la rotura, con el tamaño de estas probetas se obtienen los peores resultados.

Los resultados de la probeta con estructura cúbica recubierta por ambos lados se consideran adecuados, así que se propone realizar una comparación con la estructura Kelvin.

### Dificultades

Durante ambos ensayos surgieron diversos problemas tales como:

- Rotura de probetas durante la limpieza al salir de la impresora (ilustración 20). Esto sucedió en las probetas de ensayo a tracción, ya que son muy estrechas por la parte central y al salir de la impresora son muy frágiles, hay que manipularlas con mucho cuidado.
- Deformación de alguna en el proceso de curado (ilustración 21). Al tener poco espesor la probeta se comba durante el proceso de curado.
- Rotura por una zona no adecuada en el ensayo (ilustración 22). Esto principalmente es debido a una acumulación de adhesivo en la zona de rotura. Con este fallo se verifica la resistencia del adhesivo.

En estos casos fue necesario volver a imprimir las probetas afectadas, ya que podía influir en los resultados y según la norma hay que realizar los ensayos en 5 probetas de cada tipología.



Ilustración 20. Rotura en la extracción de la pieza de la impresora.



Ilustración 21. Combado durante el curado.

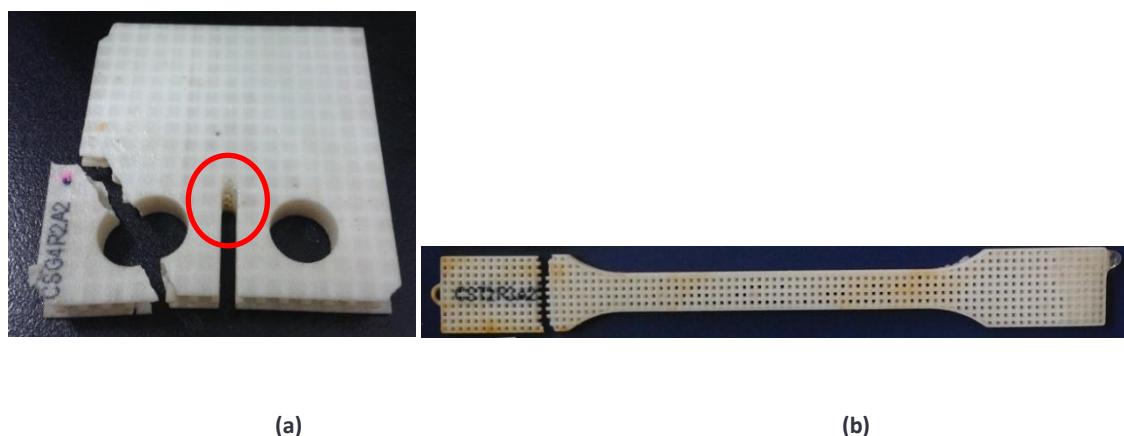


Ilustración 22. Probetas rotas por la zona no adecuada: (a) ensayo crecimiento de grieta, (b) ensayo de tracción.

En la ilustración 23 se muestra una comparativa de una probeta de ensayo de crecimiento de grieta CSG4R2A2 antes y después de la impregnación con el adhesivo y el horneado. Mientras que antes de la impregnación y horneado (a) se pueden distinguir todas las capas que la impresora 3D ha depositado para la fabricación de esta pieza, después (b), se ve que esas capas se han unido formando una pieza sólida y consistente.

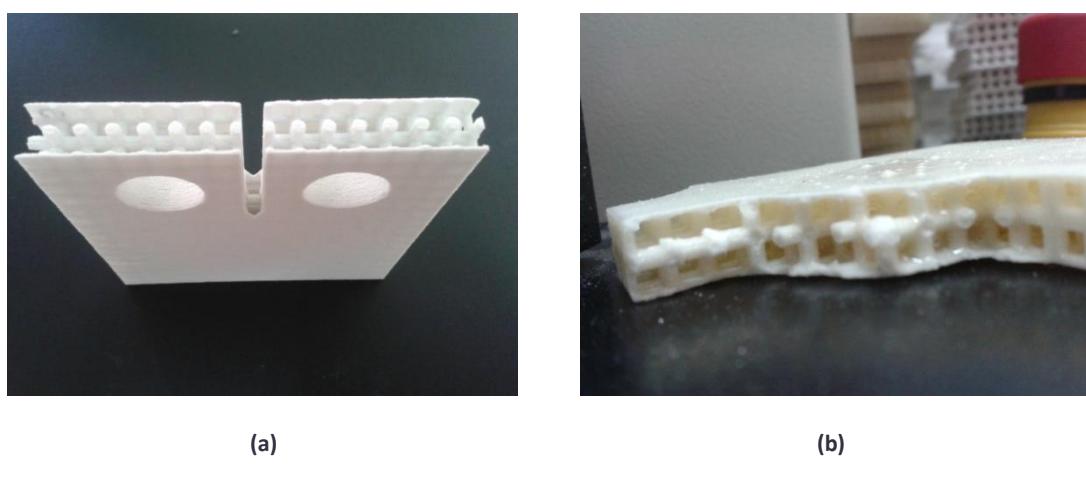


Ilustración 23. Probeta CSG4R2A2 antes (a) y después (b) de ser impregnadas

## 7. PROGRAMAS UTILIZADOS

### PROGRAMAS DE MODELADO 3D

- Solid Edge ST5 con el complemento Sycode.
- Rhinoceros 5.0

### PROGRAMAS ESPECÍFICOS PARA IMPRESIÓN 3D

- Netfabb and Selective Space Structures
- Zprint 7.12

Para la ejecución de este proyecto se han utilizado distintos programas informáticos. A continuación se expone el proceso de selección y descarte de estos.

En la primera fase del proyecto, diseño de la férula articulada, se necesitaba tratar la férula como un elemento mecánico al que se le pudieran aplicar operaciones booleanas. Esto no era posible con el fichero del que se partía que tenía el formato .stl (formato basado en mallas triangulares como aproximación a un cuerpo sólido: estereolitografía). Por esta razón se tuvo que utilizar un complemento que permitiera importar ficheros en este formato a Solid Edge llamado Sycode.

También se vio que existía Rhinoceros 5.0, un programa de diseño 3D muy utilizado para piezas que después van a ser fabricadas con una impresora 3D. Este programa permite trabajar directamente con el fichero .stl sin necesidad de pasarlo a sólido. Aunque se podría pensar en utilizarlo de forma única, ciertas operaciones se realizan de forma más sencilla y rápida en Solid Edge. Así pues para el diseño de la férula articulada se utilizaron los dos. Para la reparación de las mallas creadas se utilizó Netfabb, que localiza y señala todos los errores para corregirlos tanto manualmente como automáticamente.

En la segunda fase del proyecto se diseñaron distintas estructuras para aplicar a la férula la más adecuada. El primer programa en el que se pensó para ello fue Solid Edge ST5. Las estructura debía tener un tamaño de célula pequeño ya que el espesor de la férula era de alrededor de 4 mm, por tanto debía ser de 2 ó 4 mm de lado. Al intentar repetir tridimensionalmente la célula con la forma de la férula o probeta se comprobó que el programa no tenía suficiente memoria para realizar la operación.

Algo parecido sucedió con Rhinoceros 5.0 que, aunque en un primer momento pareció responder de forma más eficiente que Solid Edge ST5, tampoco ofrecía el resultado solicitado.

Tras una búsqueda exhaustiva se observó que Netfabb tiene un módulo de construcción de estructuras que podría realizar las operaciones necesarias para la aplicación de la estructura a la pieza en unos minutos.

Tras tener el modelo diseñado y con la estructura requerida hay que introducirlo el programa Zprint 7.12 para comenzar la impresión. Este programa es muy sencillo de utilizar: en él se

introduce el modelo y se coloca de forma que la máquina tenga que hacer el mínimo número de pasadas, de este modo se optimiza el tiempo de impresión.

En el caso de colocar los modelos en varias capas se puede elegir la distancia entre ellas para que no se produzcan roturas en la extracción de las piezas.

Zprint 7.12 verifica que la impresora tiene todos los materiales disponibles para comenzar la impresión. En caso de no disponer de materiales suficientes o necesitar alguna labor de mantenimiento, se comunica a través de una ventana de diálogo. Además informa en todo momento del estado de la impresión.

## 8. COMPARACIÓN CON OTRO MÉTODO (MECANIZADO)

Actualmente la empresa Podoactiva fabrica sus plantillas ortopédicas mediante el mecanizado de un bloque de polipropileno a partir de un modelo creado con un programa de diseño. Para ello, previamente, se obtiene el modelo del pie del paciente con un escáner 3D y a continuación se diseña la plantilla de acuerdo a las necesidades del paciente.

La férula articulada presenta una geometría más compleja que las plantillas ortopédicas, por lo que no está asegurado que pueda realizarse una analogía entre ambos productos en cuanto a la tecnología de fabricación se refiere. A continuación se muestra el estudio del mecanizado de la férula articula.

Para ello se ha hecho una simulación del mecanizado con una fresadora de tres ejes de ambas partes de la férula con el programa de Edge-CAM. En las ilustraciones 24 y 25 se pueden ver las diferentes operaciones llevadas a cabo en ambas partes.

Para realizar el mecanizado habría que utilizar bloques de polipropileno. En este caso, de acuerdo con las medidas de ambas partes de la férula, se elegirían dos bloques de 120x130x200 mm. Esto supondría un desperdicio de material del 95 %.

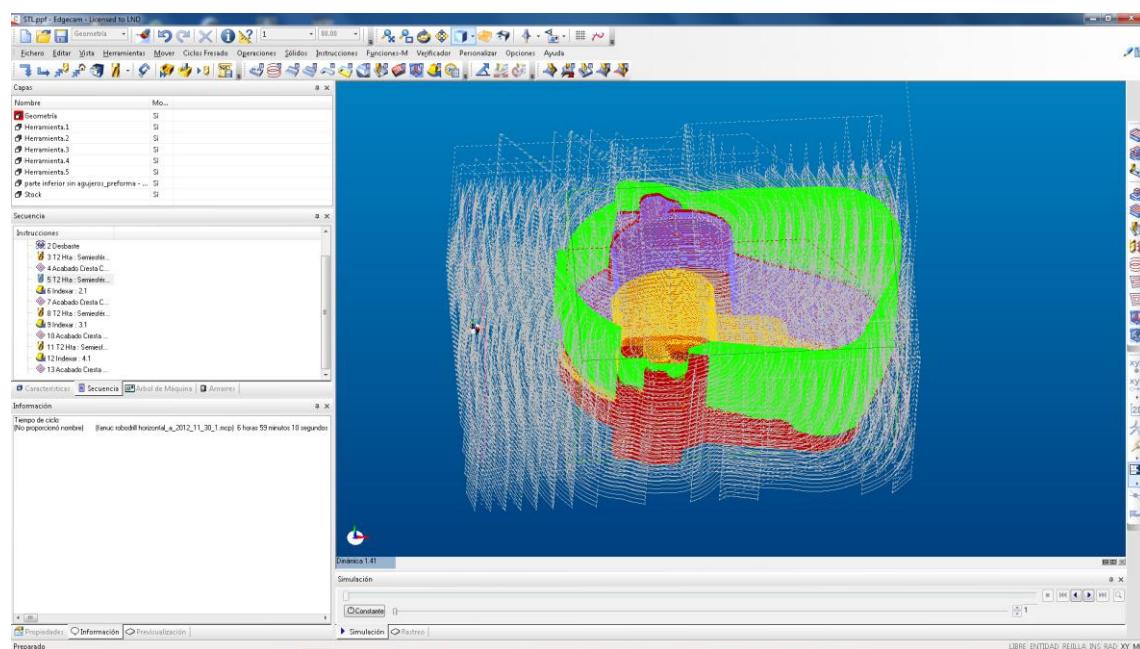


Ilustración 24. Simulación de mecanizado de la parte inferior de la férula.

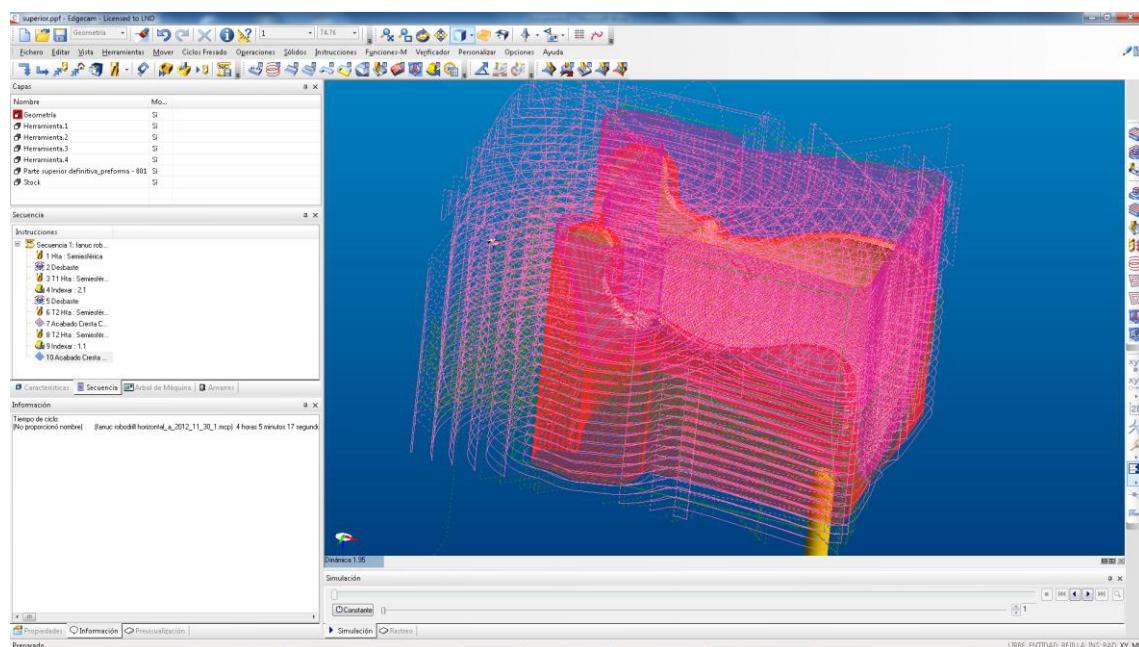


Ilustración 25. Simulación de mecanizado de la parte superior de la férula.

Para el mecanizado de ambas partes se han considerado los siguientes datos de operación:

- Diámetro de la fresa: 10 mm
- Velocidad de avance en desbaste: 1000 mm/min
- Velocidad de avance en acabado: 600 mm/min
- Revoluciones por minuto: 10.000 rpm (máxima)

El tiempo de operación de la parte inferior sería de 7 horas y el de la parte superior 4, siendo necesarios 4 cambios de posición de la preforma en la máquina de mecanizado a lo largo del proceso. Como se verá en el estudio económico, este hecho no influye en el coste de la férula, ya que el tiempo de manipulación total de las piezas será el mismo (considerando que la persona se dedique a otras tareas durante los tiempos de mecanizado); pero sí supone una limitación en el número de férulas a fabricar al año, ya que el centro de mecanizado sólo puede tratar una pieza.

Esta limitación no existiría en una impresora 3D, ya que el tiempo de operación de una férula completa sería de 7 horas, disminuyendo si se fabrican varias férulas a la vez (ver ilustraciones 26 y 27). En el caso de la férula articulada que se está estudiando en este proyecto sería posible la impresión de 2 férulas completas a la vez. Este dato puede cambiar en función del tamaño de las férulas. Además, sólo necesitará ser manipulada una vez terminado el proceso.

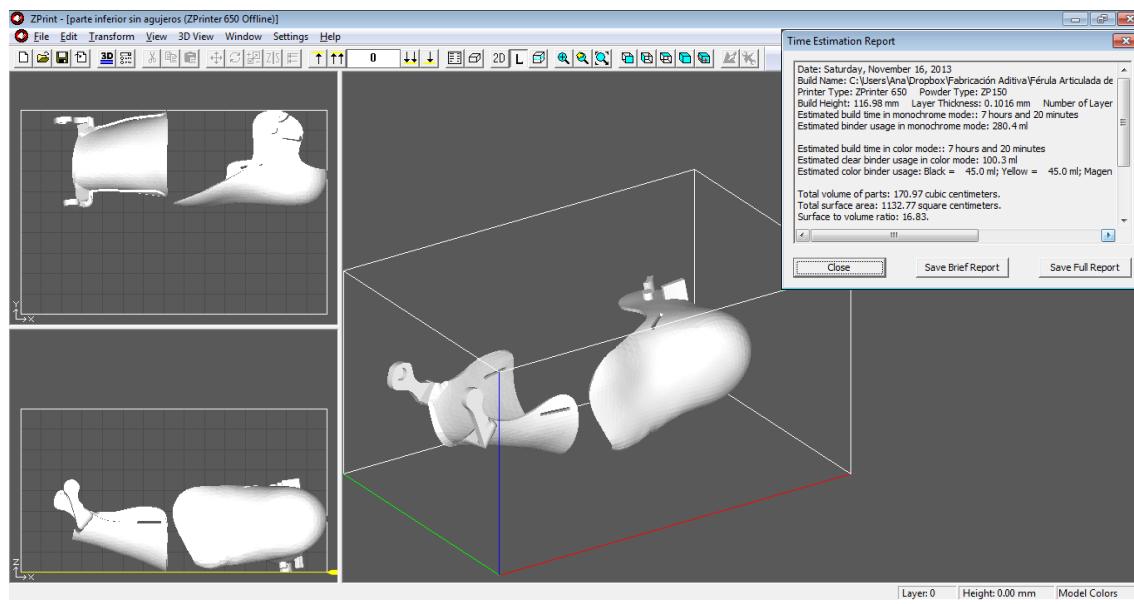


Ilustración 26. Impresión de férula articulada completa.

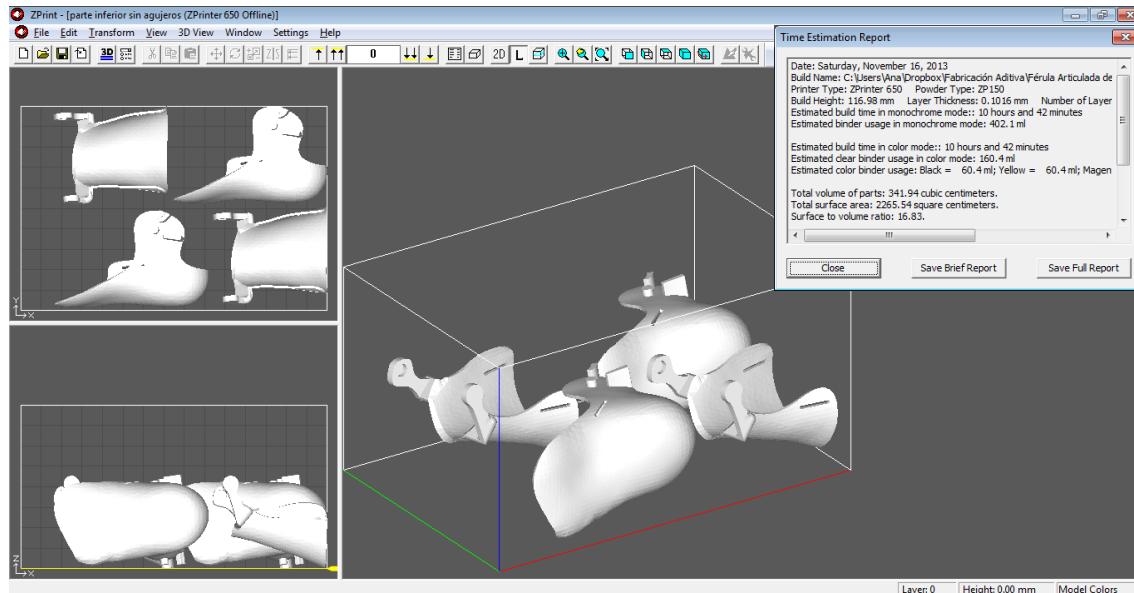


Ilustración 27. Impresión de dos férulas articuladas completas.

## 9. ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se exponen los resultados del estudio de viabilidad de la producción de la férula durante un tiempo de 10 años. Se ha considerado este tiempo porque la fabricación aditiva es una tecnología que está en desarrollo y es probable que durante ese tiempo evolucione con máquinas y materiales más adaptados a las necesidades.

Para la realización de este estudio se han comparado dos métodos de fabricación: impresión 3D y mecanizado de polipropileno.

En la tabla 11 se muestran los costes de explotación con ambos métodos de fabricación [16].

Tabla 11. Análisis de costes

	Concepto	Cantidad	Coste	
			Impresión 3D	Mecanizado
INVERSIÓN INICIAL	Programas de diseño y reparado mallas			
	Rhinos	1	1.300 €	1.300 €
	Netfabb	1	500 €	500 €
	Software CAD-CAM	1		12.000 €
	Sycode	1		140 €
	Maquinaria			
	Escáner 3D	1	1.500 €	1.500 €
	Impresora 3D	1	56.000 €	
	Máquina CNC	1		85.000 €
	Estudio de viabilidad	1	7.006 €	
Total inversión			59.300 €	100.440 €
COSTE FABRICACIÓN FÉRULA ARTICULADA	Trabajo diseño	1,5	45 €	45 €
	Energía	13.4 kWh FA 60 kWh FM	2,01 €	9 €
	Polipropileno	2 bloques 120x130x200 mm		9,71 €
	Powder Zp150	170 cm <sup>3</sup>	16,36 €	
	Binder monocromo	280 ml	54,88 €	
	Araldite 2020	50 g	8,68 €	
	Muelle	2	4 €	4 €
	Operario	1	30 €	30 €
	Goma Eva	1 lámina 500x700X1.5 mm	1€	1 €
	Pegamento	50 g	0,50 €	0,50 €
	Consulta podológica	2	60 €	60 €
	Total férula		222,43 €	159,21 €
Precio de venta con beneficio del 50%			333,64 €	238,82 €

En el estudio de viabilidad están contemplados todos los costes necesarios para tener la información completa que permita decidir si es posible utilizar la impresora 3D Zprinter 650 para la fabricación de las férulas articuladas (tabla 12).

Tabla 12. Coste de estudio de viabilidad.

Concepto	Cantidad	Coste
<b>Programas</b>		
Sycode	1	140
Netfabb	1	500
<b>Impresiones</b>		
Energía	26 KwH	3,9 €
Powder Zp150	991,55 cm <sup>3</sup>	95 €
Binder monocromo	677,6 ml	133 €
Araldite 2020	500 g	86,93 €
Araldit DY 026	1 kg	68 €
Poliuretano alifático	1 l	20 €
Cianocrilato NI5M	500 ml	125 €
Ingeniero investigador	3 meses	5.835 €
<b>Total</b>		<b>7.006 €</b>

Considerando que 1 de cada 6000 personas de la población sufren esta discapacidad [17] y teniendo en cuenta que se va a comercializar a nivel nacional se van a estimar unas ventas de 300 unidades al año. Hay que tener en cuenta que hay niños que necesitarán varias a lo largo de su vida debido al crecimiento.

Para calcular los flujos de caja anuales reflejados en las tablas 13 y 14 se suponen una tasa de actualización es del 6 % para los 10 próximos años y un impuesto sobre el beneficio es del 35%.

Tabla 13. Flujo de caja para la explotación con fabricación aditiva

Año	0	1	2	3	...	9	10
<b>Inversión (€)</b>	-59.300						
<b>Ingresos (€)</b>	100.500	100.500	100.500	...	100.500	100.500	
<b>G. Producción (€)</b>	56.250	56.250	56.250	...	56.250	56.250	
<b>Amortización (€)</b>	5.750	5.750	5.750	...	5.750	5.750	
<b>BAT (€)</b>	38.500	38.500	38.500	...	38.500	38.500	
<b>Impuestos (€)</b>	13.475	13.475	13.475	...	13.475	13.475	
<b>Flujo de caja (€)</b>	30.775	30.775	30.775	...	30.775	30.775	

Tabla 14. Flujos de para la explotación con mecanizado

Año	0	1	2	3	...	9	10
Inversión (€)	-88440						
Ingresos (€)		72000	72000	72000	...	72000	72000
G. Producción (€)		39250	39250	39250	...	39250	39250
Amortización (€)		8650	8650	8650	...	8650	8650
BAT (€)		24100	24100	24100	...	24100	24100
Impuestos (€)		8435	8435	8435	...	8435	8435
Flujo de caja (€)		24315	24315	24315	...	24315	24315

A partir de estos valores se hizo un estudio de la rentabilidad económica de la explotación mediante los indicadores VAN (ec) y TIR (r cuando VAN=0), obteniéndose los resultados reflejados en las ilustraciones 28 y 29.

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{Q_t}{(1+r)^t} \text{ (ec)}$$

Con

$I_0$ : Inversión inicial

$Q_t$ : Flujo de caja del año t

R: Tasa de actualización

T: Vida útil del objeto del proyecto

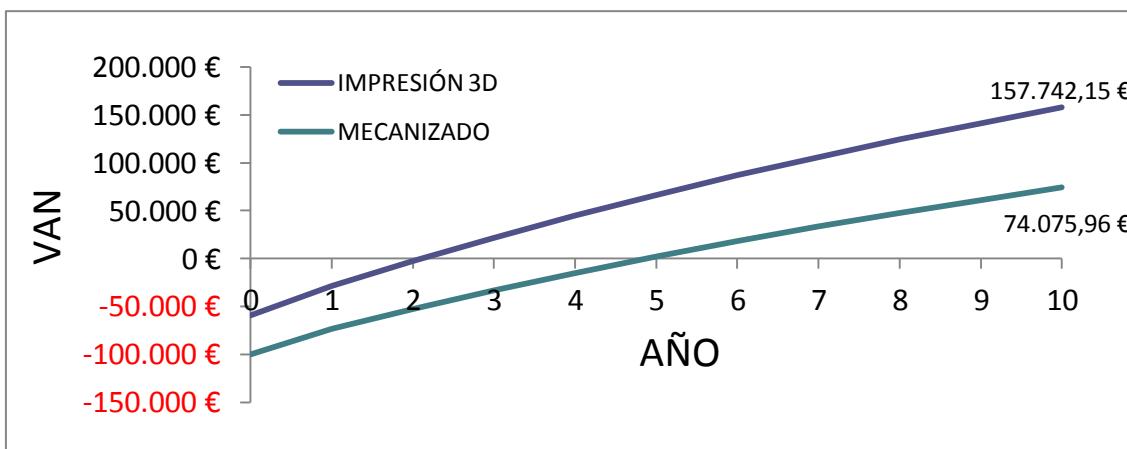


Ilustración 28. VAN en el tiempo de vida útil del proyecto.

Analizando el VAN al final de la explotación se observa que es el 113 % mayor para la producción mediante fabricación aditiva, con la recuperación de la inversión en el segundo año. Además, como se ve en la imagen 29, el TIR también es mayor; por tanto es preferible realizar la fabricación de la férula mediante fabricación aditiva.

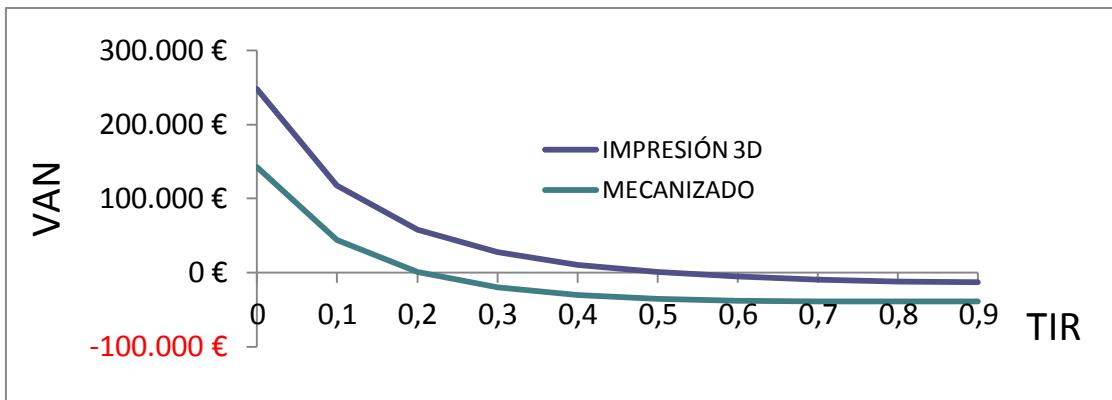


Ilustración 29. TIR para el tiempo de vida útil del proyecto.

## 10. CONCLUSIONES

Con la realización de este proyecto se da un carácter funcional a la técnica de impresión 3D mediante la fabricación de una férula articulada que corrija el problema al caminar que padecen las personas con marcha equina. Este carácter funcional se adquiere a partir de la impregnación con un adhesivo fuerte después de la impresión.

Para determinar ese adhesivo se han realizado ensayos de tracción y de crecimiento de grieta de probetas normalizadas impregnadas con poliuretano alifático y Araldite 2020. Los resultados obtenidos para las diferentes estructuras muestran que el pegamento más resistente es el Araldite 2020 con una diferencia de más del doble. Además estos ensayos señalan a la estructura maciza como la que soporta mayor tensión antes de la rotura.

Sin embargo, estos resultados no son concluyentes, habrá que analizar el comportamiento de una férula creada con estas características ante los esfuerzos a los que será sometida. Así podría verse si estas férulas resistirían o si las piezas dotadas con estructura podrían resultar válidas para una persona con poco peso como puede ser un niño. La ligereza de la estructura le beneficiaría facilitándole la acción de caminar. Para este análisis se propone un estudio por elementos finitos en el que se simulen las fuerzas de un pie al caminar.

La solución al problema de la marcha equina comienza con el diseño de la férula, que es personalizado para cada individuo. Aunque para realizarlo hay que tener en cuenta el peso, para el cálculo del muelle de torsión y la morfología del pie, las pautas generales para el diseño de la férula serán las mismas para cada paciente.

Los resultados del análisis económico muestran que este método de fabricación es más rentable que el método de fabricación utilizado actualmente en el tiempo de vida útil del proyecto, obteniéndose la recuperación de la inversión en el segundo año. Además, la impresión 3D tiene mayor capacidad productiva, ya que se pueden hacer varias piezas al mismo tiempo.

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Curvas de Sobreexpectación de los últimos 6 años.....	10
Ilustración 2. Desplazamiento normal de una persona [8].....	11
Ilustración 3. Anatomía del pie [10].....	14
Ilustración 4. Modelo rígido proporcionado por Podoactiva .....	15
Ilustración 5. Obtención de la parte superior de la férula. ....	15
Ilustración 6. Obtención de la parte inferior de la férula.....	15
Ilustración 7. Vista de las distancias entre maléolos en los tres ejes y acoplamiento de los ejes de rotación de la férula. ....	16
Ilustración 8. Parte superior con acoplamientos.....	16
Ilustración 9. Parte superior con acoplamientos redondeada y corregida. ....	17
Ilustración 10. Limitadores del movimiento en la parte exterior e interior.....	17
Ilustración 11. Férula completa. ....	18
Ilustración 12. Página 134 del catálogo de muelles de torsión de Kern-Liebes TMG.....	19
Ilustración 13. Repetición en el espacio de la estructura dodecaédrica y de la estructura Kelvi .....	20
Ilustración 14. Plano y medidas de probeta 1A para realizar los ensayos de tracción.....	25
Ilustración 15. Máquina de ensayos de tracción JBA modelo 85. ....	26
Ilustración 16. Ensayo de tracción de CST2R2A2_2 con su gráfica correspondiente .....	26
Ilustración 17. Máquina de ensayos de tracción JBA modelo 85 con probeta de ensayo de grieta colocada .....	29
Ilustración 18. Proceso de rotura de la probeta MacizaT_A1. ....	30
Ilustración 19. Plano y detalle de las probetas de ensayo de crecimiento de grieta. ....	30
Ilustración 21. Combado durante el curado.....	33
Ilustración 22. Probetas rotas por la zona no adecuada: ensayo crecimiento de grieta y ensayo de tracción.....	33
Ilustración 23. Probeta CSG4R2A2 antes y después de ser impregnadas.....	33
Ilustración 20. Rotura en la extracción de la pieza de la impresora.....	33
Ilustración 24. Simulación de mecanizado de la parte inferior de la férula.....	36
Ilustración 25. Simulación de mecanizado de la parte superior de la férula. ....	37
Ilustración 26. Impresión de férula articulada completa. ....	38
Ilustración 27. Impresión de dos férulas articuladas completas. ....	38
Ilustración 28. VAN en el tiempo de vida útil del proyecto.....	41
Ilustración 29. TIR para el tiempo de vida útil del proyecto.....	42

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diferentes métodos de fabricación aditiva .....	8
Tabla 2. Propiedades de los adhesivos a analizar.....	22
Tabla 3. Resultado del ensayo de tracción para estudio preliminar.....	23
Tabla 4. Listado de probetas para el ensayo de tracción .....	24
Tabla 5. Listado de probetas para el ensayo de crecimiento de grieta .....	24
Tabla 6. Resultados de los ensayos de tracción .....	27
Tabla 7. Comparativa de los diferentes métodos para analizar la combinación más adecuada.	28
Tabla 8. Resultados del ensayo de avance de grieta .....	30
Tabla 9. Comparativa de las tensiones máximas en los dos ensayos .....	31
Tabla 10. Comparativa de los diferentes métodos para analizar la combinación más adecuada .....	32
Tabla 11. Análisis de costes .....	39
Tabla 12. Coste de estudio de viabilidad.....	40
Tabla 13. Flujo de caja para la explotación con fabricación aditiva .....	40
Tabla 14. Flujos de para la explotación con mecanizado .....	41

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pham D. T., Gault R. S., 1998, *A comparison of rapid prototyping technologies*. International. Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 38 pp. 1257-1287.
- [2] Kruth J. P., Leu M. C., Nakagawa T., 1998, *Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping*. Annals of the CIRP Vol. 47/2/1998 pp. 525-540.
- [3] Berman B., 2012, *3-D Printing: The new industrial revolution*. Business Horizons Vol. 55 pp. 155-162.
- [4] Guillemot F., 2010, *Bioprinting is coming of age: report from the International Conference on Bioprinting and Biofabrication in Bordeaux (3B'09)*.
- [5] Tejado J. M., 2005, *Escaneado en 3D y prototipado de piezas arqueológicas: las nuevas tecnologías en el registro, conservación y difusión del patrimonio arqueológico*. Iberia Vol. 8 pp. 135-158.
- [6] Fenn J., Raskino M., EEUU 2008, *Mastering the Hype Cycle: how to choose the right innovation at the right time*. Harvard Business press.
- [7] Alvarado J. , Bogotá D. C, *Introducción a la clínica*. Centro Editorial Javeriano.
- [8] Igual C., Muñoz E., Aramburu C., 1996, *Fisioterapia General – Cinesiterapia*. Ed. Síntesis.
- [9] Clarkson H., Barcelona 2003, *Proceso evolutivo musculoesquelético*. Editorial Paidotribo.
- [10] Moore K., Dalley A., México 2007, *Anatomía con orientación clínica*. Editorial Médica Panamericana.
- [11] Truong T., Lacroix M., Pham C., 2009, *Towards a more realistic modeling of solid foam: Use of the pentagonal dodecahedron geometry*. Chemical Engineering Science Vol. 64 pp. 5131-5142.
- [12] Brennan-Craddock J., Brackett D., Wildman R., Hague R., 2012, *The design of impact absorbing structures for additive manufacture*. Journal of Physics: Conference Series 382.
- [13] Luxner M., Stampfl J., Pettermann H., 2007, *Numerical simulations of 3D open cell structures – influence of structural irregularities on elasto-plasticity and deformation localization*. International Journal of Solids and Structures Vol. 44, pp. 2990-3003.
- [14] Liesa F., Bilurbina L., España 1990, *Adhesivos industriales*. Editorial Marcombo S.A.
- [15] Mott R., E. P., México 2006, *Diseño de elementos de máquinas*. Ed. Pearson Educación de México.
- [16] Cano J. L., Rebollar R., Lidón I., 2007, *Apuntes de gestión de proyectos*. CEAP. S.L.
- [17] Sackley C., Disler P. B., Turner-Stokes L., Wade D. T., 2009, *Rehabilitation interventions for foot drop in neuromuscular disease (Review)*. The Cochrane Library, Issue 3.

## **ANEXOS**

## A1. Z-PRINTER 650

La impresora 3D disponible para la realización de este proyecto es la Zprinter 650, situada en el *Centro de Integración de Formación Profesional Corona de Aragón*. Esta pertenece al grupo de sistemas de prototipado rápido de impresión 3D. Forma parte del grupo de la tercera generación de impresoras 3D de Zcorp [8].



Ilustración 30. Zprinter 650

## Materiales

Los materiales utilizados son:

- Composite de alto rendimiento como base de construcción de aspecto similar a la escayola, comercialmente llamado ZP150. Para darle la forma deseada se utiliza un aglomerante monocromo (la pieza queda blanca) o a todo color.
- Aglutinante aplicado para unir las partículas en una pieza. De diferentes colores (transparente, amarillo, cyan, magenta y negro) es, a su vez, la tinta para colorear las piezas.
- Infiltrante para darle a la pieza las propiedades necesarias según su funcionalidad. Los propuestos por Zcorp son:
  - Z-bond (cianocrilato): Proporciona colores más brillantes en la pieza.
  - Z-max (epoxi): Las piezas adquieren resistencia y durabilidad tras el proceso de infiltración con este material. Puede ser utilizado para prototipos funcionales.
  - Agua con sal. La pieza permanece frágil. Utilizado simplemente para realizar modelos de forma.

## Descripción

Las partes que componen la impresora 3D son:

- A. Filtro de aire automático: se encarga de que todo el polvo permanezca en el interior de la máquina, emitiendo únicamente aire limpio en la oficina o taller.
- B. Cartucho de aglutinante: contiene el adhesivo a base de agua que solidifica el polvo.

- C. Cubeta de construcción: el área donde se crea el modelo. Tamaño 254 x 381 x 203 mm.
- D. Carro: se desplaza a lo largo del puente para colocar los cabezales de impresión.
- E. Compresor: genera aire comprimido para retirar el polvo de los modelos terminados.
- F. Filtro de residuos: evita que entren residuos sólidos en la tolva durante el reciclado de polvo posterior a la impresión, garantizando la limpieza de la siguiente impresión.
- G. Caja de componentes electrónicos: procesador integrado que controla el funcionamiento de la ZPrinter.
- H. Puente: barra horizontal que avanza y retrocede para generar las capas del modelo.
- I. Tolva: contiene el polvo con el que se crea el modelo.
- J. Depósito: recoge el aglutinante de los cartuchos y lo transfiere al puente.
- K. Estación de mantenimiento: limpia automáticamente los cabezales de impresión cuando es necesario.
- L. Válvula de vacío: el cerebro del sistema de retirada de polvo, que aspira la cámara de impresión, controla el sistema de desbordamiento, retira el polvo de la estación de mantenimiento y aspira el polvo del sistema para reintroducirlo en la tolva.

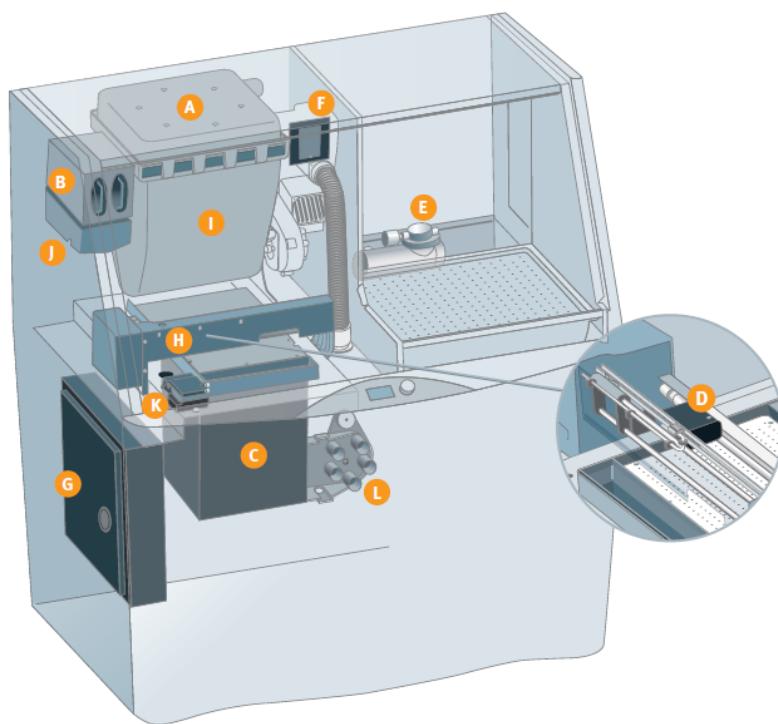


Ilustración 31. Vista en detalle de las partes de la impresora Zprinter 650.

## Funcionamiento

1. Introducción del diseño a imprimir en el programa Zprint, que está conectado con la impresora. Este calcula la cantidad de material de cada tipo que va a consumir y si no hay carencia de ninguno ofrece la posibilidad de iniciar la impresión. En el caso de

faltar algún material habría que reponerlo, si no, la impresión no comienza. Los archivos introducidos pueden estar en formato .STL, .3DS, .WRL, .PLY y .ZPR.

2. Comienzo del proceso poniendo una base de polvo de 3/8" (3.18 mm) de espesor para que la pieza descance sobre ella y su extracción se realice sin que se produzcan roturas de la pieza. Es el puente el que distribuye la capa de polvo mediante un rodillo.
3. Inicio de la fabricación de la pieza. El puente distribuye una capa de 0.1 mm de espesor que a continuación es impregnado con tinta (o aglutinante transparente) por medio de los cabezales de impresión. Con cada capa la cubeta de impresión desciende 0.1 mm. De esta forma la impresora trabaja siempre a la misma altura. El proceso continúa hasta que se completan todas las capas de la pieza.
4. Fase de curado que dura aproximadamente 1h15min.
5. Comienzo del trabajo del operario que debe aspirar todo el polvo sobrante. Este vuelve a la impresora donde será reutilizado.
6. Proceso de desempolvado de la pieza. Se aplica aire comprimido en todas las superficies donde ha quedado polvo adherido. El polvo eliminado es reabsorbido por la máquina para su posterior uso.
7. Infiltración de la pieza con el material adecuado según su funcionalidad.

## Mantenimiento

Para un correcto mantenimiento de la impresora hay que realizar una limpieza de esta tras cada impresión. Esta limpieza consiste en:

- Aspirar la cuba de impresión y alrededores
- Limpieza del filtro
- Limpieza del contenedor de residuos de tinta
- Limpieza de los ejes de la máquina
- Limpieza de la estación de mantenimiento

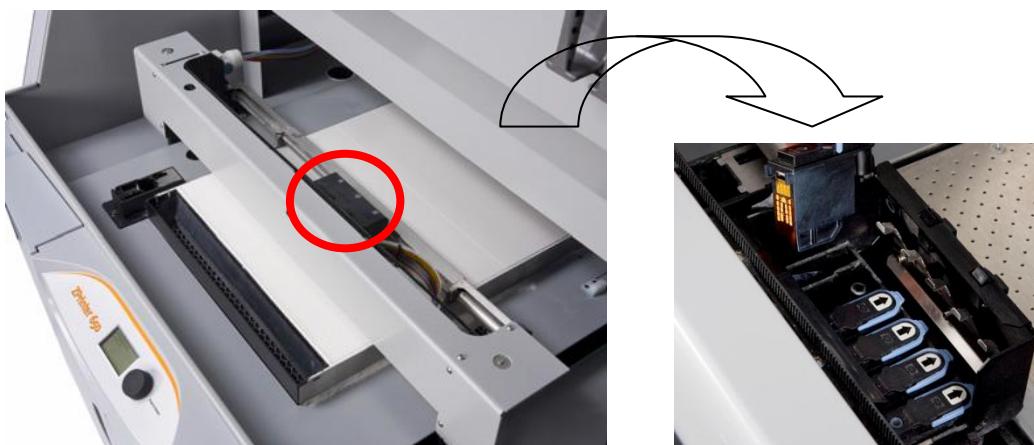


Ilustración 32. Puente y cabezales de impresión

## A2. GUÍA DE USO DE NETFABB

### Elección o diseño de la estructura

Este tutorial comenzará con la creación de una estructura. En el programa aparecen por defecto una serie de estructuras de diferentes tamaños de célula y perfiles de barra. Además el usuario puede dibujar de manera sencilla la estructura que mejor se adapte a sus necesidades. En este caso se va a diseñar una cúbica con nodos en el centro y en cada vértice. Habrá barras que conecten el centro con los vértices así como otras que conecten los lados. Como se va a repetir espacialmente se ha optimizado el número de lados a poner. Estas tendrán un perfil octogonal de diámetro 1 mm.

**Crear estructura: Structure library – Doble click en el símbolo +.**

La célula base es de forma ortoédrica y tiene que haber nodos en la superficie para conectar las células entre sí. La posición de los nodos puede elegirse con una precisión de 0.01 mm.

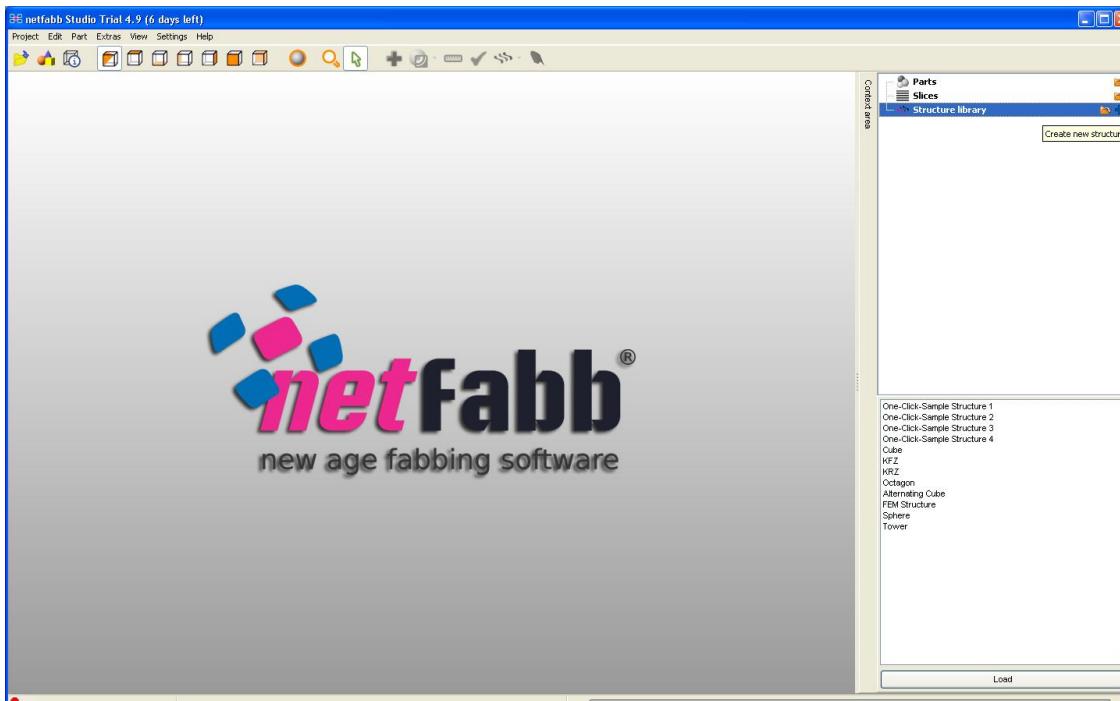


Ilustración 33. Pantalla de inicio.

**Definir estructura: Desplegar Cells – Click en Cell 1.**

Por defecto aparece una célula cúbica de 10 mm de lado. El tamaño se puede cambiar en la pestaña Cell de la parte de abajo.

Para definir la precisión con que se quiere colocar los nodos se utilizan diferentes mallados. En este caso se basta con un mallado de dos elementos. Se define una célula cúbica de 4 mm de lado.

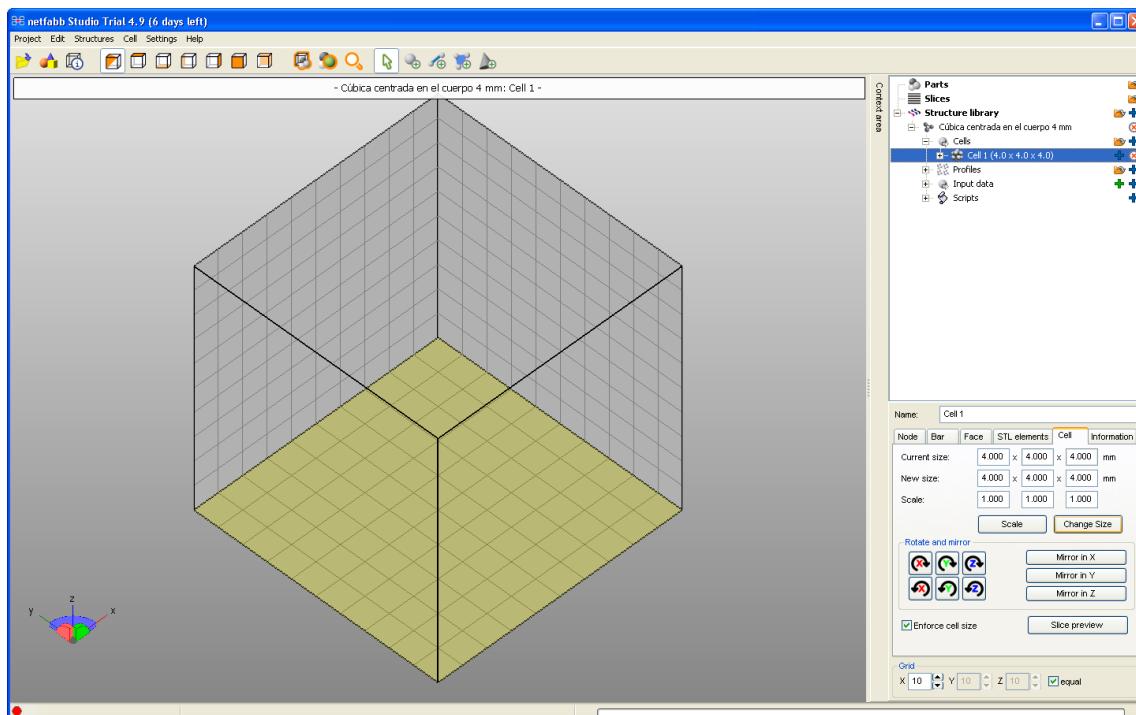


Ilustración 34. Definición tamaño de célula.

**Situar nodos:** Add node – utilizar la malla para definir la posición de los nodos.

**Definir barras:** Add bars – conectar dos nodos.

**Definir perfil:** Desplegar Profile – Click Profile 1 – Create standard geometry, Diameter: 1 mm, Corners: 8.

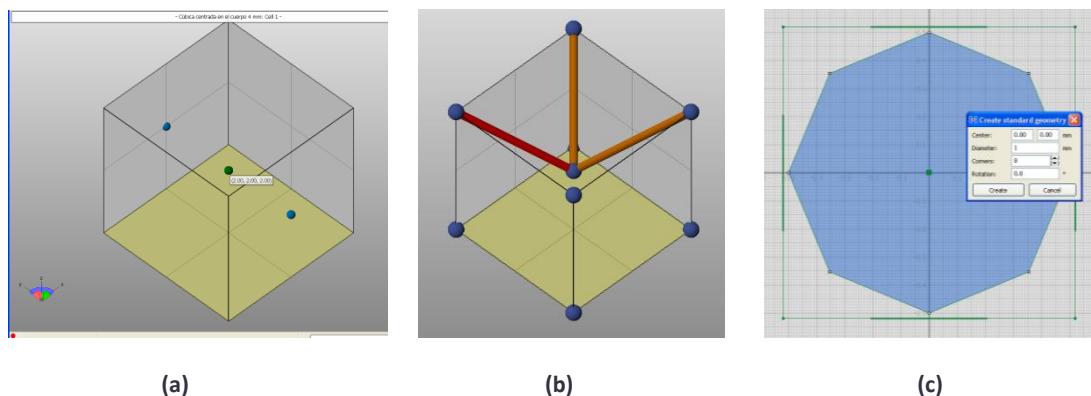


Ilustración 35. Posición de los nodos (a), creación de las barras (b), definición del perfil de barra (c)

**Asociar barra con perfil:** Seleccionar barra o conjunto de barras – en el desplegable profile seleccionar 1 mm.

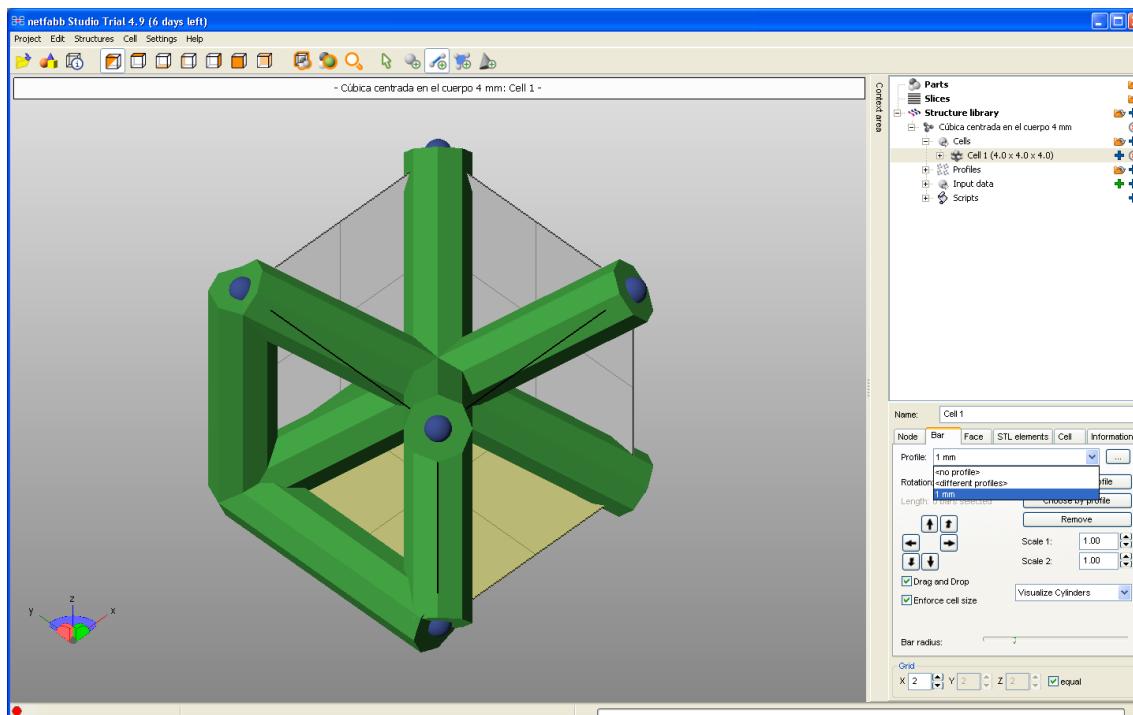


Ilustración 36. Estructura completa.

**Definir volumen de la célula:** Desplegar Input data – click en Volume data 1 – escribir el tamaño de la célula en la casilla Grid size (4mm) – Seleccionar Cell 1 (o nombre asignado a la célula).

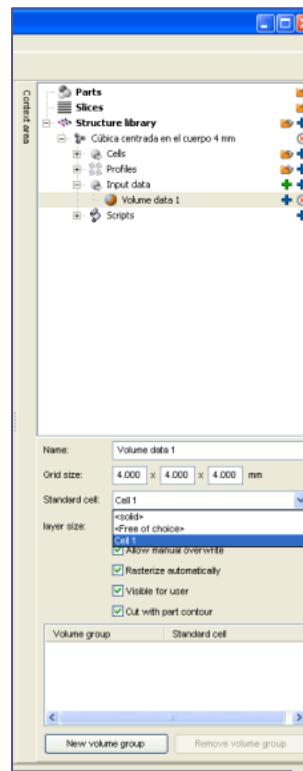


Ilustración 37. Instrucción para definir el volumen de la célula

Esta estructura se puede guardar en un archivo con formato .3SPackage para poder utilizarla posteriormente.

#### Guardar estructura: Structures – Save structure.

### Aplicación a una probeta

A continuación se expondrá el proceso seguido para el diseño de la probeta CCT4R1A1 (probeta de tracción con estructura cúbica centrada en el cuerpo de 4 mm de lado y recubrimiento por uno de sus lados).

#### 1. IMPORTACIÓN DE LA PIEZA A RELLENAR CON LA ESTRUCTURA

La figura que se quiere dotar de estructura se habrá dibujado previamente con uno de los programas de diseño.

**Importar figura: project – add part – seleccionar el archivo – comprobar que no contiene errores – add parts.**

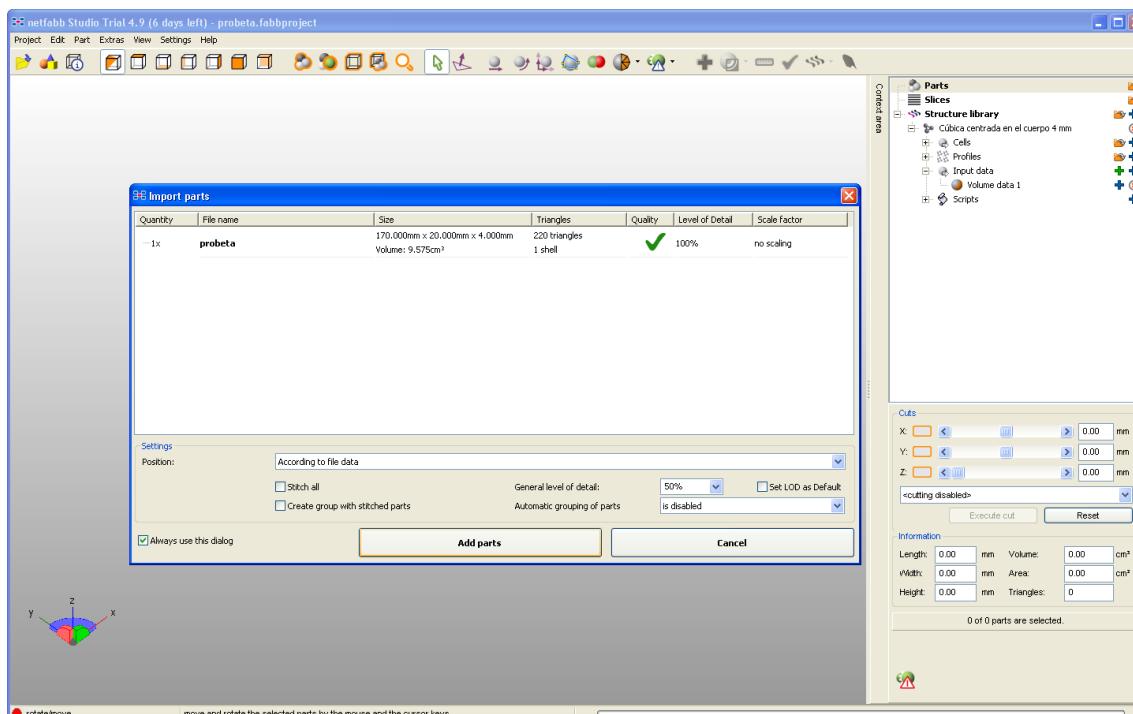


Ilustración 38. Datos de la figura importada.

Si contuviera errores de mallado se podrían reparar.

**Reparación errores: Extras – Repair part – automatic repair – Default repair - execute - apply repair.**

#### 2. APLICACIÓN DE LA ESTRUCTURA Y SIMULACIÓN

**Seleccionar estructura: con la figura sobre la que se va a aplicar la estructura seleccionada hacer click en el símbolo de aplicar estructura – seleccionar la estructura cúbica centrada en el cuerpo 4 mm.**

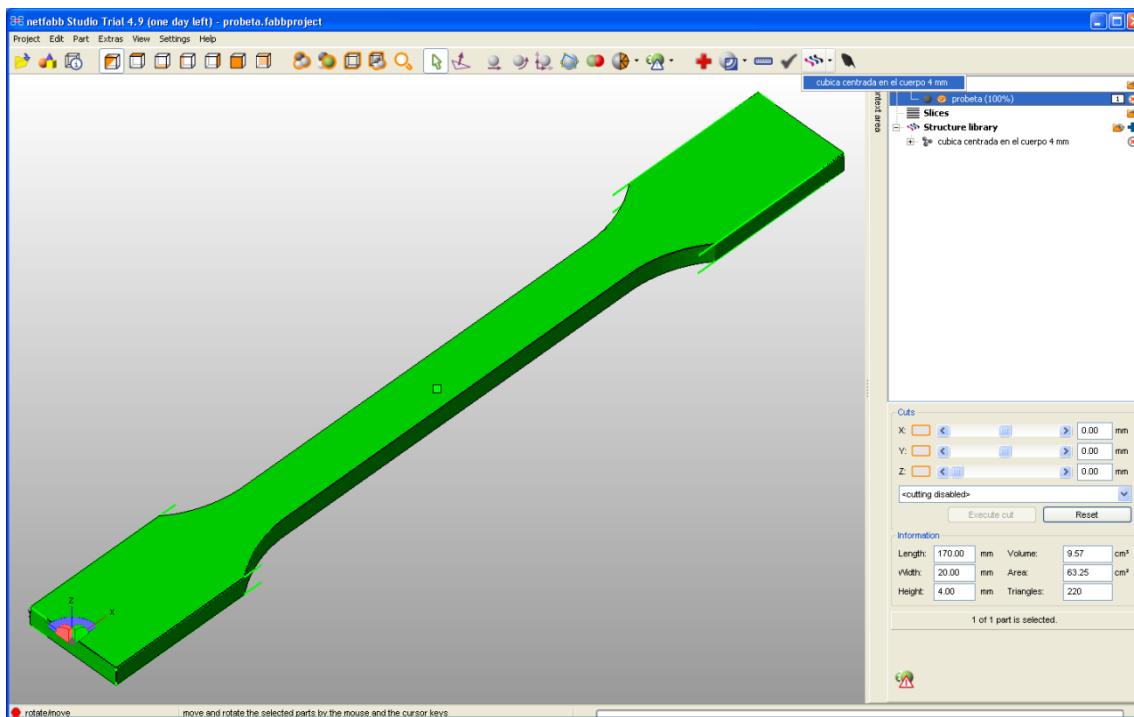


Ilustración 39. Probeta importada y selección de la estructura a aplicar.

Ahora se ve la estructura en el desplegable de la figura probeta. Hay que comprobar en la pestaña **Volume data** que se ha aplicado la célula de las dimensiones requeridas.

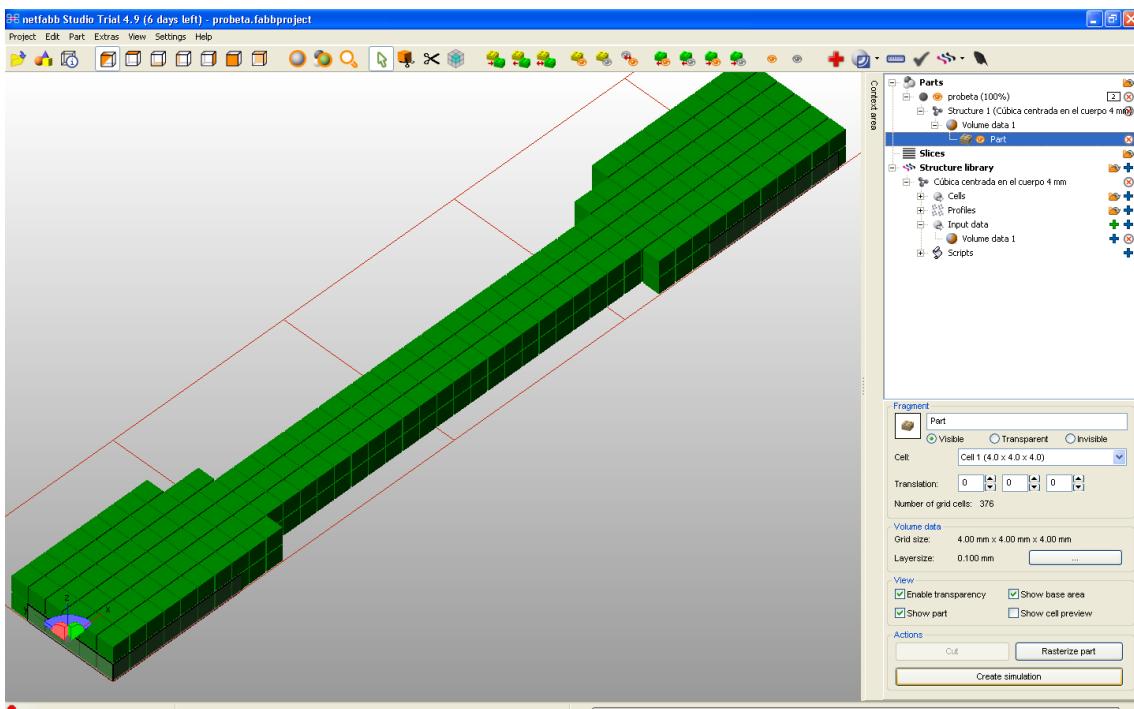


Ilustración 40. Probeta dividida en cubos con el volumen del tamaño de célula

**Aplicar estructura:** Click en **Create simulación** – Click en **Export as STL (Probeta con estructura CCT4)**.

### 3. IMPORTACIÓN Y OPERACIÓN BOOLEANA DE INTERSECCIÓN

La operación realizada ha consistido en colocar una célula en cada parte disponible de la pieza. Así pues no posee exactamente la forma de la probeta. Por esta razón hay que realizar una operación booleana de intersección entre la figura y la figura con estructura.

**Importación de la figura con estructura: project – add part – seleccionar el archivo – comprobar que no contiene errores – add parts.**

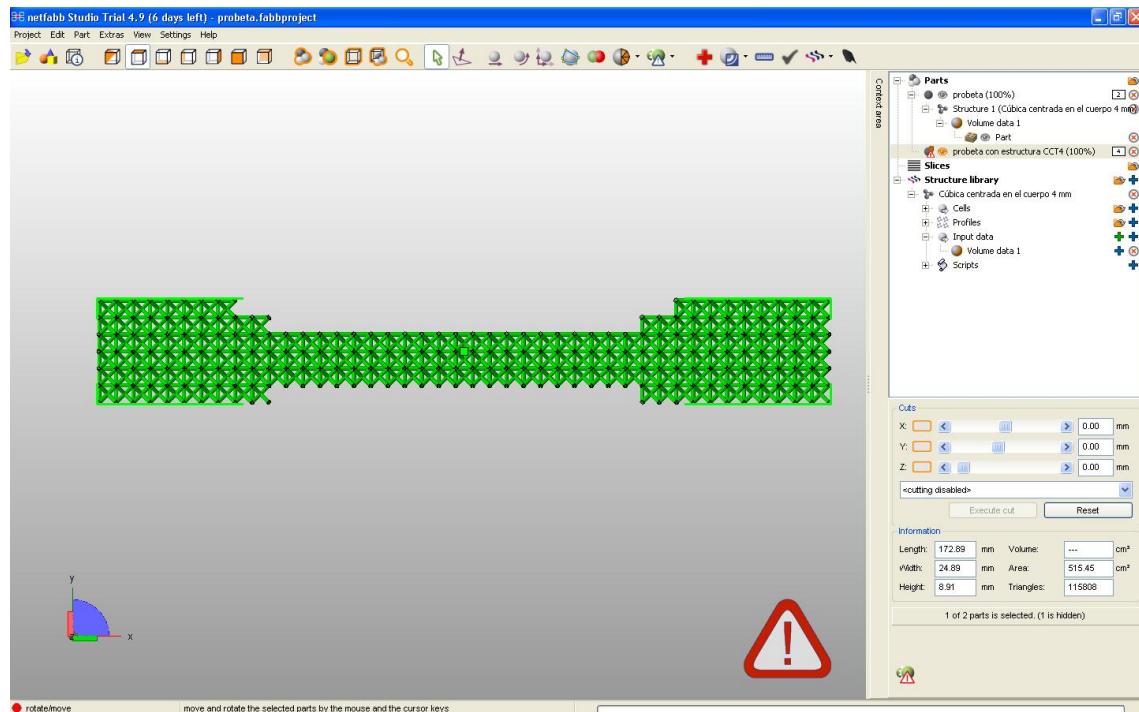


Ilustración 41. Estructura aplicada a los cubos en los que estaba dividida la probeta.

Para visualizar una figura en concreto entre todas las que hay en Parts, hay que seleccionar el símbolo del ojo en dicha figura y deseleccionarlo en el resto.

**Operación booleana: extras – boolean operations – manteniendo pulsada la tecla ctrl seleccionar la probeta y la probeta con estructura – create intersection of all parts – apply.**

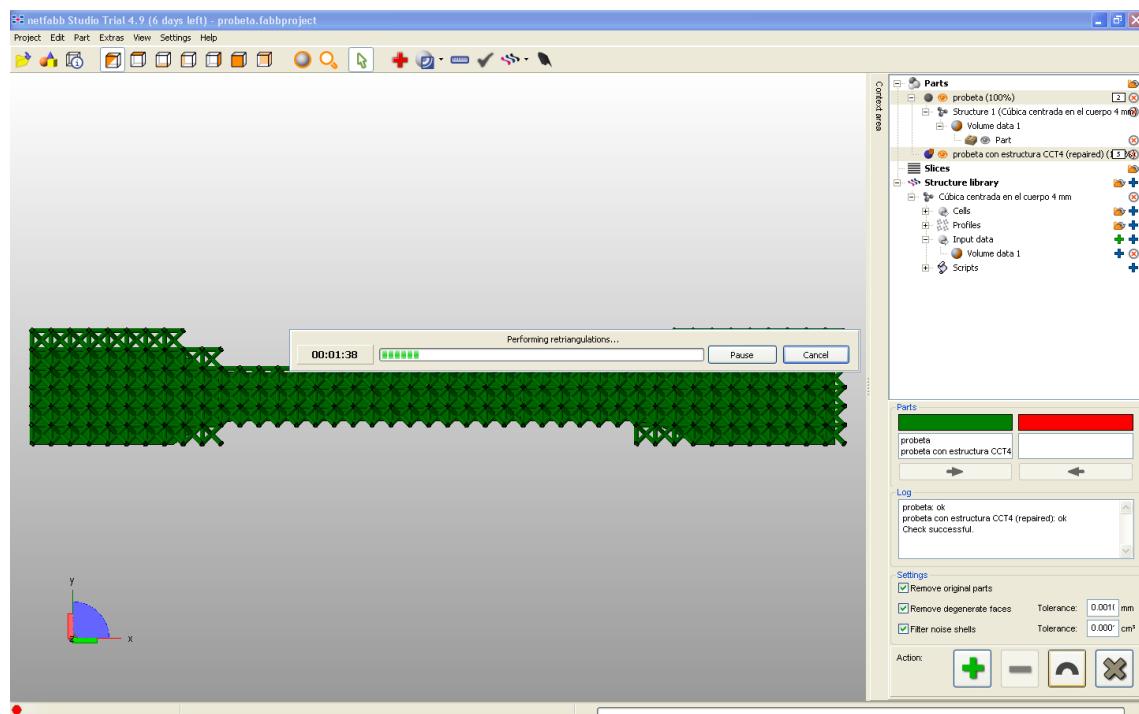


Ilustración 42. Proceso de la operación booleana.

Si se quiere conservar las partes de origen habrá que desmarcar la casilla **Remove original parts**.

Esto puede llevar unos minutos e incluso horas dependiendo de la complejidad de la figura y estructura.

Si con la primera operación booleana no se ha conseguido el resultado esperado se procederá a realizar una segunda.

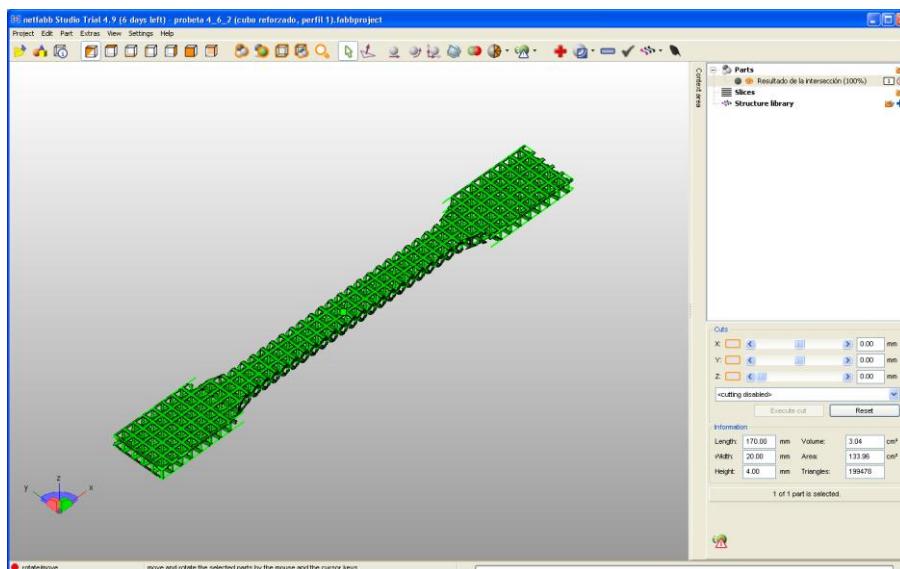


Ilustración 43. Probeta con la estructura aplicada.

#### 4. RECUBRIMIENTOS

En el caso de las figuras recubiertas por uno o ambos lados, habrá que realizar sobre la figura final una operación booleana de unificación con la forma y espesor del recubrimiento (previamente dibujado) y la probeta resultante de los pasos anteriores.

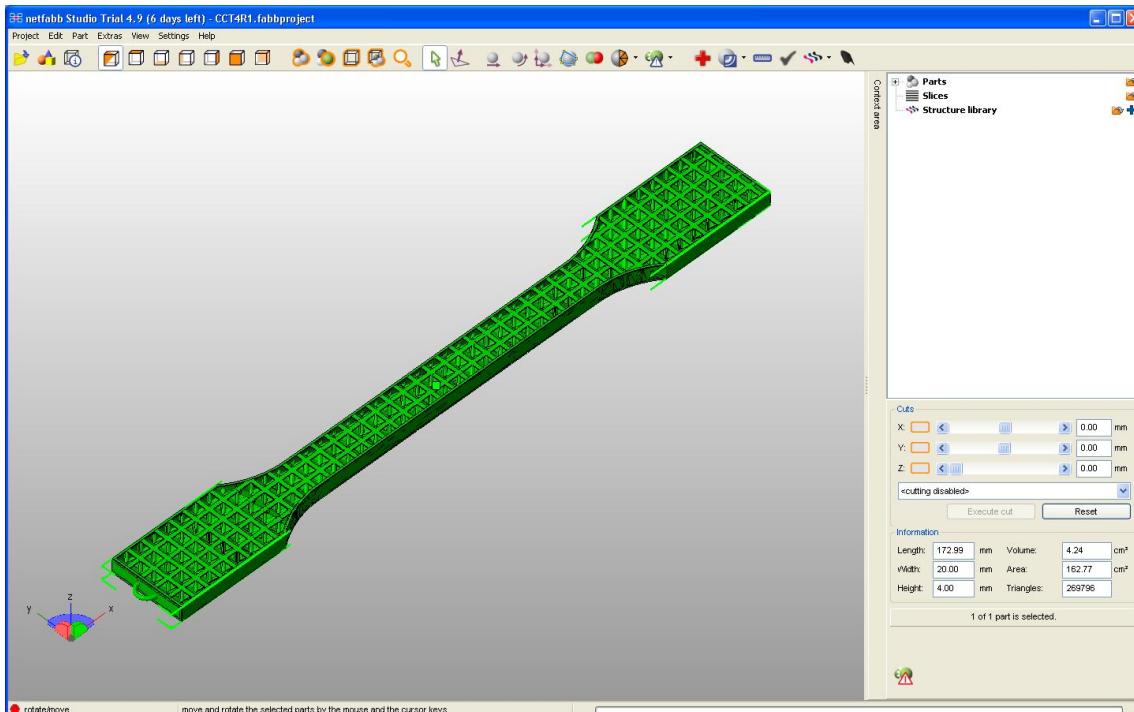


Ilustración 44. Probeta con la estructura aplicada, recubrimientos laterales y gancho.

## Aplicación a la férula

En este apartado se va a mostrar otra forma diferente de aplicación de la estructura a las piezas ya que, debido a las limitaciones en las operaciones de los equipos utilizados para diseñar y manejar los programas, las operaciones booleanas no se ejecutan por ser demasiado complejas.

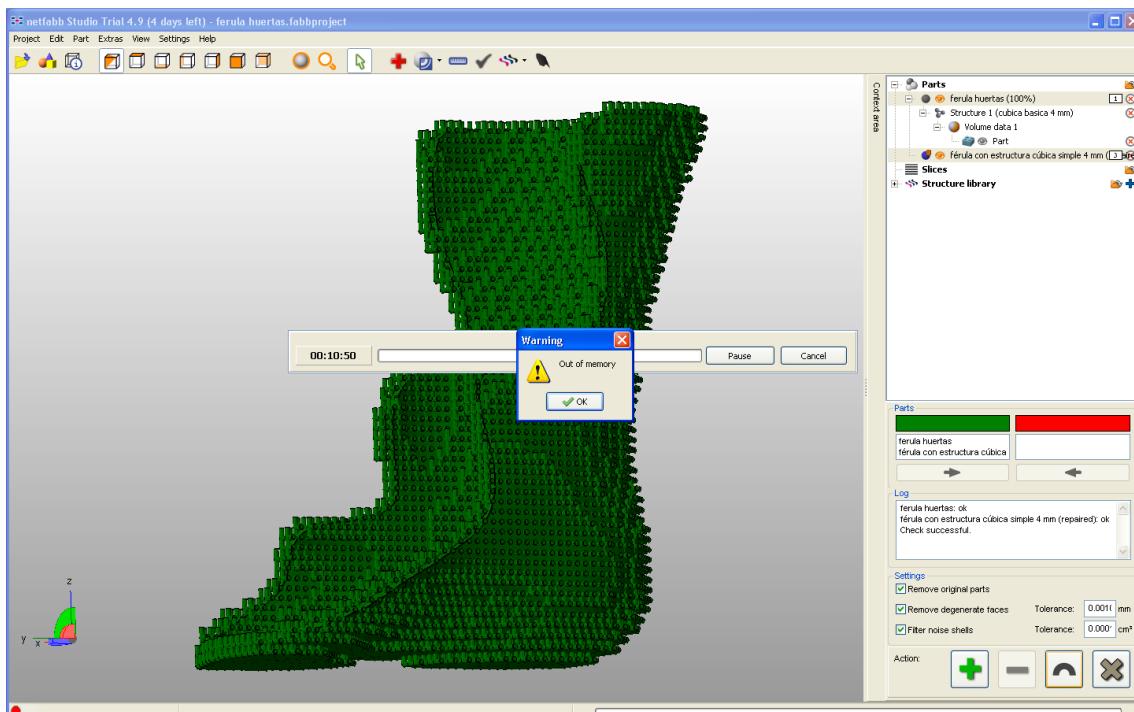


Ilustración 45. Muestra de las limitaciones de los equipos utilizados.

A modo de ejemplo se va a aplicar la estructura a la férula rígida, pero igualmente se podría aplicar a ambas partes de la férula articulada.

**Importación estructura:** Click en símbolo carpeta de la pestaña Structure library – seleccionar estructuras a aplicar.

**Importación férula:** Project – add parts – seleccionar férula.

**Seleccionar estructura:** con la figura sobre la que se va a aplicar la estructura seleccionada hacer click en el símbolo de aplicar estructura – seleccionar la estructura cúbica básica de 4 mm de lado.

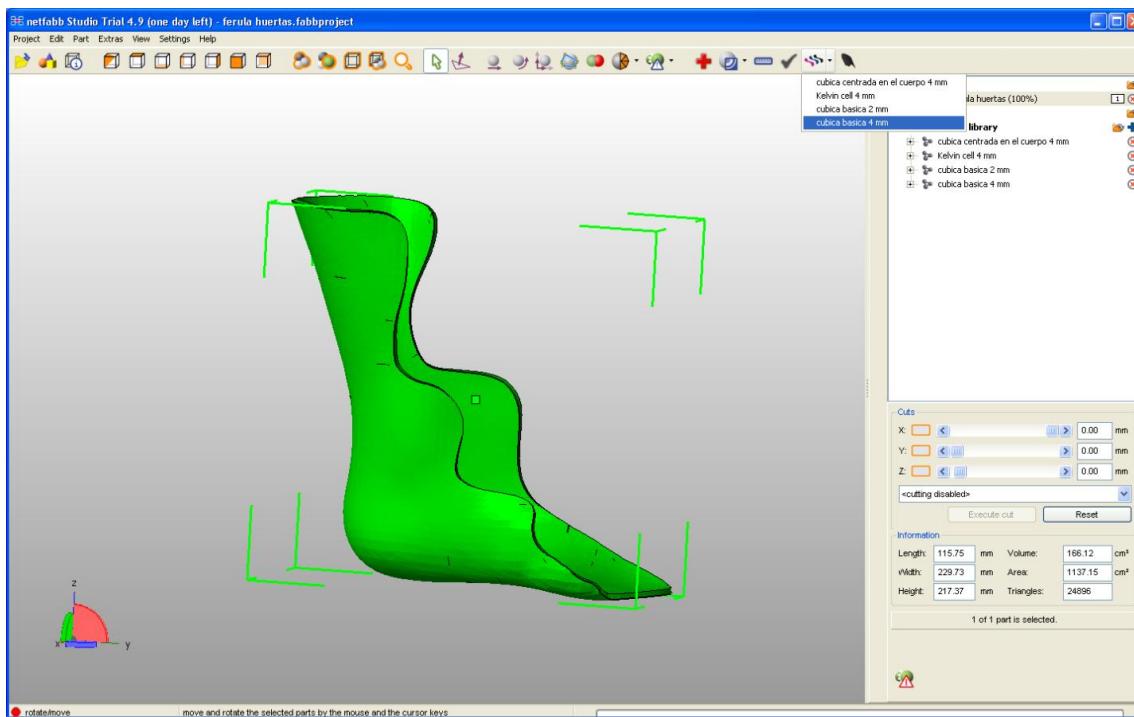


Ilustración 46. Férula importada y selección de la estructura a aplicar.

**Aplicar estructura:** estando seleccionada la pestaña **Structure 1** en el display que aparece debajo seleccionar **cut simulation** y hacer click en **create simulation**.

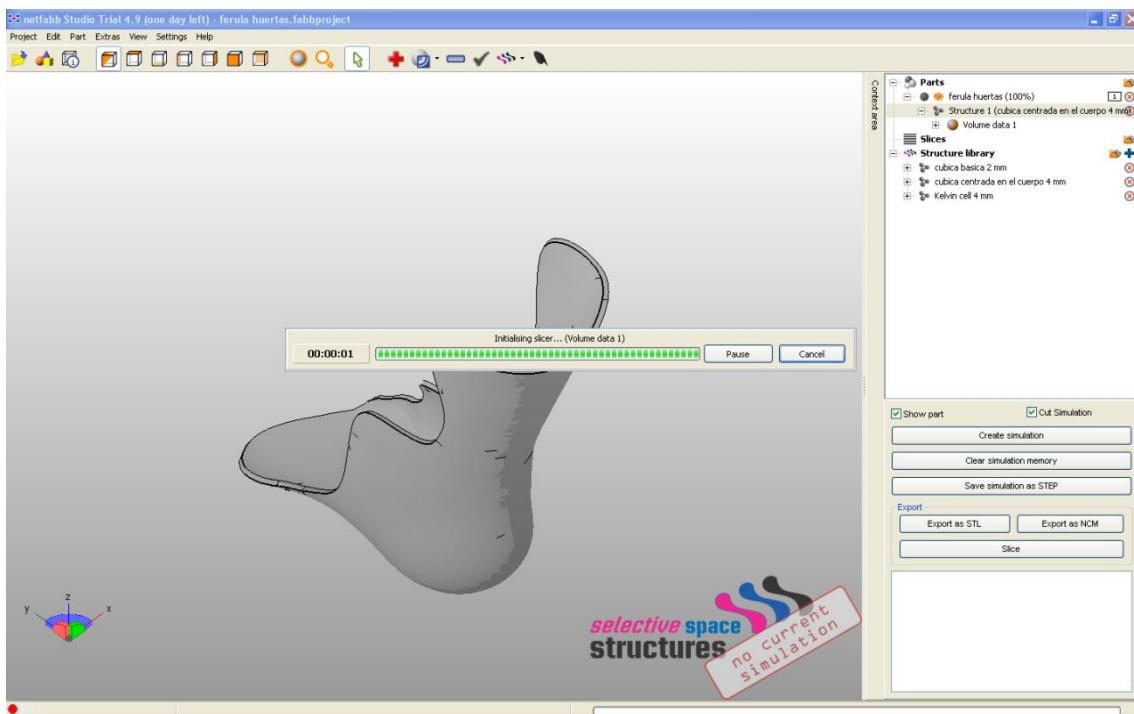


Ilustración 47. Proceso de creación de la simulación.

Al hacerlo de esta forma se evita el tener que realizar las operaciones booleanas de intersección. La estructura se aplica respetando el contorno de la pieza.

Ahora se puede ver una simulación de cómo la impresora construye la pieza capa a capa.

**Simulación: click en *slice* – marcar casilla *Preview calculations* – click en *Play*.**

También se puede realizar manualmente desplazando la barra de la izquierda del display.

Para imprimir esta pieza ya estructurada se exporta como fichero .stl.

**Exportación: Seleccionar *Preview* – click en pestaña *slices* – *export – STL* – Elegir un nombre – click en casilla contigua al nombre – elegir fichero donde se va a guardar – click en *Export*.**

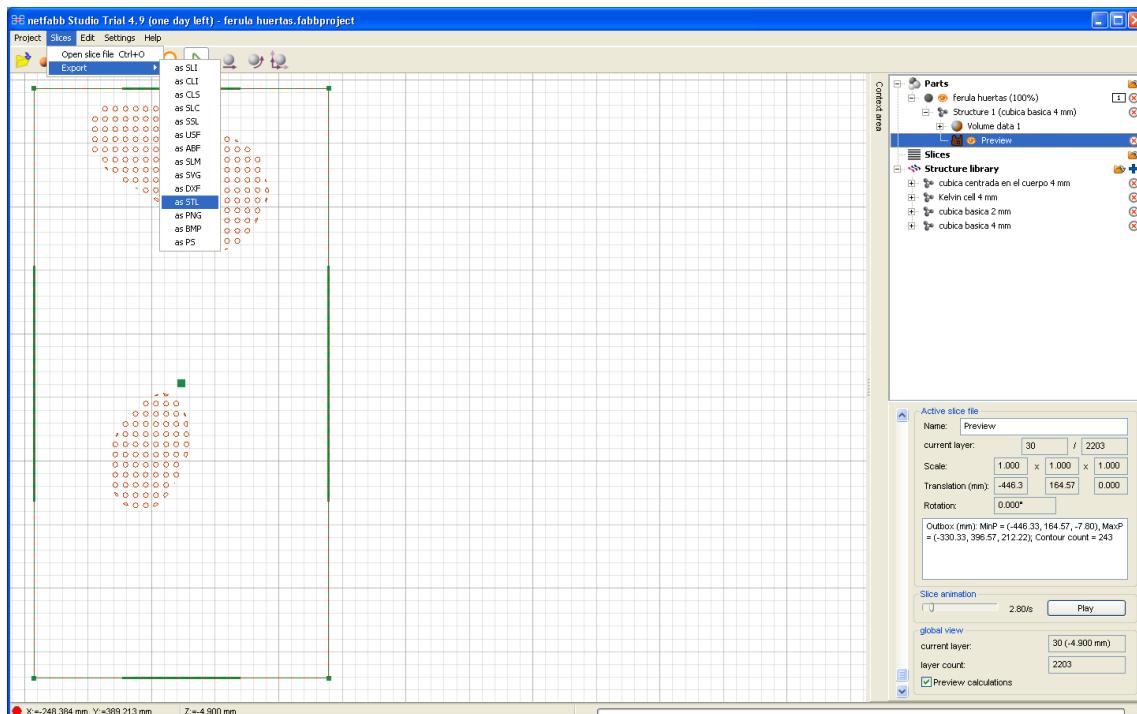


Ilustración 48. Vista del corte de la férula cerca de la base.

Ahora se comprueba si este archivo contiene errores de mallado abriendolo en la misma hoja de proyecto o en otra nueva. Se observa que sí contiene errores así que se procede a su reparación. A continuación se deberá guardar la férula reparada para su impresión.

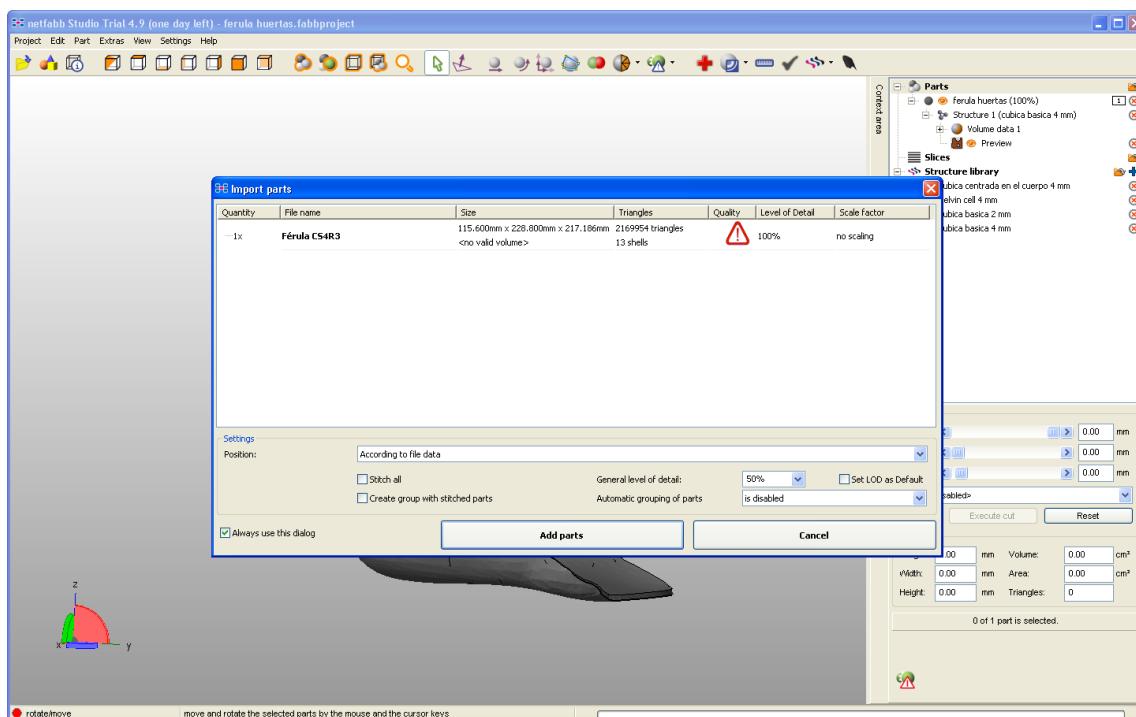


Ilustración 49. Muestra de pieza importada con errores.

**Reparación errores:** Extras – Repair part – automatic repair – Default repair - execute - apply repair.

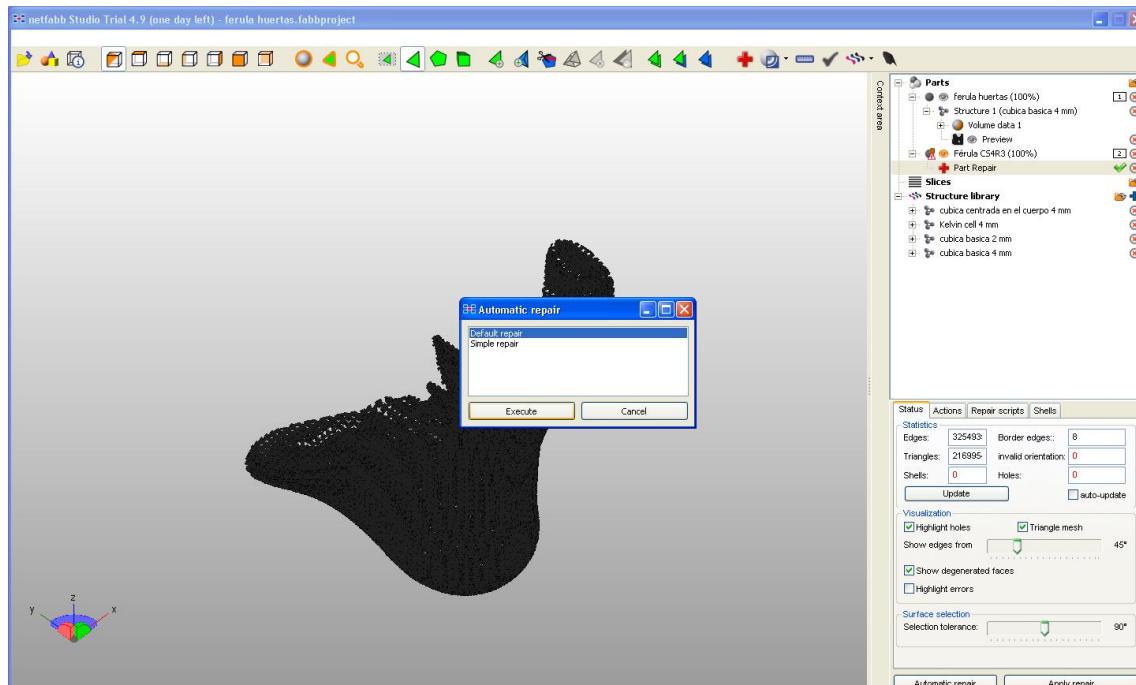


Ilustración 50. Muestra de la pantalla de reparación de errores.

A continuación se deberá guardar la férula reparada para su impresión. En la ilustración 51 se puede ver la férula terminada.

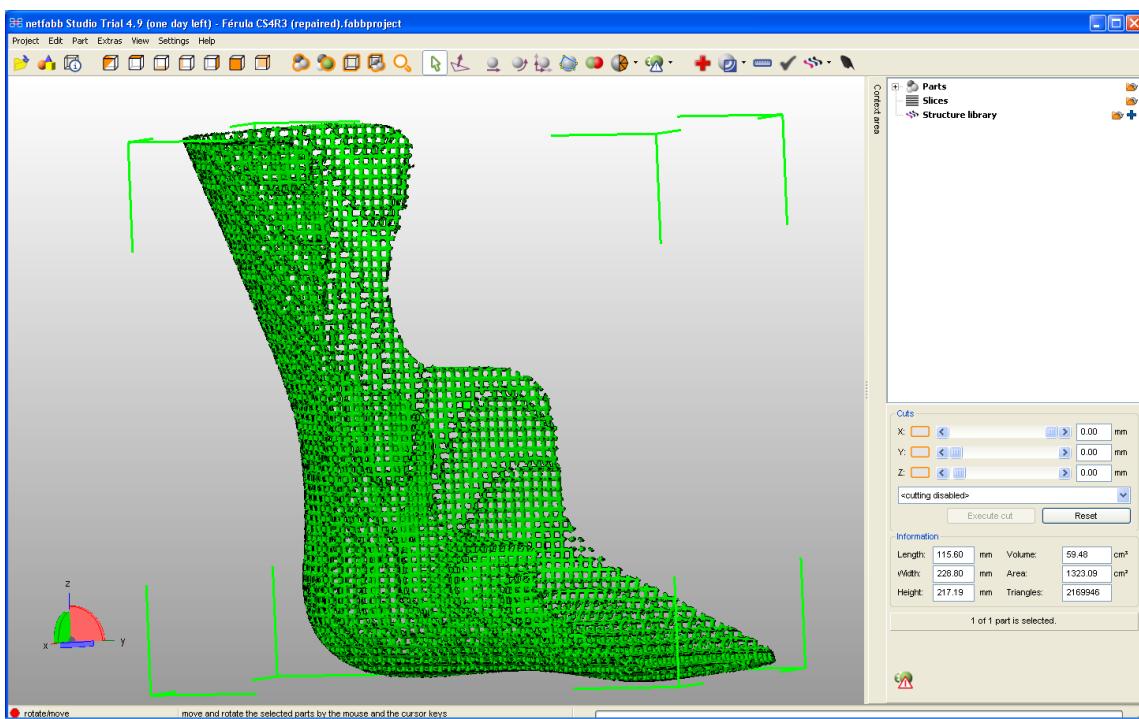


Ilustración 51. Férula terminada.

### A3. PROCESO DE PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS PARA LOS ENSAYOS

A continuación se muestra el proceso completo seguido para realizar los ensayos de tracción; desde la orden de impresión del conjunto de probetas hasta su rotura. También se mostrará el proceso de impregnación con el aditivo y su horneado.

Para que no hubiera problemas en la identificación de las probetas una vez impresas se marcaron con ayuda de un complemento del programa Zprint (Zedit) de acuerdo al código mostrado en el apartado *tipos de probetas*. En la ilustración 52 se muestra la probeta con estructura cúbica centrada en el cuerpo para ensayo de tracción y recubrimiento por ambos lados para ser impregnada con el aditivo 1 (endurecedor de pintura).

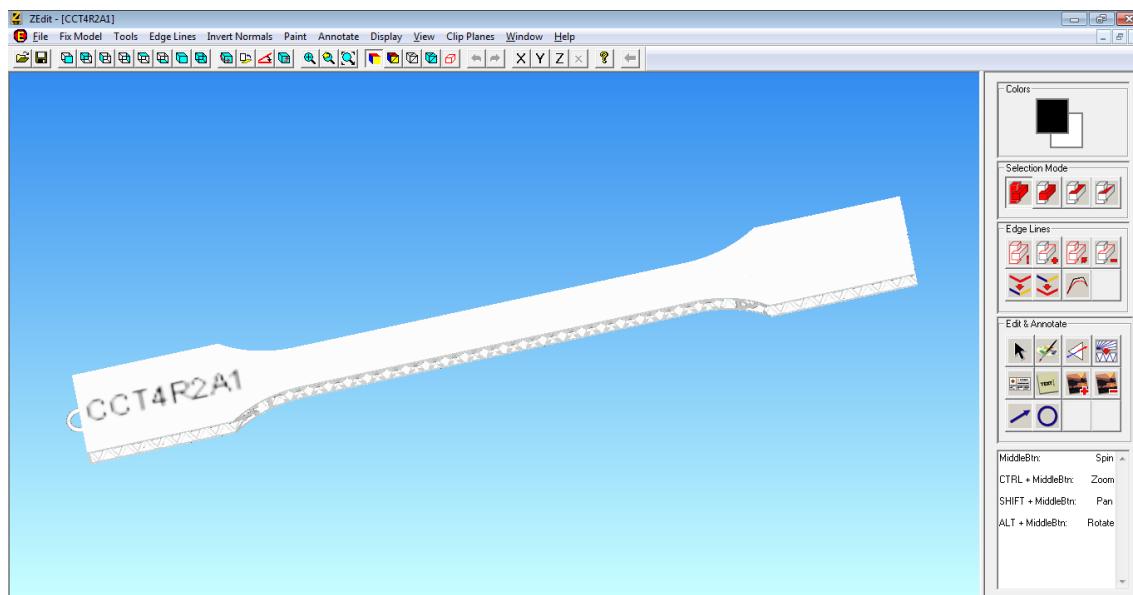


Ilustración 52. Marcado de probetas.

Una vez marcadas todas las tipologías se cargan 5 de cada una en el programa Zprint. El propio programa introduce una capa de separación entre probetas. En la ilustración 53 puede verse la colocación de todas las probetas en la cubeta de construcción.

## PROCESO DE PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS PARA LOS ENSAYOS

ANEXOS

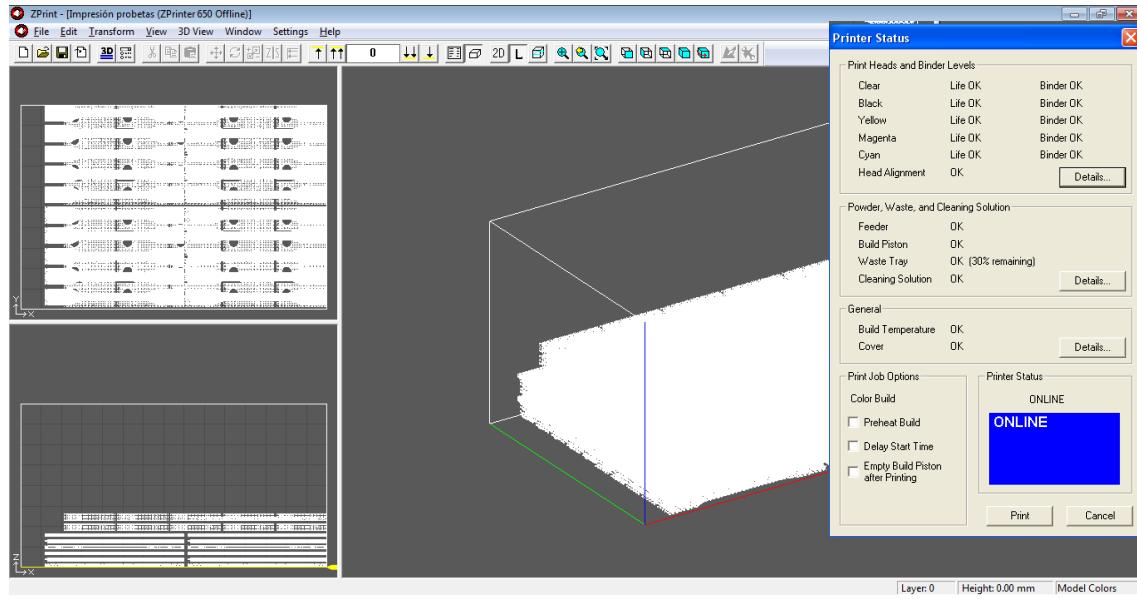


Ilustración 53. Carga de probetas al programa Zprint.

A continuación el programa verifica que hay suficientes componentes para la fabricación y lanza la impresión. La impresora, entonces, comienza a depositar la capa sobre la se construirán las probetas (ilustración 54).



Ilustración 54. Creación de capa base.

En la ilustración 55 se puede apreciar la forma de las probetas mientras se depositan las últimas capas de la impresión.

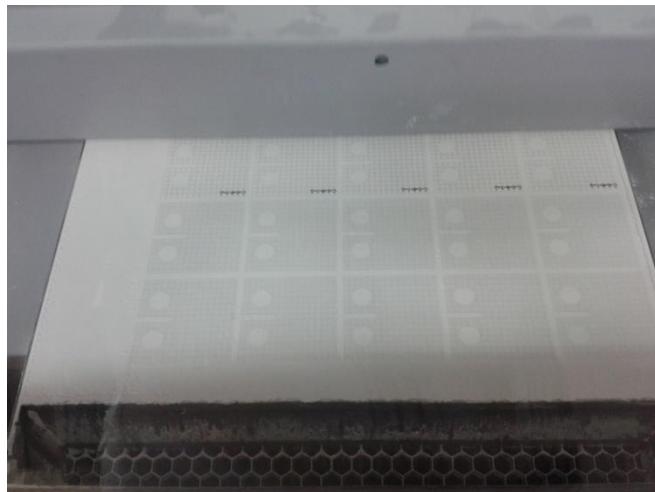


Ilustración 55. Proceso de impresión.

Cuando ha pasado el tiempo de secado, se puede comenzar la extracción de las probetas mediante una brocha conectada a un tubo de aspiración (ilustración 54 a). Con este utensilio se puede limpiar la superficie de la probeta a la vez que la impresora aspira el composite en polvo para su uso posterior. Para una limpieza más exhaustiva, se pasará a la parte de post-proceso, donde se aplicará aire comprimido para eliminar los restos de polvo de las probetas. En este paso hay que tener mucho cuidado y no aplicar directamente el aire sobre la probeta, ya que las capas del recubrimiento son muy finas y podrían perforarse (ilustración 54 b).



(a)



(b)

Ilustración 56. Extracción (a) y limpieza (b) de probetas.

El siguiente paso es el impregnado con los diferentes aditivos, pero antes es necesario pesar las probetas e introducir un hilo de cobre para poder colgar las probetas para su curado en el horno (ilustración 55).

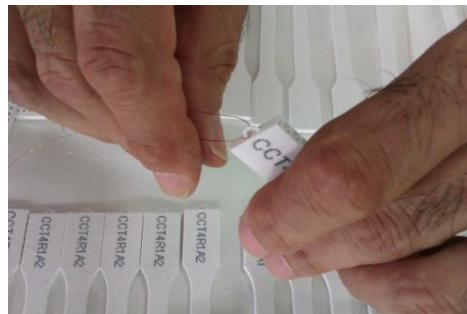
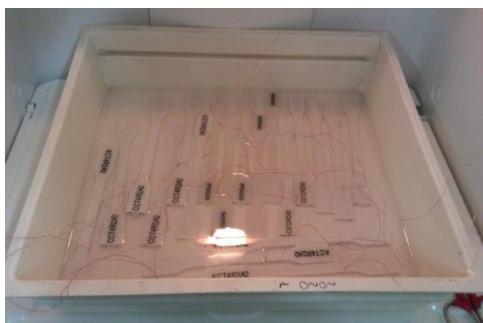


Ilustración 57. Hilo para colgar las probetas.

Debido a la toxicidad de estos pegamentos, la impregnación se realiza en el interior de una vitrina extractora.

El baño con Araldite 2020 (ilustración 55 a) se realiza en una cubeta puesto que es necesario hacer la mezcla de los dos componentes, mientras que la impregnación con el endurecedor de pintura (ilustración 55 b) se hace directamente en su recipiente.



(a)



(b)

Ilustración 58. Impregnación con Araldite 2020 (a) y endurecedor de pintura (b).

A continuación se introducen las probetas impregnadas con Araldite 2020 en el horno a 80° C durante 24 horas (ilustración 56). Las demás, como se comprobó en el *Estudio de los diferentes aditivos*, no es necesario hornearlas, ya que no había cambios en sus propiedades. Es necesario que el curado de ambas se realice con las probetas suspendidas del hilo, ya que, en caso contrario, quedarían pegadas a la superficie sobre la que apoyaran.

Después de este proceso las probetas ya estarían preparadas para que se realizaran los ensayos.

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 30. Zprinter 650 .....	48
Ilustración 31. Vista en detalle de las partes de la impresora Zprinter 650.....	49
Ilustración 32. Puente y cabezales de impresión.....	50
Ilustración 33. Pantalla de inicio.....	51
Ilustración 34. Definición tamaño de célula.....	52
Ilustración 35. Posición de los nodos, creación de las barras y definición del perfil .....	52
Ilustración 36. Estructura completa.....	53
Ilustración 37. Instrucción para definir el volumen de la célula .....	53
Ilustración 38. Datos de la figura importada.....	54
Ilustración 39. Probeta importada y selección de la estructura a aplicar.....	55
Ilustración 40. Probeta dividida en cubos con el volumen del tamaño de célula .....	55
Ilustración 41. Estructura aplicada a los cubos en los que estaba dividida la probeta.....	56
Ilustración 42. Proceso de la operación booleana.....	57
Ilustración 43. Probeta con la estructura aplicada.....	57
Ilustración 44. Probeta con la estructura aplicada, recubrimientos laterales y gancho.....	58
Ilustración 45. Muestra de las limitaciones de los equipos utilizados.....	59
Ilustración 46. Férula importada y selección de la estructura a aplicar.....	60
Ilustración 47. Proceso de creación de la simulación.....	60
Ilustración 48. Vista del corte de la férula cerca de la base.....	61
Ilustración 49. Muestra de pieza importada con errores.....	62
Ilustración 50. Muestra de la pantalla de reparación de errores.....	62
Ilustración 51. Férula terminada.....	63
Ilustración 52. Marcado de probetas.....	64
Ilustración 53. Carga de probetas al programa Zprint.....	65
Ilustración 54. Creación de capa base.....	65
Ilustración 55. Proceso de impresión.....	66
Ilustración 56. Extracción y limpieza de probetas .....	66
Ilustración 57. Hilo para colgar las probetas .....	667
Ilustración 58. Impregnación con Araldite 2020 y endurecedor de pintura .....	667

