

Diseño y fabricación de pares rotativos y prismáticos con impresión 3D

Javier Burgos López

DIRECTOR: MIKEL DÍEZ SÁNCHEZ | CURSO 15-16



1. CONTENIDO

2. RESUMEN	2
3. LISTAS DE CONTENIDO.....	3
3.1. LISTA DE TABLAS.....	3
3.2. LISTA DE ILUSTRACIONES.....	3
3.3. LISTA DE GRÁFICOS.....	4
4. MEMORIA	5
4.1. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	5
4.2. BENEFICIOS DE APLICACIÓN	5
4.3. ESTADO DEL ARTE	5
4.4. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.....	13
4.5. ANÁLISIS DE RIESGOS.....	13
5. METODOLOGÍA	16
5.1. MEDIOS DE FABRICACIÓN	16
5.2. DISEÑOS PRELIMINARES	20
5.3. FABRICACIÓN DE DISEÑOS: ESCALADO Y TOLERANCIAS	20
5.4. METODOLOGÍA DE FABRICACIÓN	30
6. CÁLCULOS. ANÁLISIS MEF	36
6.1. PAR ESFÉRICO.....	36
6.2. PAR ROTATIVO.....	38
6.3. MECANISMO.....	38
7. ANÁLISIS ECONÓMICO	41
8. CONCLUSIONES	44
9. BIBLIOGRAFÍA.....	46
10. ANEXOS.....	47
10.1. ANEXO I: PLANO DE LA RÓTULA SIMPLE.....	47
10.2. ANEXO II: PLANO DE LA RÓTULA CON CAVIDADES	49
10.3. ANEXO III: PLANO DEL PAR PRISMÁTICO SIMPLE	51
10.4. ANEXO IV: PLANO DEL PAR PRISMÁTICO COMPLEJO	53
10.5. ANEXO V: PLANO DEL PAR ROTATIVO COMPLEJO.....	55
10.6. ANEXO VI: PLANO DEL MECANISMO.....	57

2. RESUMEN

El presente documento recoge la analítica y metodología de la impresión 3D aplicada a la fabricación de mecanismos complejos de distintos pares de contacto, incluyendo rotacionales y prismáticos. Se analiza la viabilidad de dicha tecnología, el estado actual de la misma y su uso en el prototipado de mecanismos, e incluso su extensión a la fabricación de mecanismos de aplicación real.

The present paper gathers up the analytic and methodology of 3D print applied over complex mechanisms manufacturing, including diverse contact pairs like rotational and prismatic ones. This technology's viability, its state of art and its application is analyzed, besides its application over mechanisms fast prototyping and real manufacturing.

Dokumentu honek 3D inpresioaren analitika eta metodologia jasotzen du; hau ukipen pare desberdinen fabrikazio mekanismo konplexuetara atxikitutako, baita errotazioko eta prismatikoetara ere. Teknologia honen bideragarritasuna aztertzen da, gaur egungo egoera eta bere erabilera mekanismoen prototipoetan; baita ere bere zabaltzea fabrikazio mekanismoen egiazko erabilerara.

3. LISTAS DE CONTENIDO

3.1. Lista de tablas

TABLA 1 – RIESGOS DEL PROYECTO	14
TABLA 2 – MATRIZ PROBABILIDAD - IMPACTO	15
TABLA 3 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA <i>DIMENSION 1200ES</i>	16
TABLA 4 – PROPIEDADES DEL <i>ABSPLUS</i>	19
TABLA 5 – PRESUPUESTO PARA 3DP	41
TABLA 6 – PRESUPUESTO PARA FABRICACIÓN TRADICIONAL	42

3.2. Lista de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1 – ESQUEMA DE IMPRESIÓN LM	6
ILUSTRACIÓN 2 – MOLDES PARA FUNDICIÓN.....	7
ILUSTRACIÓN 3 – SECCIÓN DE CAPAS DE CARRETERAS	7
ILUSTRACIÓN 4 – SECCIÓN OPTIMIZADA DE MATERIAL.....	8
ILUSTRACIÓN 5 – DIRECCIONES DE IMPRESIÓN DE LAS PROBETAS.....	11
ILUSTRACIÓN 6 – FORMAS Y ZONAS DE FRACTURA EN ENSAYO DE FATIGA	12
ILUSTRACIÓN 7 – <i>DIMENSION 1200ES</i>	16
ILUSTRACIÓN 8 – ÁREA DE TRABAJO	17
ILUSTRACIÓN 9 – SISTEMA DE LAVADO	17
ILUSTRACIÓN 10 – RÓTULA SIMPLE	20
ILUSTRACIÓN 11 – RÓTULA ESFÉRICA CON CAVIDADES	21
ILUSTRACIÓN 12 – RÓTULAS A 0.5, 0.375 Y 0.25MM	21
ILUSTRACIÓN 13 – ESTRÍAS SUPERFICIALES.....	22
ILUSTRACIÓN 14 – RÓTULAS A 1:2 Y 1:2	22
ILUSTRACIÓN 15 – ROTURA EN EL CASQUILLO.....	23
ILUSTRACIÓN 16 – ROTURA POR MATERIAL DE SOPORTE NO DISUELTO	23
ILUSTRACIÓN 17 – RÓTULA ESCALADA CON PARED GRUESA	24
ILUSTRACIÓN 18 – PAR PRISMÁTICO SIMPLE	24
ILUSTRACIÓN 19 – PARES PRISMÁTICOS	25
ILUSTRACIÓN 20 – BLOQUEO POR DEFORMACIÓN	25
ILUSTRACIÓN 21 – PAR PRISMÁTICO A ESCALA 1:2	26
ILUSTRACIÓN 22 – CORTE Y REPARACIÓN.....	26
ILUSTRACIÓN 23 – PAR PRISMÁTICO COMPLEJO	27
ILUSTRACIÓN 24 – SECCIÓN DE LOS CARRILES DE RODAMIENTOS.....	27
ILUSTRACIÓN 25 – PAR ROTATIVO SIMPLE	28
ILUSTRACIÓN 26 – PAR ROTATIVO	28
ILUSTRACIÓN 27 – DESPIECE DE PAR ROTATIVO.....	29
ILUSTRACIÓN 28 - MECANISMO	30
ILUSTRACIÓN 29 – CANALES DE EVACUACIÓN	32
ILUSTRACIÓN 30 – CANALES DE EVACUACIÓN	32
ILUSTRACIÓN 31 – RÓTULA ESFÉRICA DE “CINTURÓN”	33
ILUSTRACIÓN 32 – MECANISMO IMPRESO.....	33
ILUSTRACIÓN 33 – DAÑOS EN LA ZONA DE CONTACTO	34
ILUSTRACIÓN 34 – CANALES DE LIMPIEZA EN PAR ROTACIONAL	34

ILUSTRACIÓN 35 – DETALLES DEL MECANISMO	35
ILUSTRACIÓN 36 – RÓTULA A TRACCIÓN	36
ILUSTRACIÓN 37 – RÓTULA A FLEXIÓN	36
ILUSTRACIÓN 38 – RÓTULA A TRACCIÓN-FLEXIÓN	37
ILUSTRACIÓN 39 – PAR ROTATIVO A TRACCIÓN-FLEXIÓN	38
ILUSTRACIÓN 40 – DETALLE DEL ESFUERZO MÁXIMO	38
ILUSTRACIÓN 41 – MECANISMO SOMETIDO A TORSIÓN	39
ILUSTRACIÓN 42 – ZONAS DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES	39
ILUSTRACIÓN 44 – MECANISMO SOMETIDO A FLEXIÓN	40
ILUSTRACIÓN 43 – PANDEO DE LA BASE	40
ILUSTRACIÓN 45 – ZONA DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES	40

3.3. Lista de gráficos

GRÁFICO 1 – FLUJOGRAMA DE MODELADO EXPERIMENTAL	8
GRÁFICO 2 – CURVA TENSIÓN-ELONGACIÓN ENSAYO DE TRACCIÓN A PROBETA	9
GRÁFICO 3 – CURVA TENSIÓN-ELONGACIÓN ENSAYO DE TRACCIÓN A FILAMENTO	10
GRÁFICO 4 – CURVA SN ENSAYO DE FATIGA A PROBETA	10
GRÁFICO 5 – CURVA DE TRACCIÓN-TIEMPO DE ENSAYO FATIGA	11
GRÁFICO 6 – GRÁFICA TENSIÓN-DEFORMACIÓN ENSAYO DE FATIGA	12
GRÁFICO 7 – MATRIZ DAFO	14
GRÁFICO 8 – COMPARATIVA DE COSTES (FABR. TRADICIONAL)	43
GRÁFICO 9 – COMPARATIVA DE COSTES (3DP)	43

4. MEMORIA

4.1. Objetivos y alcance

En este ensayo, se tratará la aplicación de la tecnología de impresión 3D enfocada a la fabricación de sistemas mecánicos. De esta forma, el objetivo del mismo es diseñar y fabricar distintos modelos de pares de rotación y prismáticos aplicables a la manufactura real.

Se espera analizar la problemática de la fabricación con impresión 3D frente a métodos tradicionales de sistemas mecánicos complejos; implementar las soluciones diseñadas en sistemas reales y estudiar su integridad mecánica y resultado de fabricación.

4.2. Beneficios de aplicación

Los sistemas tradicionales de fabricación de mecanismos implican el uso de métodos altamente complejos para cumplir con las tolerancias y requisitos del uso real de los mismos. Fundamentalmente, se emplean centros de mecanizado, cuyo coste inicial debido a la inversión en diseño y desarrollo de los mismos, así como de los materiales y el coste de fabricación del propio centro es muy alto.

El objetivo del presente documento es pasar a un medio de fabricación cuya inversión inicial queda compensada por la relativa sencillez de fabricación, así como rapidez e inferior complejidad. Se pasa de requerir fabricar cada parte del mecanismo por separado y ensamblarlas con unas tolerancias de montaje ajustadas y un proceso complicado, a poder diseñar el mecanismo y fabricarlo íntegramente en conjunto, de tal forma que no es necesario proceso de montaje posterior. Esto dota al mecanismo de una mayor integridad mecánica, además de que permite un mejor sellado del mismo ante contaminantes externos.

4.3. Estado del arte

El prototipado rápido ha visto importantes avances en la última década. Desde su nacimiento como simples métodos para modelado conceptual, se han llegado a desarrollar múltiples tecnologías (estereolitografía SLA, sinterizado selectivo de material SLS, fabricación laminada de objetos LOM o modelado por deposición fundida FDM) (Tai, Garg, & Savalani, 2014), así como numerosos tratamientos posteriores y materiales que permiten diseñar y crear verdaderas piezas de uso real (Dimitrov, Schreve, & de Beer, 2006).

Fundamentalmente, hay dos tecnologías de impresión 3D con distintos principios:

- DoD (*Drop-On-Drop*): se imprimen sucesivas capas de material, superponiéndolas progresivamente, hasta conformar la forma final del material. De esta forma, se parte de una superficie vacía, y se añade material sucesivamente.
- DoB (*Drop-On-Bed*): lo que se "imprime" es el líquido cohesionador, que es un producto químico que establece los enlaces químicos entre las partículas de material. De esta forma, se parte de un recipiente con polvo del material de acabado, y se añade aglutinante en las zonas donde debe cohesionarse el material.

La tecnología más extendida, por su versatilidad en cuanto a materiales, es la DoD, también llamada *Layered Manufacturing* (desde ahora, LM). Este modo de fabricación (Bellini & Güçeri, 2003) se basa en lo

siguiente: se emplea un filamento de material polimérico, al que se hace atravesar un calefactor que lo funde; es extruido a continuación a través de una boquilla de inyección que se mueve en el plano x-y. Al depositarse en la base, se enfría rápidamente y se solidifica, dejando una capa de "carreteras" (Ilustración 1 – Esquema de impresión LM Ilustración 1). Sucesivas capas de carreteras generan la forma tridimensional deseada, la cual se ha obtenido por seccionamiento del modelo CAD a fabricar.

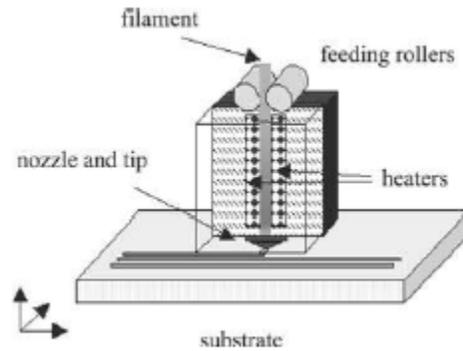


Ilustración 1 – Esquema de impresión LM

La impresión 3D (desde ahora, 3DP) se emplea en distintos ámbitos de la tecnología. El uso que nos ocupa es la fabricación de mecanismos útiles en sistemas reales. Posee la mayor ventaja respecto al resto de medios de fabricación: su velocidad (Dimitrov, Schreve, & de Beer, 2006). Además, existen varias ventajas adicionales para la 3DP.

En primer lugar, se mejora la capacidad de diseño. Los medios tradicionales se quedan cortos en muchas ocasiones con la fabricación de superficies interiores, dado que las herramientas quedan fuera de su alcance; todo se ve reducido a fabricación con medios como la fundición a la cera perdida, que si bien da un bajo índice de tolerancia, es un procedimiento caro y técnicamente complejo.

Por otro lado, se mejora la interface de materiales. En la técnica habitual, las interfaces de materiales no se dan de forma natural, sino que deben fabricarse por procedimientos separados y aunarse en un mismo componente mediante ensamblaje mecánico. Sin embargo, mediante la 3DP de tipo DoD, cambiar de material es tan sencillo como alternar la alimentación entre varios depósitos. Por ejemplo, Jackson et al. (Dimitrov, Schreve, & de Beer, 2006) han sido capaces de controlar la alternancia de materiales hasta una resolución de $100\mu\text{m}$; e incluso, emplear materiales en "degradado", de tal forma que el cambio entre un material y otro no es una superficie continua sino que es un gradiente. Sin embargo, la limitación a este proceso está en el CAD, por lo que esta tecnología aún está en desarrollo.

La 3DP ha demostrado capacidad (Dimitrov, Schreve, & de Beer, 2006) para trabajar con materiales variados.

- Metales: el empleo de metales en polvo abre la posibilidad de alear distintos metales que de forma metalúrgica sería muy compleja, mediante sinterizado. Por ejemplo, aleaciones de relación 6:4 acero inoxidable-bronce, cuyas propiedades combinadas son únicas.
- Conductores: muchos materiales con una muy alta conductividad no son empleados de forma común por el coste del mismo; pero también, por la dificultad de la fabricación de piezas con ellos. El empleo de la 3DP mejora cualitativamente dicha fabricación.

- Elastómeros: el trabajo de materiales gomosos en la industria lleva clásicamente asociado el manejo de dichos materiales en forma fluida, empleando moldes, amasadoras, etc.; la 3DP facilita la logística, partiendo de material en polvo, mucho más fácil de operar.

Por último, la fabricación de moldes para fundición (Ilustración 2) ha mejorado considerablemente con la impresión 3D. Esto se debe a que se evita mecanizar materiales de alta resistencia (necesarios por sus propiedades térmicas ante altas temperaturas), labor habitualmente difícil, usando estos materiales en polvo y fabricando directamente el molde con la forma final.



Ilustración 2 – Moldes para fundición

Uno de los problemas originados por la impresión LM es la anisotropía, como se ve en la Ilustración 3. Debido a que cada capa se hace de forma independiente, es muy difícil asegurar la continuidad de propiedades tanto a lo largo de las carreteras de material y mucho menos entre las distintas capas. Esto conlleva también que dependiendo de la trayectoria de la deposición de material, así como de la interacción entre las carreteras, afecta a las propiedades y resistencia del producto acabado. Dicho afecto se debe a la aparición de tensiones térmicas, fundamentalmente (Bellini & Güçeri, 2003).

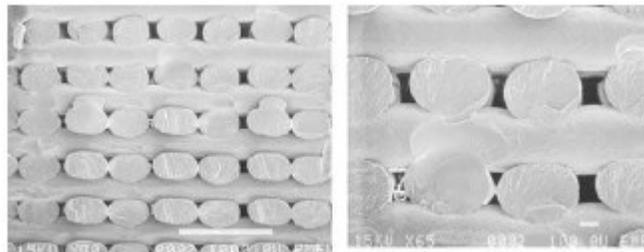


Ilustración 3 – Sección de capas de carreteras

Un estudio realizado sobre dicha disposición, y la alternativa de emplear filamentos de material directamente (Bellini & Güçeri, 2003), demuestra que el módulo elástico del conjunto es muy similar, pero la elongación de fluencia en el caso de filamentos es un tercio a la del uso de carreteras. Por tanto, la extrusión no tiene relevancia en cuanto a la tensión máxima, pero el uso de carreteras reduce la deformación. En general, la disposición física del material durante la fabricación tiene una influencia alta sobre las propiedades y el comportamiento final del elemento fabricado, debido a la direccionalidad de las mismas.

Se han realizado numerosos estudios analizando la optimización de las carreteras de material depositado. Es de alta importancia la relación física entre las propiedades de cada fibra de material y las propiedades del conjunto de las mismas, permitiendo así que la respuesta mecánica global sea predecible (Thomas, Rodríguez, & Renaud, 2003). Por otro lado, la capacidad de computado de las herramientas CAD empleadas (Dimitrov, Schreve, & de Beer, 2006) (Thomas, Rodríguez, & Renaud, 2003) también alteran en gran medida la resistencia del material acabado. Esto se debe a que el programa CAM asociado no sólo debe determinar la geometría de la pieza, sino cual es la estrategia de disposición de los caminos de material para que la resistencia sea máxima. Para ello, se han propuesto diversas estrategias de optimización (un ejemplo de sección optimizada en la Ilustración 4).

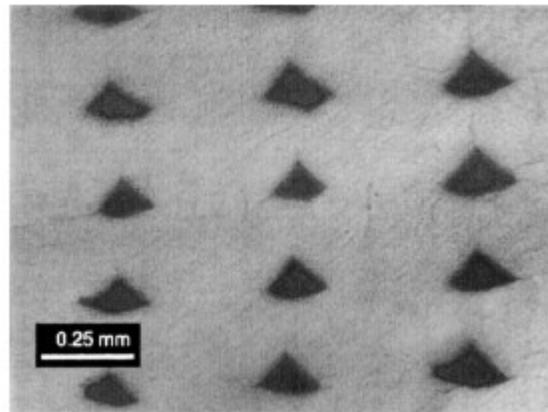


Ilustración 4 – Sección optimizada de material

Además del proceso físico de fabricación en sí, la principal traba que surge para la 3DP es el pre-procesado del modelo CAD. Si bien un modelo CAD de por sí no presenta imprecisiones y no da pie a error, la fabricación 3D, como ya se ha visto (Bellini & Güçeri, 2003), está lejos de ser perfecta. Resulta imprescindible pues, establecer un modelo de comportamiento que relacione la configuración de entrada y la salida de fabricación, basándose en métodos estadísticos (Gráfico 1).

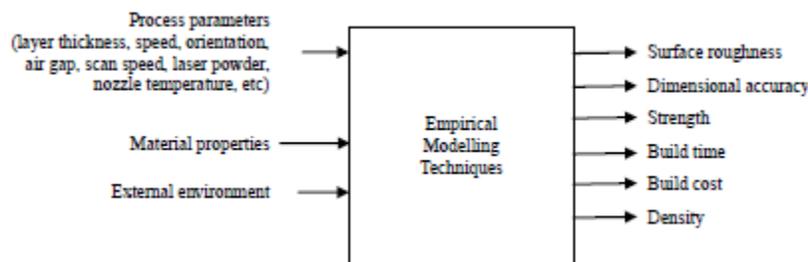


Gráfico 1 – Flujo de modelado experimental

Hay dos enfoques para este planteamiento (Tai, Garg, & Savalani, 2014):

- Modelos neuronales: se basa en la toma de tres capas (capa entrada, capa oculta y capa de salida), de tal forma que los datos de entrada pasan por la capa oculta, que contiene “neuronas” (procesamiento) o “nodos” (transferencia), mediante los cuales se generan los de salida. Así,

la función de transferencia es una función de ponderación de los parámetros de fabricación de entrada.

- Modelos de regresión: se emplea el análisis de regresión, ajustando los coeficientes de una función que se ajuste en forma a la relación entre entrada y salida en base a datos de observación. Habitualmente, en 3DP los modelos no son lineales.

Hay otro análisis adicional de gran importancia en el 3DP, que es el análisis a fatiga. Si bien las propiedades mecánicas de resistencia tradicionales ya han sido analizadas en los distintos documentos mencionados en estos textos, es importante también hacer un estudio del comportamiento de componentes fabricados mediante esta técnica a fatiga.

Dado que las micro y macro estructuras de estas piezas no responden a un modelo común y conocido, su respuesta a ciclos de trabajo continuos es distinta a todo lo analizado previamente. En los sistemas tradicionales de fabricación, el proceso de fallo a fatiga parte de pequeñas imperfecciones de fabricación, habitualmente superficiales, que aumentan la tensión cortante o normal en un punto focalizado, el cual sufre una degradación con cada ciclo de uso. Después de un determinado número de ciclos, la degradación en ese punto es tal que la resistencia disminuye, produciéndose la rotura. En un proceso continuado, el punto de concentración se irá desplazando, reduciendo globalmente la resistencia de la pieza hasta producirse el fallo (Moore & Williams, 2012).

En el caso de los materiales fabricados por 3DP, el estudio de las propiedades está en una fase inicial, donde la determinación de las propiedades en cada caso se hace por estudio de probetas ((Huang, 2013), (Waytashek & Letcher, 2014)).

Waytashek y Letcher, en su estudio de propiedades resistentes, realizaron ensayos de tipo tracción, flexión a tres puntos sobre probeta fabricada por 3DP, y tracción sobre un filamento. También, para ampliar el estudio, emplearon probetas con distintas orientaciones de filamento (0° , 45° y 90°) en la fabricación.

Del ensayo de tracción, se determinó que la mayor resistencia se producía a 45° (Gráfico 2).

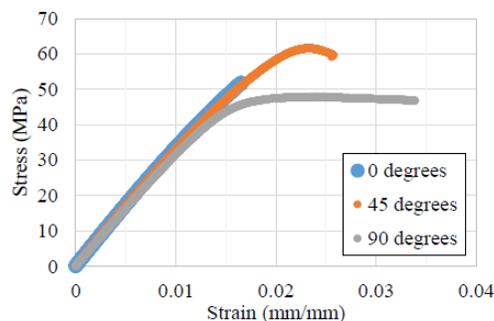


Gráfico 2 – Curva tensión-elongación ensayo de tracción a probeta

Del ensayo de flexión no se dedujeron conclusiones debido a que las probetas no llegaron a romperse.

Del ensayo de tracción a velocidades controladas del filamento, se determinó que las propiedades del filamento son muy similares a la de la probeta a 0° (Gráfico 3).

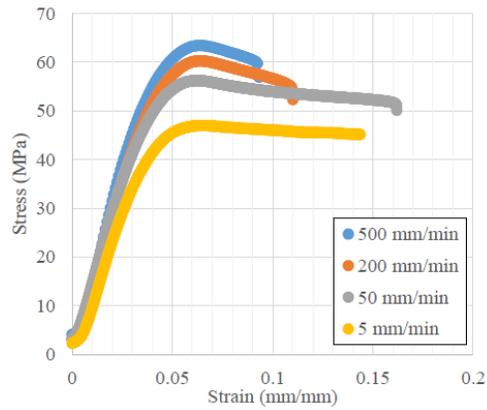


Gráfico 3 – Curva tensión-elongación ensayo de tracción a filamento

Del ensayo de fatiga, se determinaron los siguientes patrones de resistencia (los valores “ajustados” son las correcciones a 0° necesarias debido al cambio de sección al romperse parte de la probeta) (Gráfico 4).

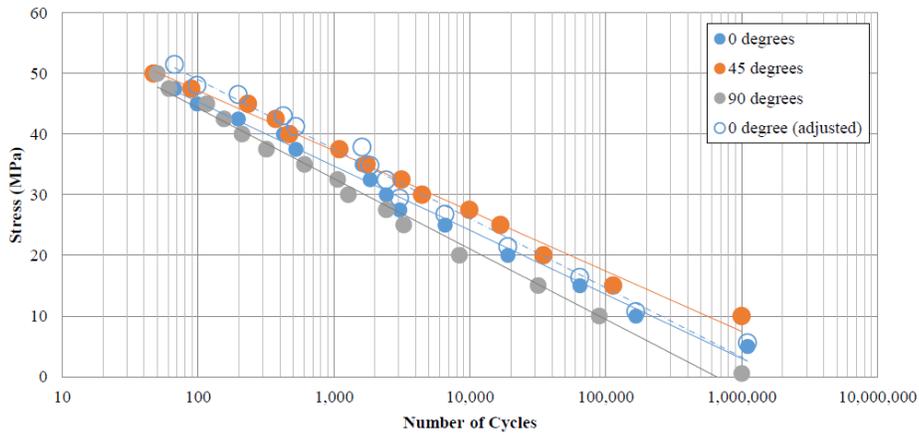


Gráfico 4 – Curva SN ensayo de fatiga a probeta

Huang, en su estudio, también hace un estudio de fatiga de piezas 3DP. Para ello, estableció un ciclo de tracción como el del Gráfico 5.

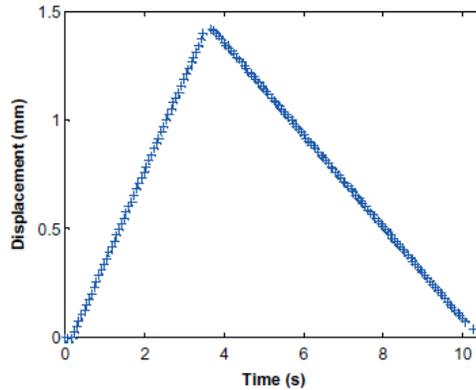


Gráfico 5 – Curva de tracción-tiempo de ensayo fatiga

A partir de éste, realizó ensayos de tracción comunes (con valores de ingeniería para elongación y tensión, es decir, con sección supuesta constante) a piezas fabricadas con distintos materiales. Los diferentes materiales se basan en direcciones de impresión distintas, lo cual da propiedades no lineales a la pieza final. En total, se emplearon nueve alternativas:

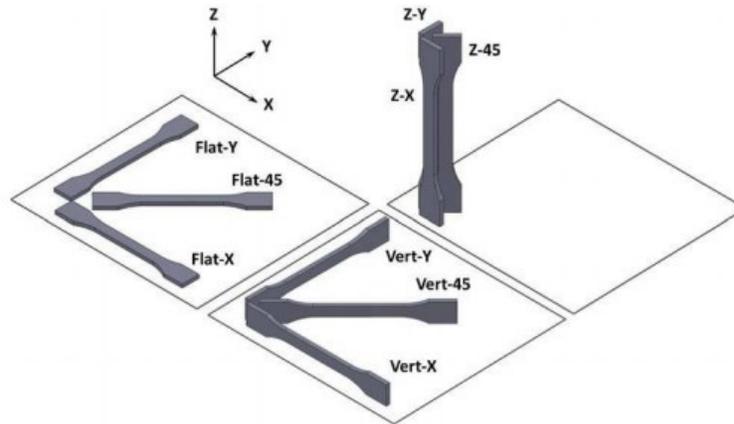


Ilustración 5 – Direcciones de impresión de las probetas

Dadas las propiedades asimétricas de las probetas, los ciclos de carga y descarga son distintos, y muestran variaciones entre la energía total absorbida durante la carga y la energía dispersada durante la descarga, lo cual demuestra que se ha disipado calor. Además, la forma de las curvas cambia debido a los fenómenos de endurecimiento y ablandamiento.

En los termoplásticos, como los usados en la 3DP, la elongación no reversible se hace patente con un fenómeno llamado *crazing*. El *crazing* es un fenómeno visual, en el que la zona donde se ha alcanzado la tensión de fallo clarea su color, haciéndose incluso transparente. Estas zonas (*crazes*) no son fracturas propiamente dichas, sino que aún pueden resistir cierto nivel de tensión.

Huang también realiza también ciclos de carga uniaxiales, viendo que el fallo final del material se produce por una combinación de varios aspectos, tales como el corte viscoso o los microvoides (*crazing*).

Las propiedades mecánicas, como se ha demostrado en los numerosos estudios vistos hasta ahora, se mantienen en una forma clásica en los filamentos, pero cambian en la pieza final, debido a la capacidad de cohesión de la impresora 3D. Los defectos internos producen puntos localizados de tensión que dan lugar al fallo.

Para los test de fatiga, Huang ha realizado ensayos de carga-descarga uniaxiales; los resultados de éstos son ciertamente inconsistentes, dada la variabilidad que producen las caras de unión entre las distintas capas de material. Esto se traduce a puntos de rotura en zonas distintas dependiendo de la orientación en la fabricación, como se puede ver en el Gráfico 6 y en la Ilustración 6. Además, también se puede apreciar distinta forma de la fractura dependiendo de esa misma orientación.

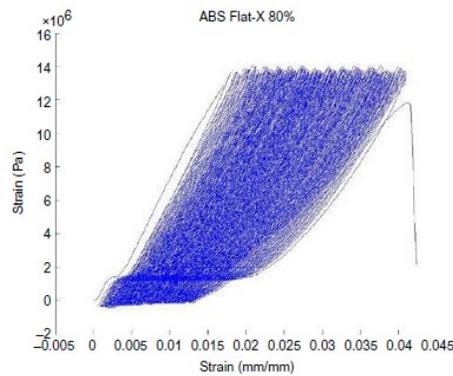


Gráfico 6 – Gráfica tensión-deformación ensayo de fatiga

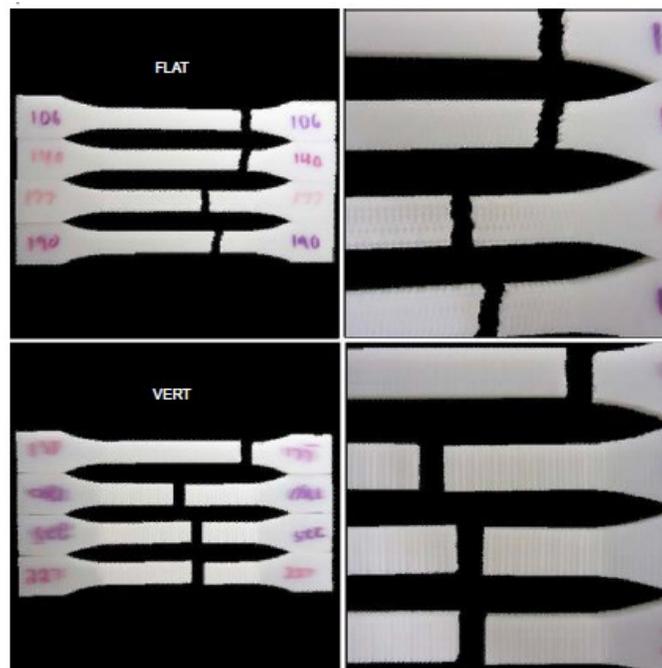


Ilustración 6 – Formas y zonas de fractura en ensayo de fatiga

Como conclusión global, de la calidad de la impresión y la efectividad de soldado entre los distintos filamentos y capas se deriva la bondad de las propiedades mecánicas de la pieza final.

4.4. Análisis de alternativas

Este proyecto comienza a trabajar en un campo amplio de aplicación, donde las alternativas son múltiples y ofrecen distintas ventajas e inconvenientes.

En primer lugar, es interesante distinguir dos usos fundamentales de la tecnología aquí descrita:

1. Uso del 3DP para prototipado de mecanismos y elementos de uso para ensayo.
2. Uso del 3DP para impresión de mecanismos y elementos de uso comercial.

Esta diferenciación es importante, porque para cada rama existen alternativas similares, pero su ventaja es distinta en cada caso.

Para el prototipado, clásicamente se han utilizado modelos de escayola para analizar la funcionalidad, y modelos en materiales con resistencias aceptables para escalar los ensayos (madera, polímeros fundidos, etc.). La alternativa que ofrece el 3DP es poder aplicar el modelo a estos dos usos con el mismo material, sin necesidad de fabricar moldes y evitando procesos de fabricación artesanales: el diseño final o cualquier diseño intermedio se puede fabricar directamente desde el CAD, sin más estudio que el que se realiza en este trabajo para articulaciones móviles.

Para uso comercial, el 3DP ofrece materiales versátiles con altas resistencias, que por sinterización dan lugar a la manufactura de elementos de uso comercial con mejores características que aquellos fabricados de forma tradicional mediante mecanización. Además de la ventaja que suponen los materiales, se añade la integridad del elemento fabricado, que no ha de ser ensamblado en un proceso final, evitando la imprecisa mano humana en montajes y ajustes.

Por tanto, si bien las alternativas principales son métodos bien asentados y con base histórica en cuanto a experiencia, la introducción del 3DP supone un avance incomparable.

4.5. Análisis de riesgos

Para este proyecto, se realiza un análisis DAFO, con el fin de enfocar todos los aspectos positivos y negativos del mismo. La principal ventaja del método en estudio es su versatilidad; sin embargo, como todo nuevo desarrollo, requiere un análisis previo complejo y que pasa por el estudio del uso de materiales de soporte.

La matriz resultante de dicho análisis es la representada en el Gráfico 7.



Gráfico 7 – Matriz DAFO

Si bien de forma concisa la matriz DAFO nos indica los principales puntos que afectan al proyecto, es de rigor hacer un análisis más detallado del mismo. Para ello, se empleará el método de la matriz de probabilidad e impacto.

Tabla 1 – Riesgos del proyecto

A	Material de soporte inconsistente	F	Debilidad estructural
B	Imposibilidad de drenar la escoria	G	Rotura o fallo de la impresora 3D
C	Geometría demasiado compleja	H	Tolerancias fuera de rango
D	Proceso demasiado caro	I	Materiales demasiado caros
E	Incompatibilidad geométrica del diseño		

Tabla 2 – Matriz Probabilidad - Impacto

Probabilidad	+		E	B, C
		D, I	H	A
	-		F, G	
			-	Impacto +

A partir de esta matriz, se determinan las respuestas de la gestión de riesgos:

Aceptar: Admitir si el impacto del riesgo es mínimo o el costo para mitigarlo es mayor al costo del impacto del riesgo. Aplica a los riesgos D, H, I

Transferir: Trasladar todo el riesgo a terceros para disminuir el riesgo en el proyecto. Aplica al riesgo G

Mitigar: Disminuir la probabilidad de que se produzca el riesgo al establecer acciones anticipadas para evitar que suceda. Aplica al riesgo A, B, E

Evitar: Contrarrestar los riesgos que van surgiendo mediante estrategias. Esto puede implicar cambios en el cronograma o el alcance del proyecto para eliminar la amenaza del riesgo. Aplica a los riesgos F y C

5. METODOLOGÍA

5.1. Medios de fabricación

En la elaboración de este documento, se emplearán los medios que pone a disposición la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Bilbao para realizar impresiones 3D.

Estos medios consisten en:

- Una impresora 3D *Stratasys Dimension 1200es*, cuyas características técnicas están recogidas en la Tabla 3.

Tabla 3 – Características técnicas de la *Dimension 1200es*

Tipo de impresora 3D	DoD (Drop on Drop)
Material de modelo	ABSplus en nueve colores
Material de soporte	Soluble (SST 1200es); de ruptura (BST 1200es)
Tamaño máximo de pieza	254 x 254 x 305 mm
Grosor de capa	0,33 mm o 0,254 mm
Tamaño y peso	838 x 737 x 1143 mm; 148 kg



Ilustración 7 – *Dimension 1200es*

Como se aprecia en la Ilustración 8, la zona de trabajo consiste en un cabezal que permite el movimiento en el plano de la mesa (ejes X e Y), y una mesa que permite el movimiento en el plano perpendicular (eje Z).

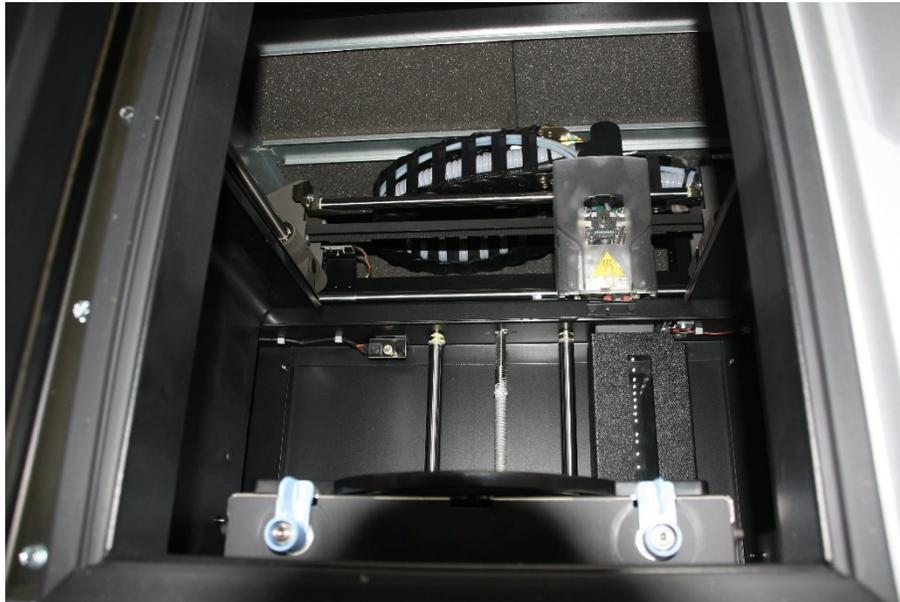


Ilustración 8 – Área de trabajo

- Un sistema de lavado de material de soporte (Ilustración g).

Consistente en un dispositivo de baño termostático. Consiste en un recipiente metálico aislado, que dispone de placas calefactadas eléctricamente.



Ilustración 9 – Sistema de lavado

Procedimiento de impresión

Para la impresión, la 3DP se encuentra conectada vía Ethernet a una estación de trabajo, desde donde se alimenta a la misma con las piezas a fabricar. La alimentación de datos se hace a través de un *software* propietario, denominado CatalystEX.

Este programa está diseñado para cargar modelos CAD en formato STL (siglas provenientes del inglés *STereo Lithography*), que define geometría de objetos 3D, excluyendo información como color, texturas o propiedades físicas. Este formato es idóneo para la impresión 3D, ya que ésta sólo necesita información volumétrica de la pieza a fabricar, obviando el resto de características, y por tanto es el más extendido.

Una vez se alimenta al programa cargando el fichero CAD, éste se encarga de realizar el procesado del mismo. Este procesado es parcialmente configurable, y define el proceso de fabricación en sí. Los parámetros que son configurables son los siguientes:

Cohesión de capa: define el espacio que la impresora deja entre hilos de material aledaños. Puede configurarse para que no exista espacio (capas sólidas), o bien para que se deje espacio (pequeño o de alta densidad, grande o de baja densidad).

Resolución: lo define el grosor de la capa, que puede ser según sus características de 0.33 o 0.254mm.

Durante el procesado, el *software* calcula automáticamente el proceso de fabricación. Es decir, calcula cómo va a depositar el material ABS en las distintas capas, cuál va a ser la trayectoria que va a seguir, y cómo va a enlazar los distintos hilos. Además, también calcula el material de soporte mínimo necesario para poder fabricar la pieza.

Si bien los dos parámetros antes mencionados condicionan este proceso, la fabricación no es editable a necesidad. No se puede redefinir el material de soporte, ni tampoco introducir determinados caminos para los hilos. Sin embargo, sí existe la posibilidad de configurar los ejes relativos de la pieza, orientando ésta según el criterio del diseñador.

El hecho de que se pueda elegir los ejes, permite aprovechar mejor las propiedades mecánicas del material, así como facilitar la fabricación en sí. Esto se debe a que la impresora trabaja con ejes X e Y con movimiento de cabezal, y eje Z con movimiento de la mesa. Para una pieza esbelta, orientar el eje longitudinal de la misma con el eje Z, implica poco movimiento de los ejes XY y mucho del Z, lo cual a priori podría parecer beneficioso; sin embargo, hay que tener en cuenta que en ese caso, las capas de material estarían dispuestas transversalmente a la pieza, dando su mayor resistencia en el eje transversal a la misma. De aquí se deduce, que la isotropía del producto final depende fuertemente del proceso de fabricación, y un *software* potente y configurable mejora considerablemente el producto final.

El programa también es capaz, una vez ha hecho el procesado, de calcular el volumen final de la pieza a fabricar, de tal manera que se puede determinar la cantidad de material que se necesita (en este modelo, los cartuchos de material son en filamentos e incluyen aproximadamente 1 litro del mismo), y por ende su peso (conocido volumen y densidad del material). También determina aproximadamente el tiempo de fabricación.

El proceso de impresión en sí, una vez comenzado, comienza con un precalentamiento de los cabezales. Una vez alcanzan la temperatura de trabajo, alrededor de 300°C, comienzan a operar los inyectores. Hay dos inyectores independientes, uno para el material de soporte y otro para el material de trabajo. El sistema crea en primer lugar una capa de material de soporte, que permita separar con

comodidad la pieza de la base una vez acabada la impresión sin dañarse; a continuación, lleva a cabo la impresión de cada una de las capas, según ha resultado del procesado.

Transcurrido el tiempo establecido de impresión, la impresora libera la pieza. Éste es el momento en que debe separarse la pieza de la base, para proceder a su finalización de forma manual. Se retiran las partes grandes y fácilmente desprendibles de material de soporte, para facilitar la labor del lavado. Tras este paso, se introduce en el sistema de lavado.

Éste deberá estar precalentado a 60°C gracias a la acción de sus placas térmicas. En su interior, se encuentra una disolución de sosa cáustica en agua; la acción combinada de la sosa y la temperatura favorecen la desaparición del material de soporte, dejando la pieza acabada.

El mayor hándicap de la 3DP es precisamente este último paso. La penetración de la solución es crítica para que el acabado y sobre todo la funcionalidad de la pieza sean las deseadas; y por ello, cualquier diseño que se desee materializar a través de la impresión tridimensional debe tener en cuenta precisamente que es necesario lavarlos.

Materiales de impresión

El material de impresión se puede seleccionar entre diversas opciones del catálogo de la marca. El material con el que se va a trabajar en el presente documento para las piezas, es el de nombre comercial *ABSplus*. Las características del mismo están incluidas en la Tabla 4.

Tabla 4 – Propiedades del *ABSplus*

Propiedad	Método de ensayo	Valor
Tensión de rotura a tracción	ASTM D638	33MPa
Tensión de fluencia a tracción	ASTM D638	31MPa
Módulo de elasticidad a tracción	ASTM D638	2200MPa
Elongación de rotura a tracción	ASTM D638	6%
Elongación de fluencia a tracción	ASTM D638	2%
Tenacidad a 23°C	ASTM D256	106J/m
Tensión de rotura a flexión	ASTM D790	58MPa / 35MPa
Módulo de elasticidad a flexión	ASTM D790	2100MPa / 1650MPa
Elongación de rotura a flexión	ASTM D790	2%
HDT (Heat Deflection Temperature) @ 66psi	ASTM D648	96°C
HDT (Heat Deflection Temperature) @ 264psi	ASTM D648	82°C
Temperatura de cristalización	DSC (SSYS)	108°C
Coefficiente de dilatación	ASTM E831	8.82·10 ⁻⁵ mm/mm/°C

El *ABSplus* no es, sin embargo, la única alternativa que ofrece la marca, incluyendo en su catálogo materiales termoestables, nylon o policarbonatos transparentes, incluyendo varios materiales biocompatibles.

El material de soporte es, asimismo, el suministrado por la marca. De nombre comercial P400-SR, es un material soluble en agua; sin embargo, se disuelve mejor utilizando materiales que ataquen a la estructura polimérica, como el hidróxido de sodio (sosa).

5.2. Diseños preliminares

Para elaborar una metodología de fabricación empleando el 3DP, se realizan en primer lugar una serie de diseños preliminares, que permitan valorar distintas alternativas en cuanto a la capacidad de la impresora. Además, se busca validar distintos diseños que tengan una buena funcionalidad.

Se parte del diseño de un mecanismo de rótula simple (Ilustración 10), a partir del cual se realizan modificaciones y mejoras con la intención de hacer más sencilla su fabricación.

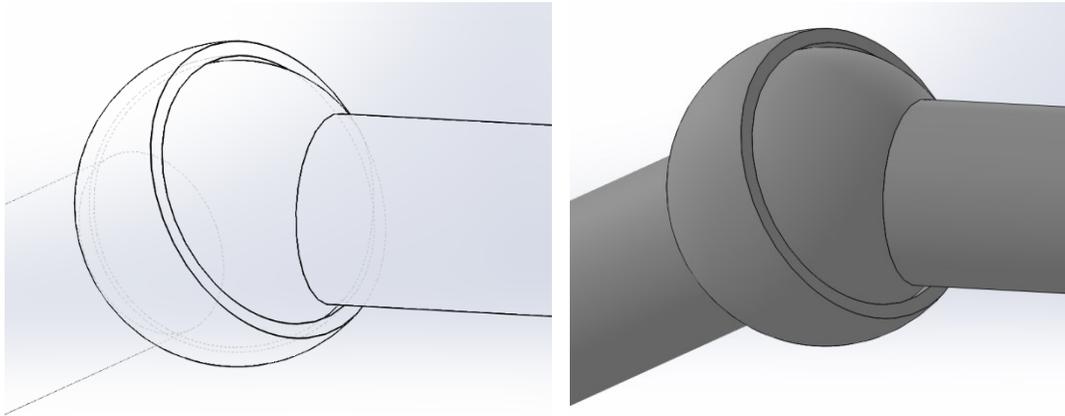


Ilustración 10 – Rótula simple

Con este diseño básico, se plantea solucionar el primer problema de 3DP previamente a imprimirse: la disolución del material de soporte. Dado que ambas partes de la rótula deben estar separadas una determinada distancia para que al imprimirse no sea una pieza sólida y se permita el movimiento relativo entre partes, en el diseño CAD se ha insertado dicho espacio. Sin embargo, la impresora 3D necesita introducir un elemento que sustituya al espacio vacío durante el proceso de impresión.

Por ello, cualquier diseño que se elabore para impresión 3D debe asegurar canales de evacuación del material de soporte. En cierto modo, es un planteamiento similar al de la fundición a la cera perdida: el material de soporte, que en el ejemplo es cera, debe tener un camino de salida del molde una vez se vierte el material de fundición caliente dentro del mismo. En el caso de la cera, el molde se diseña con bebederos que permiten respirar al material moldeado, evitando que se genere vacío y permitiendo la salida de cera líquida; algo similar ocurre, como se ha comentado anteriormente, con la impresión 3D.

Hecho este planteamiento, todos los diseños posteriores incluyen en todas sus partes canales de evacuación que permitan la penetración en las zonas estrechas del disolvente. Durante las distintas impresiones, se evaluará el resultado de distintos métodos (cavidades rectangulares, agujeros redondos, agujeros rasgados, etc).

5.3. Fabricación de diseños: escalado y tolerancias

Par esférico

En primer lugar, se replantea la rótula esférica incluyendo tres cavidades rectangulares repartidas a 120°; este diseño está representado en la Ilustración 11.

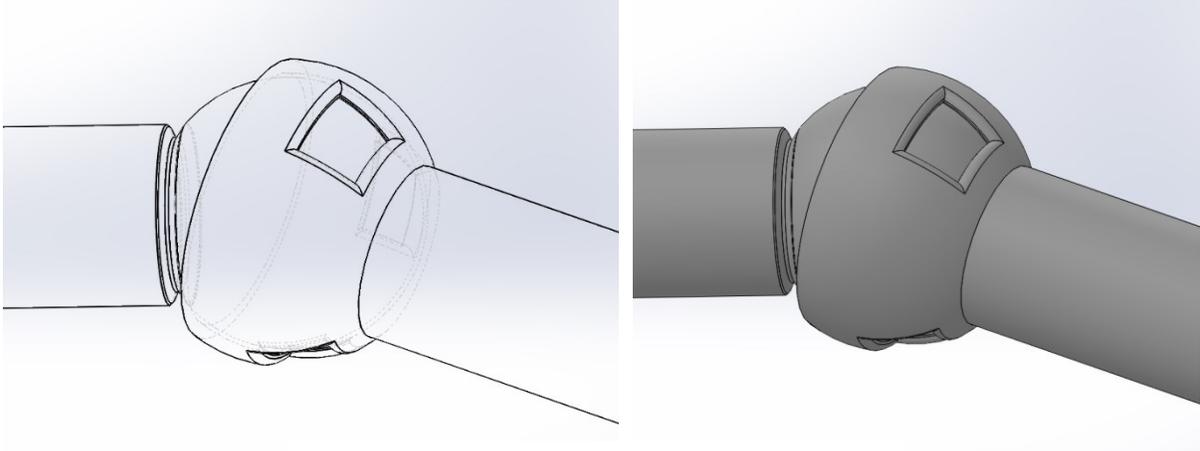


Ilustración 11 – Rótula esférica con cavidades

Para testear la resolución de la impresora, se imprimen tres rótulas con distinto espacio entre la esfera y el casquillo. Configurando la impresora a la resolución máxima (0.25mm), se diseñan tres espacios distintos: de 0.25, 0.375 y 0.5mm; y para los tres, el mismo hueco de evacuación.

Tras un tiempo de impresión de unas 10 horas, se introducen en el lavado. El resultado es el siguiente (Ilustración 12):

- 0.5mm y 0.375mm: movimiento libre sin rozamiento, según se aclaran del lavado.
- 0.25mm: no se mueve. Al ejercer fuerza obligando al movimiento, se produce una fractura (presumiblemente en el material de soporte no disuelto) y comienza a moverse con rozamiento.



Ilustración 12 – Rótulas a 0.5, 0.375 y 0.25mm

De esto se pueden sacar dos conclusiones:

- La impresora no tiene gran precisión a su resolución máxima.
- El material de soporte es difícil de alcanzar con espacios inferiores a 0.375mm.

Buscando el detalle del proceso de fabricación, convendría analizar la fuerte injerencia de la orientación de la pieza en el software de impresión. En el modelo STL, las dos partes de la rótula no se

encontraban perfectamente alineadas, asumiendo que no afectaría al producto final. Sin embargo, al no estar alineadas, el software eligió la parte de mayor longitud para orientar su plano XY, quedando la otra transversal.

El resultado, como se puede ver en la Ilustración 13, es que la pieza esbelta fuera del plano queda con un perfil de diente de sierra de pequeño tamaño en las caras transversales.

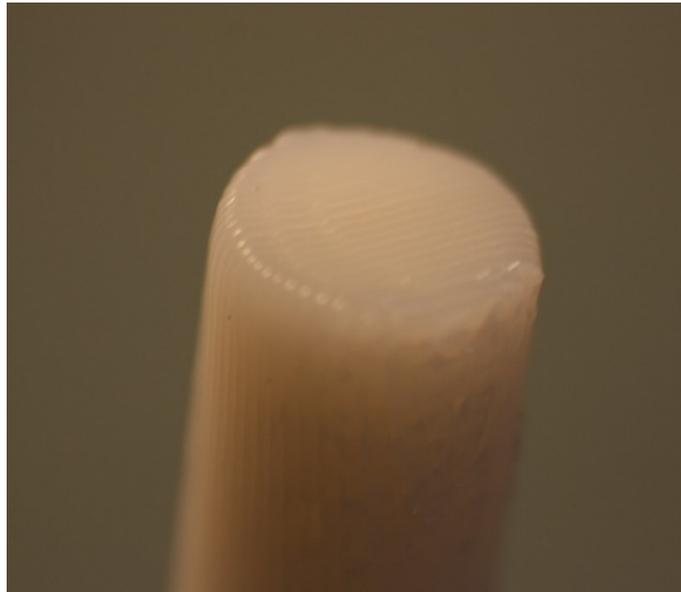


Ilustración 13 – Estrías superficiales

Por ello, el bloqueo inicial de la articulación con el menor *gap* entre caras concéntricas, puede deberse a una combinación del perfil estriado, que tiende a producir *stick and slip* en el contacto, con el efecto de material de soporte no disuelto. Resulta clave en la fabricación de piezas acopladas, orientar todo en los mismos planos para evitar este efecto.

Para testear también la capacidad de la impresora además de la bondad del diseño de canales de vaciado, se manda imprimir también la misma rótula a escala 1:3 y 1:2 (Ilustración 14). En ambos casos, se ajusta el *gap* entre caras para que sea del valor demostrado funcional de 0.375mm, ya que en escalado esta distancia se minimiza por debajo de la resolución máxima.

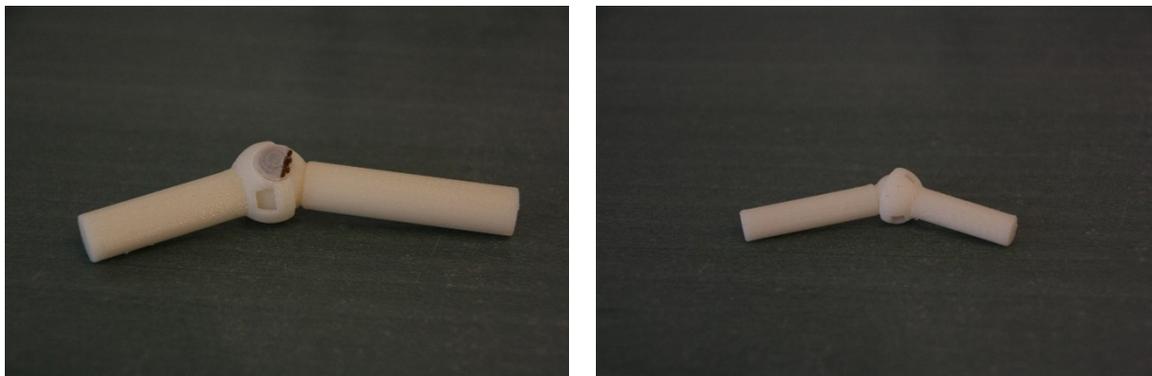


Ilustración 14 – Rótulas a 1:2 y 1:2

El resultado de la impresión es, en el primer intento, inconsistente. La rótula de menor tamaño, a escala 1:3, no soporta bien la reducción de tamaño y la acción de la sosa, quedando muy débil en la pared del casquillo. Acaba por romperse tras unos giros, desmontándose (Ilustración 15).



Ilustración 15 – Rotura en el casquillo

Con la escala 1:2, ocurre algo que da a entender la posible solución: dado que las piezas se han impreso en horizontal, es decir, con el eje longitudinal paralelo al plano XY, el software ha introducido material de soporte en las zonas superior e inferior del hueco entre el casquillo y la esfera, como se ve en la Ilustración 16.

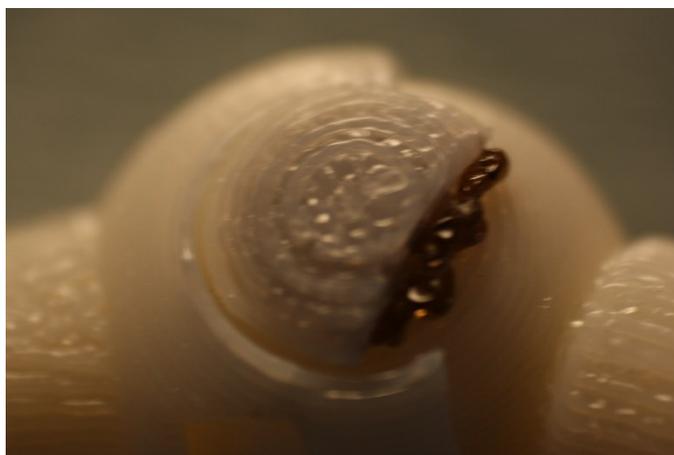


Ilustración 16 – Rotura por material de soporte no disuelto

Dado que el diseño incluía tres oquedades en el casquillo, la parte inferior coincidía con una de ellas, pero la parte superior no; el material no se ha disuelto. Al intentar romperlo fuera del baño, se ha fracturado la pared.

Ante estos problemas surgidos a pequeña escala, se deben tomar las siguientes medidas:

- Aumentar las perforaciones de lavado. En el caso de la rótula no se amplían más, pero en otro tipo de mecanismos, se aumentan considerablemente las superficies para favorecer todo lo posible la entrada del disolvente.

- No usar espesores demasiado delgados. El espesor era suficiente a escala normal, pero a escala reducida era insuficiente, haciendo unas paredes débiles.
- En el caso de la rótula esférica, imprimirlas con el eje longitudinal en un plano perpendicular al XY, con el fin de que el material de soporte se deposite en el fondo del hueco, zona más resistente y con menor tendencia a la rotura.

Estas medidas se implementan en las rótulas a escala 1:2 y 1:3, no sin antes aumentar el espesor de las paredes del casquillo 2mm a 1:2 y 1.3mm a 1:3 (Ilustración 17).

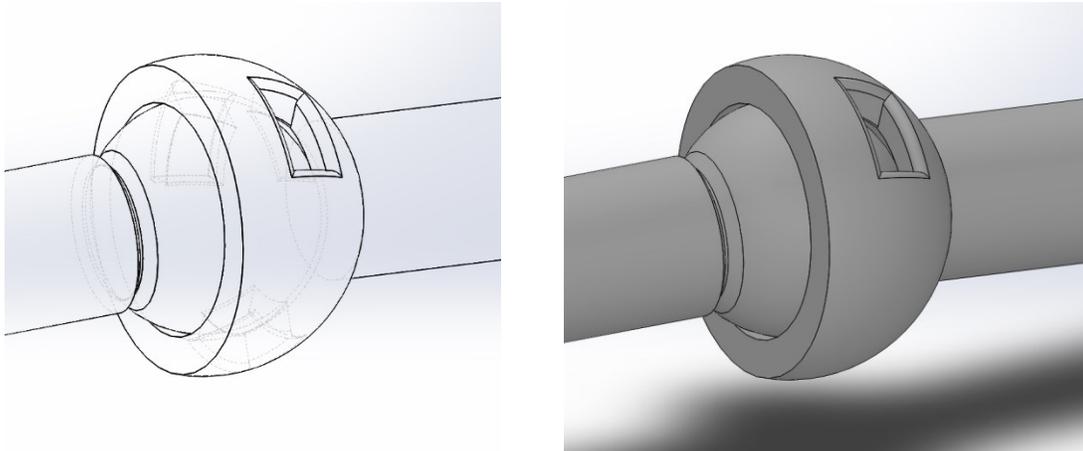


Ilustración 17 – Rótula escalada con pared gruesa

Par prismático

En la elaboración de un par prismático, se toman dos enfoques opuestos.

En el primer enfoque, se diseña un modelo de par prismático lo más sencillo posible, con el fin de evaluar la rugosidad superficial. En este tipo de articulaciones, que ambas partes se deslicen suavemente es importante para que el movimiento sea fluido y válido.

Para ello, se emplea el siguiente diseño (Ilustración 18):

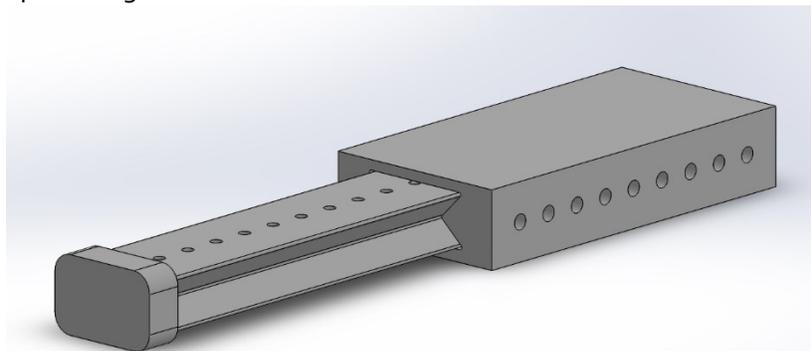


Ilustración 18 – Par prismático simple

Este diseño se envía a impresión a escala 1:1 y 1:2. Como se aprecia, se han incluido agujeros equidistantes de $\varnothing 4/\varnothing 2\text{mm}$ con el fin de favorecer la entrada de la sosa de lavado. Tras producirse la impresión, el resultado (Ilustración 19) no es del todo satisfactorio por varios motivos.

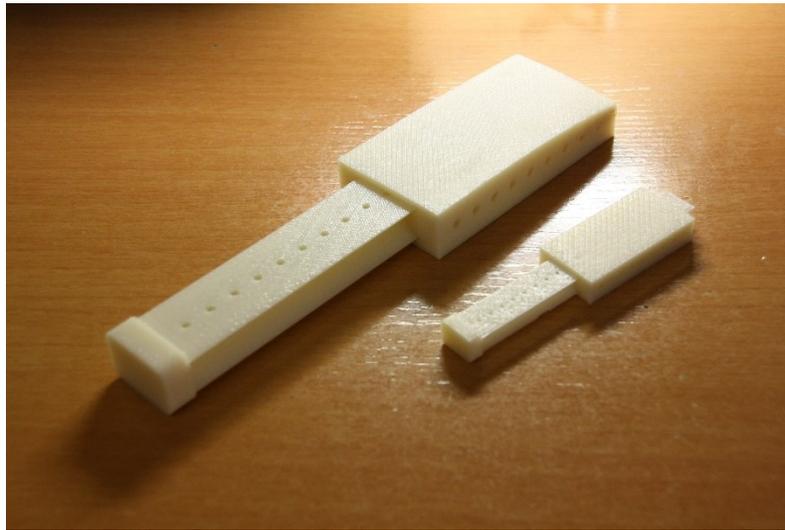


Ilustración 19 – Pares prismáticos

En primer lugar, los orificios de limpieza son demasiado pequeños. El fluido tiene dificultades para entrar por capilaridad, así que apenas disuelve un área poco mayor que el propio orificio, lo que es insuficiente. Por otro lado, sólo se incluyeron orificios en los laterales, dando por hecho que la combinación de la ranura superior y los huecos laterales sería suficiente; apreciación que no resultó cierta. La pieza pudo ser limpiada, pero requirió el doble de tiempo del habitual.

Además, posiblemente debido a la gran superficie plana, que acumula bastante calor, una de las esquinas de la deslizadera se despegó del material de soporte, doblándose levemente hacia arriba. Esto produjo un efecto no deseado, y es que el cabezal de la impresora golpeó durante horas la zona levantada, alterando la precisión del resultado y haciendo que la deslizadera, que ya tenía dificultades debido a la falta de disolución, no pueda moverse debido a la deformación (Ilustración 20).



Ilustración 20 – Bloqueo por deformación

Tras dejar este par el doble de tiempo del habitual en disolución, finalmente se logra (con un tiempo de inmersión de un día) que se disuelva todo el material de soporte incluso a escala 1:2 (Ilustración 21).

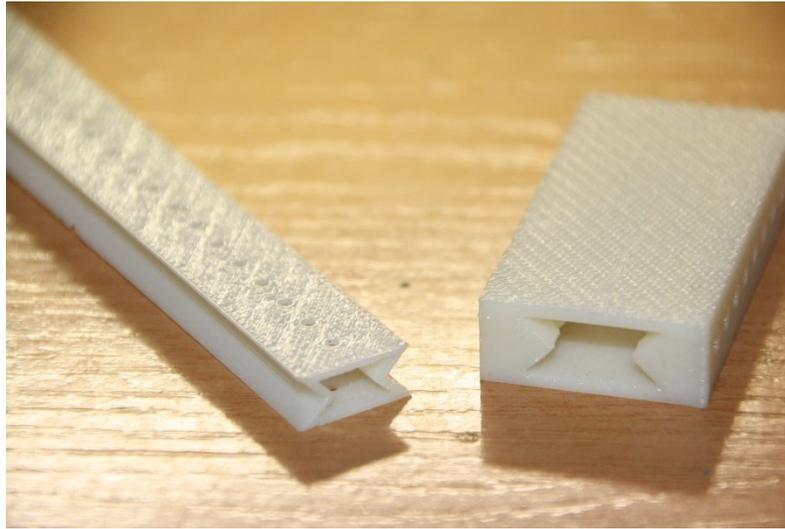


Ilustración 21 – Par prismático a escala 1:2

Sin embargo, en el caso de la escala 1:1, no hay movimiento al estar bloqueado por la deformación plástica. Para intentar hacerlo funcional, se decide cortar la parte dañada, manteniendo toda la pieza posible (Ilustración 22). Con esto se consigue que el elemento funcione con suavidad.

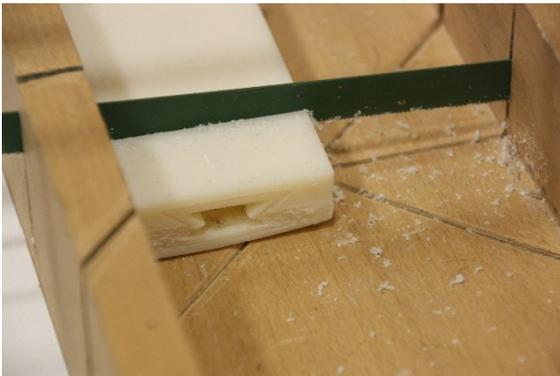


Ilustración 22 – Corte y reparación

Analizándolo en detalle, el pequeño espacio dejado entre caras consigue que la tolerancia del movimiento sea estrecha, consiguiendo un movimiento muy recto pero fluido. Esta es una de las principales ventajas de este método de fabricación: se pueden conseguir tolerancias muy buenas ya que se evita el montaje y se puentean los métodos de fabricación clásicos, que encarecen mucho el producto final cuando se aumenta la precisión.

En el segundo enfoque, se busca un diseño complejo, basado en el uso de rodamientos esféricos (Ilustración 23).

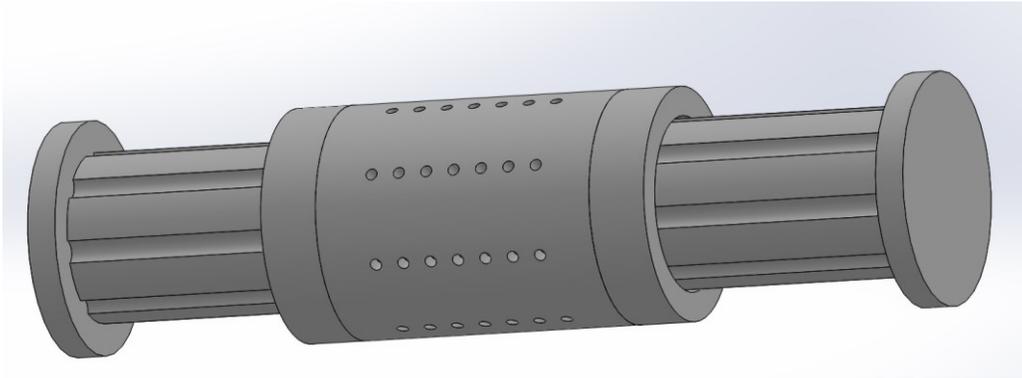


Ilustración 23 – Par prismático complejo

Este diseño se basa en un par prismático, pero cuyo deslizamiento se produce por rodadura de rodamientos esféricos (Ilustración 24). Con esta aproximación, se busca testear la capacidad de imprimir productos industriales.

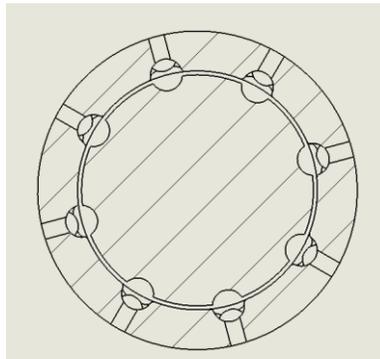


Ilustración 24 – Sección de los carriles de rodamientos

Sin embargo, este diseño se deshecha, debido a un problema mayor: los rodamientos esféricos son altamente complejos de diseñar e imprimir ya montados. Se plantea como solución, emplear rodamientos de acero comerciales; aunque esto no entra dentro del alcance directo de este documento, sí podría ser una solución comercial muy buena, fabricando un par prismático enterizo cuyo único montaje se reduce a insertar las esferas por un carril o tapa de mantenimiento.

Par rotativo

Se han llevado a cabo dos diseños de par rotacional. Uno de ellos, se ha incluido dentro del mecanismo que posteriormente se empleará para describir la metodología de fabricación (Ilustración 25).

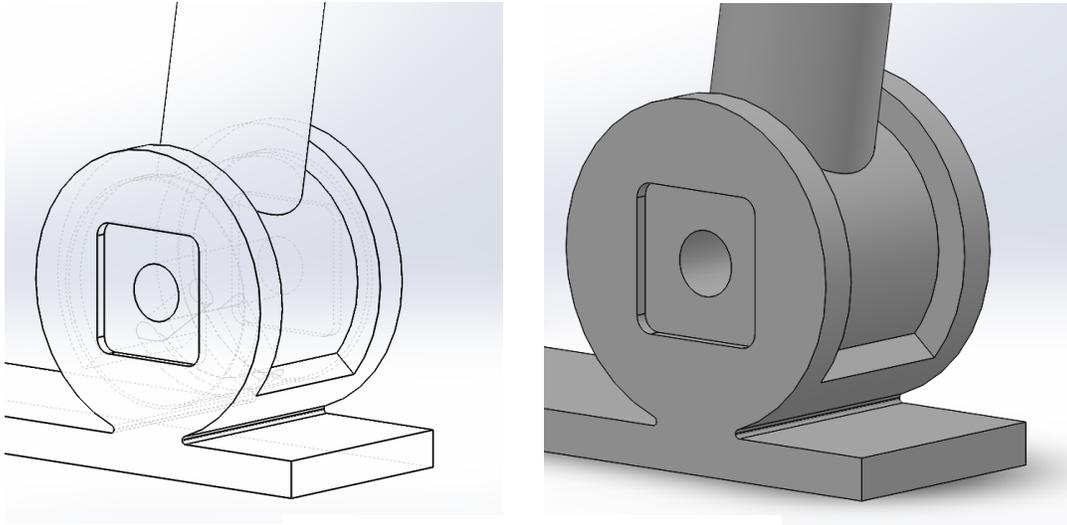


Ilustración 25 – Par rotativo simple

El que se va a detallar a continuación, se ha creado basándose en un diseño que podría ser industrial. En este caso, pensando en un uso industrial de casquillos de desgaste, se ha creado una unión de dos piezas en cuyas interfaces se integran dos casquillos (Ilustración 26).

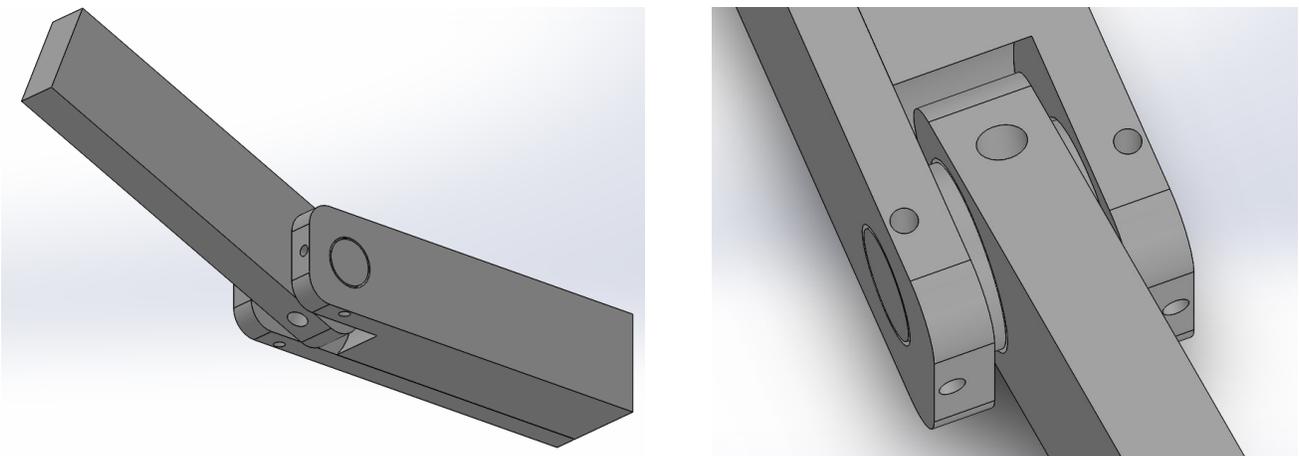


Ilustración 26 – Par rotativo

En este caso, la intención, además de buscar diseños complejos que pudieran ser industriales, es forzar a la impresora 3D a trabajar en superficies complejas con muchas transiciones entre espacios y zonas definitivas, o lo que es lo mismo, transiciones entre material de soporte y de fabricación.

Para ello, se ha tomado un diseño basado en dos casquillos, que en un modelo real serían de desgaste, y un eje o bulón para mantener la alineación entre casquillos y barras, como se puede apreciar en la Ilustración 27.

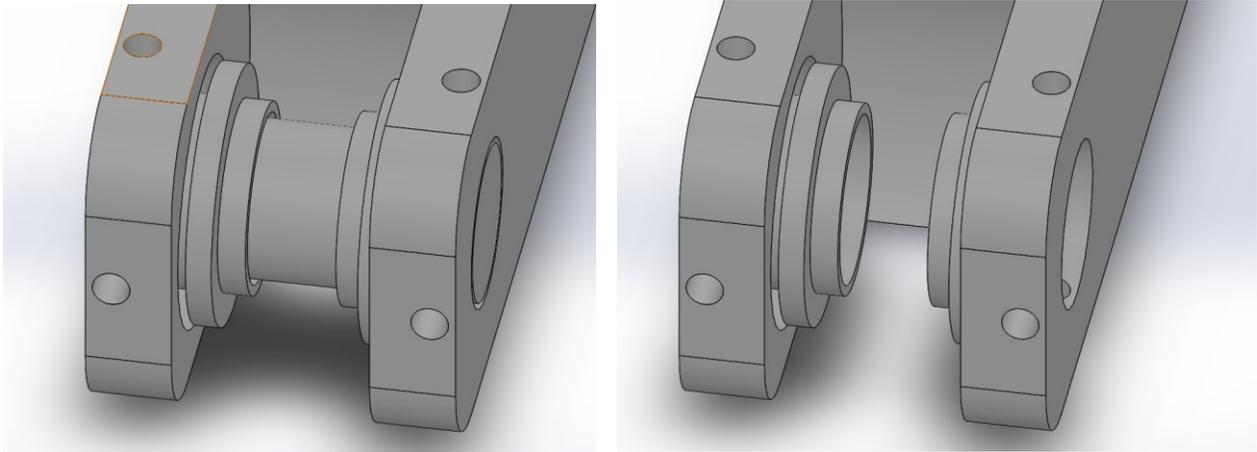


Ilustración 27 – Despiece de par rotativo

Este prototipo no se lleva a impresión en condiciones reales debido a las limitaciones de variedad de materiales disponibles para la impresión. Idóneamente, la impresión se realizaría con un modelo de impresión polivalente que disponga de varios inyectores para materiales distintos; en este caso, un material ABS de alta resistencia para la estructura y el bulón y un material de caucho o teflón para los casquillos. Sin embargo, los modelos de impresora capaces de alcanzar esas cotas son de elevado precio.

5.4. Metodología de fabricación

Con el fin de definir una metodología de diseño e impresión en 3D, se va a diseñar un mecanismo simple que incluya parte de los diseños anteriormente mencionados, modificados y actualizados para hacer un diseño completamente funcional.

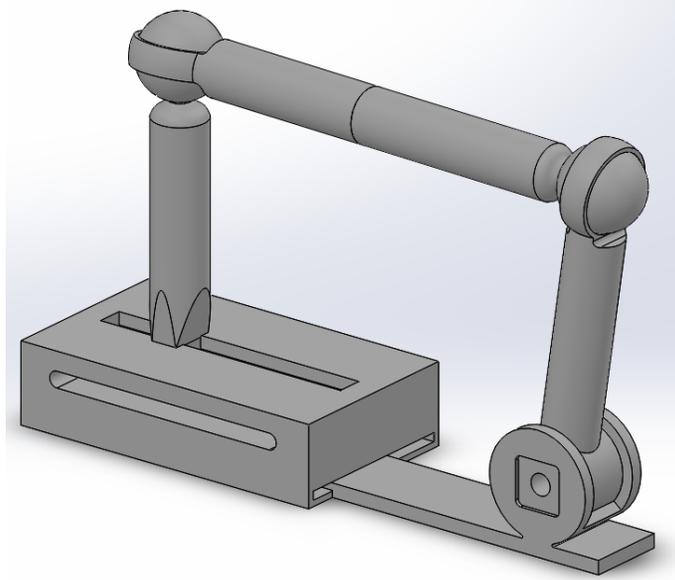


Ilustración 28 - Mecanismo

Se trata de un mecanismo simple, que incluye dos pares prismáticos, dos esféricos y uno rotativo. Los detalles constructivos se pueden ver en los planos anejos, así como en la Ilustración 28.

Los pasos seguidos para diseñar un montaje orientado a impresión 3D, son los mismos que aplican al diseño convencional en cuanto a funcionalidad, resistencia e interferencias, con ciertos cambios.

- Los elementos mecánicos no tienen por qué ser montados ni desmontados.

Esta es la ventaja fundamental de la impresión 3D, fabricar mecanismos de gran solidez y resistencia estructural al no requerir zunchados ni ajustes durante el montaje de los mismos. En los diseños para impresión 3D, no es necesario tener en cuenta tapas de registro para acceso, ni cómo será el montaje de los mismos. Se pueden diseñar piezas basándose puramente en su funcionalidad, en cálculos de resistencia y cinemática, obviando otros detalles. Esto permite fabricar mecanismos que de otra forma, deberían contener elementos más frágiles o que concentran en sí tensiones y esfuerzos.

- Los elementos mecánicos han de tener superficies simples.

Es una virtud y un defecto de la 3DP, puesto que indirectamente obliga a hacer sencillos los diseños, pero que en según qué campos donde las superficies deben ser complejas por requisito genera problemas.

Las impresoras 3D no pueden hacer superficies curvas perfectas. Esto es debido a que la transición de una capa a otra no es continua, es decir, el cabezal de inyección no recorre el perfil de la pieza como se podría conseguir en un centro de mecanizado. Las superficies, sean cuales sean, se consiguen por apilamiento de capas del mismo grosor, lo cual deja obligatoriamente una superficie discontinua en los bordes y caras.

La solución más evidente es reducir el espesor de las capas hasta un grosor despreciable, lo cual es simple sobre el papel pero complejo en términos mecánicos. La inyección de material en una impresora como la empleada en este documento es por deposición de material en una superficie, lo que está fuertemente condicionado por la forma de la boquilla, la temperatura de trabajo, y otros factores complejos. En una impresora tipo DoB (*Drop-On-Bed*), donde se trabaja con aglutinantes en un material en polvo, puede resultar más sencillo obtener una mayor precisión, pero en todo caso depende de las propiedades mecánicas de la máquina y del material; lo cual se distingue de un medio tradicional, donde empleando el utillaje adecuado es posible maquinar casi cualquier material de la misma forma.

Cuando se emplean escalas grandes, este problema se ve relegado a un segundo plano, puesto que la tolerancia es aceptable cuanto mayor sea el modelo.

- Los diseños añaden canales de lavado.

Si bien con la impresión 3D se salva el escollo que supone el montaje, aparece otra dificultad en el diseño, y es la inclusión de canales que permitan el lavado del material de disolución.

En una impresora tipo DoD, este problema es el más relevante para la fabricación. En todas las piezas fabricadas para ilustrar este documento, los mayores problemas han sido derivados precisamente de la falta de estos canales o de errores en el diseño de los mismos.

En el diseño de estos canales, se debe asegurar:

- Que tengan ancho suficiente para que el líquido disolvente penetre sobradamente y no se bloquee por capilaridad.
- Que alcancen todos los huecos estrechos del modelo.
- Que no afecten a la funcionalidad

Precisamente este último punto entra en conflicto con los otros dos: es difícil acceder a todos los huecos con canales de tamaño suficiente sin afectar a superficies de contacto principales, y en el caso de conseguirlo, en el uso real estos huecos podrían dar lugar a problemas de entrada de residuos al interior del mecanismo, lo cual los dañaría prematuramente.

En las impresoras de tipo DoB, este problema desaparece parcialmente. Dado que la solidificación se hace en una cama de material habitualmente en polvo, extraer el sobrante del interior es más sencillo ya que es capaz de fluir por huecos más pequeños.

Por tanto, la 3DP supone una ventaja cualitativa en el diseño, pero lo dificulta en otros aspectos. El avance de la tecnología de materiales de soporte y/o modos de impresión favorece positivamente a este medio de fabricación.

Mecanismo de prueba

Para llevar a la práctica los principios indicados, se ha diseñado un mecanismo que recoge puntualmente estas características. Se va a analizar con detalle cada una de ellas.

- **Canales de evacuación en el par prismático**

Dados los problemas surgidos en el par prismático aislado, para este caso se han cambiado los canales, haciéndolos continuos, más grandes y en más superficies. Se han hecho canales longitudinales en los laterales y la base. Además, se ha hecho un rebaje en la superficie interior, con el fin de evitar el contacto de dos grandes superficies (deslizadera y bulón), como se puede ver en la Ilustración 29.

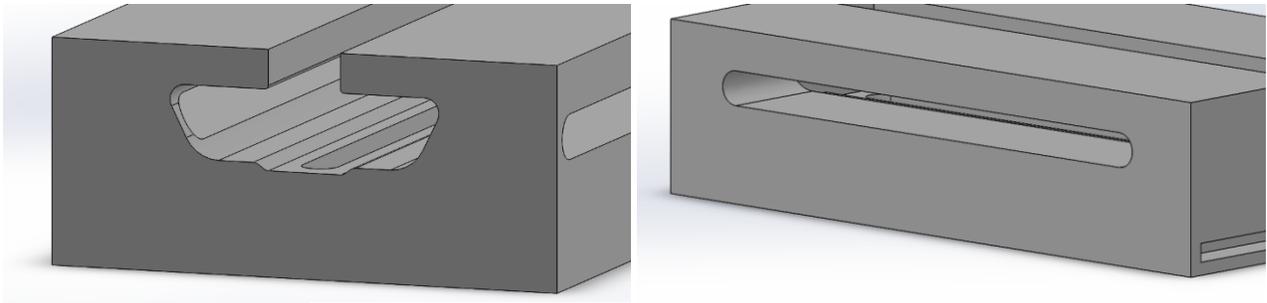


Ilustración 29 – Canales de evacuación

- **Canales de evacuación en el par rotativo**

De forma similar a lo que ocurre con el par prismático, para el par rotativo también se han añadido canales de evacuación suficientes, como se ve en la Ilustración 30.

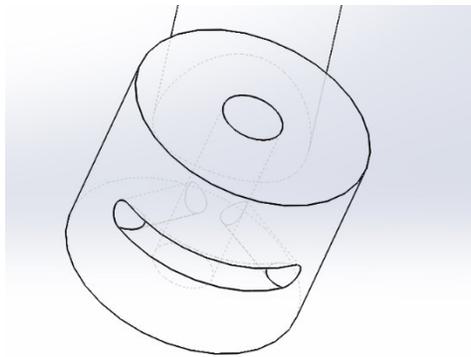


Ilustración 30 – Canales de evacuación

- **Modificación del par esférico**

Este es el cambio más relevante hecho frente a los diseños base que se han expuesto anteriormente. Tradicionalmente, una de las principales barreras en el diseño y uso de rótulas esféricas es el ángulo de movimiento, que debido a que es necesario que el casquillo supere el ecuador de la esfera para sujetar ésta, es bastante restringido.

Una solución bastante sencilla pero que flexibiliza mucho el montaje, es la sustitución de un casquillo por un cinturón que englobe la totalidad del ecuador de la pieza pero sólo unos 15° entorno al mismo (Ilustración 31). De esta forma se evita el problema de orientación: si se desea instalar una rótula tradicional en una unión a 90°, el casquillo debe tener unida la barra que lo sustenta paralela al ecuador de la esfera; en cambio, si se desea una unión recta, el casquillo debe tener en perpendicular el ecuador al eje de la barra.

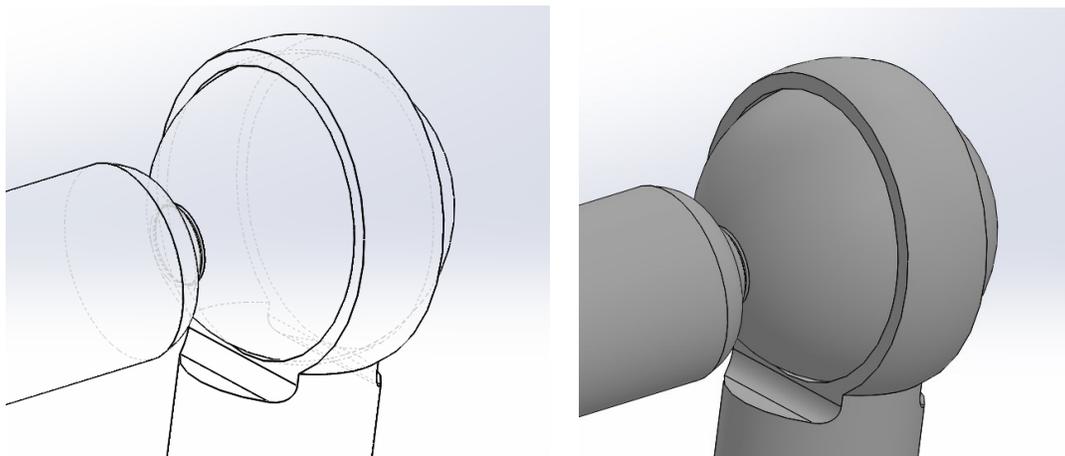


Ilustración 31 – Rótula esférica de "cinturón"

Esta casuística obliga a diseñar dos tipos de rótula en función del uso que se le vaya a dar, porque no son compatibles debido a la interferencia entre el casquillo y el eje. En el caso del cinturón, al no existir una superficie grande, el rango de interferencia es mucho menor, además de permitirse la colocación en un abanico de direcciones mayor usando menos material y manteniendo el contacto en una menor superficie.

Este diseño se lleva a impresión (Ilustración 32). El proceso de impresión se lleva a cabo en aproximadamente 24 horas, además de otras 10 horas en inmersión en sosa de lavado.

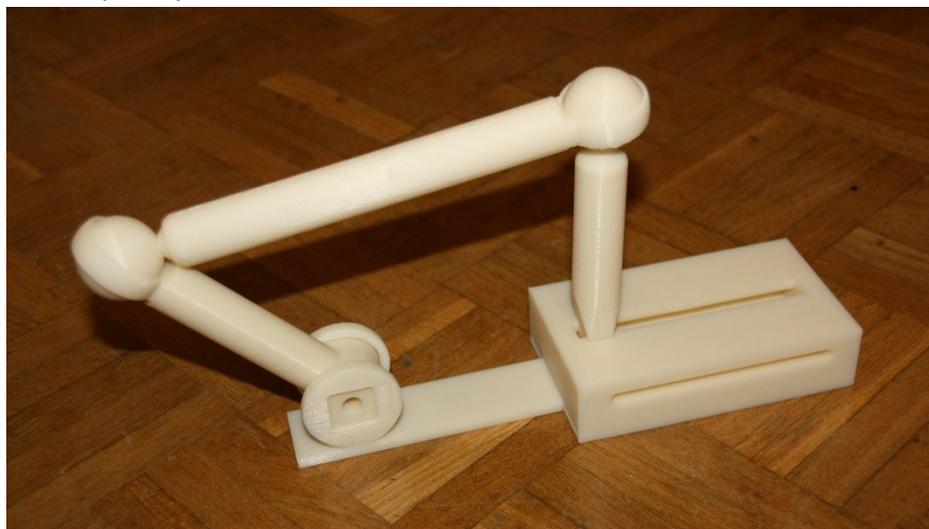


Ilustración 32 – Mecanismo impreso

Se comprueba la movilidad del diseño. En un primer intento, aparece casi completamente bloqueado, debido a los restos de material de soporte no disuelto en las interfaces. Tras un pequeño esfuerzo, como ya había ocurrido en el par esférico, se logra liberar el par prismático principal. Las rótulas, en este caso, funcionan desde el primer instante, ya que la gran superficie descubierta ha permitido un lavado satisfactorio.

Sin embargo, este proceso no es igual de bueno con el par rotativo. En este caso, la razón no es un lavado incompleto, sino subproducto de la capacidad de la impresora. Como ya se ha comentado, la impresora 3D no es capaz de perfilar superficies curvas con la precisión que se puede conseguir de otros procesos como la fundición a la cera.

En este caso, debido a la acción del peso de material sumado con las irregularidades superficiales que deja intrínsecamente la impresión 3D, las superficies interiores de la rótula que estaban en contacto en el diseño han quedado con sus resaltos enfrentados. El resultado de esto, es una superficie muy irregular en la zona de contacto impresa, como se ve en la Ilustración 33.



Ilustración 33 – Daños en la zona de contacto

Sin embargo, el diseño de los canales de limpieza ha resultado bueno, quedando el material de soporte bien disuelto en el contacto, con lo que tras forzar levemente la articulación, se han desencajado las superficies irregulares y funciona correctamente aunque con rozamiento (Ilustración 34).



Ilustración 34 – Canales de limpieza en par rotacional

Las zonas de contacto han sido liberadas de material de soporte correctamente, debido a un buen diseño de canales de lavado fruto de la breve experiencia con los pares impresos individualmente. Sin embargo, el mecanismo no es completamente móvil, debido a dos fallos del diseño que no tienen que ver con el propio proceso de impresión:

- La deslizadera del par prismático es algo estrecha, ofreciendo poca zona de contacto. Esto, conjugado con la obligada holgura entre contactos para permitir la impresión separada de ambas piezas, hace que el par tienda a bloquearse en el movimiento si éste no es totalmente plano.
- La chapa plana que sustenta el soporte del par rotacional, es demasiado delgada; ante la acción del mecanismo, se flexiona y bloquea el movimiento.

Independientemente de esto, el proceso de impresión ha sido globalmente bueno (Ilustración 35).

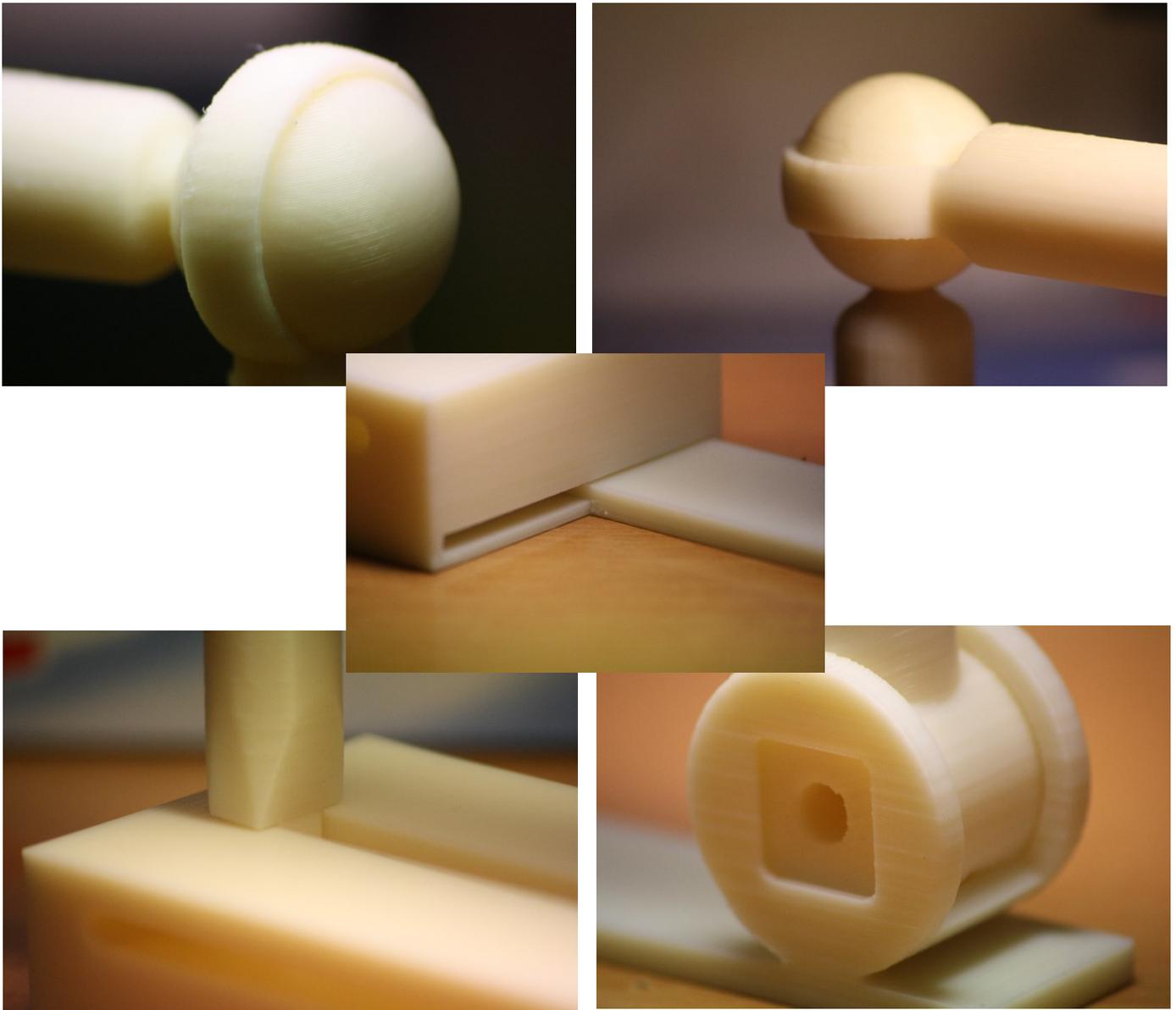


Ilustración 35 – Detalles del mecanismo

6. CÁLCULOS. ANÁLISIS MEF

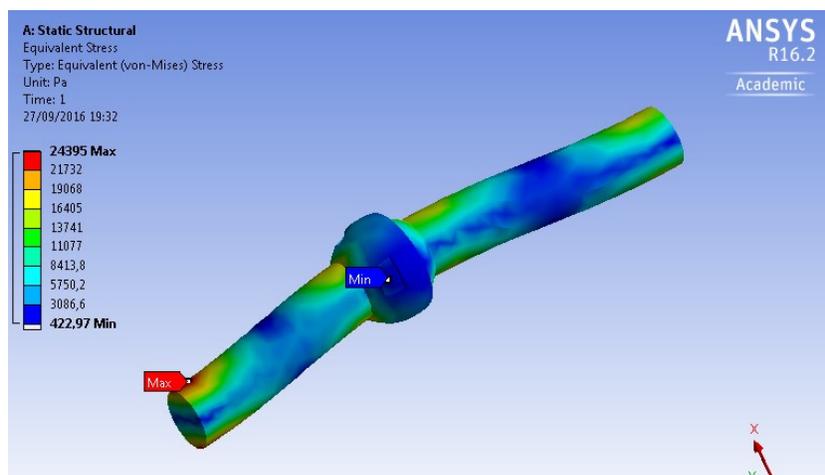
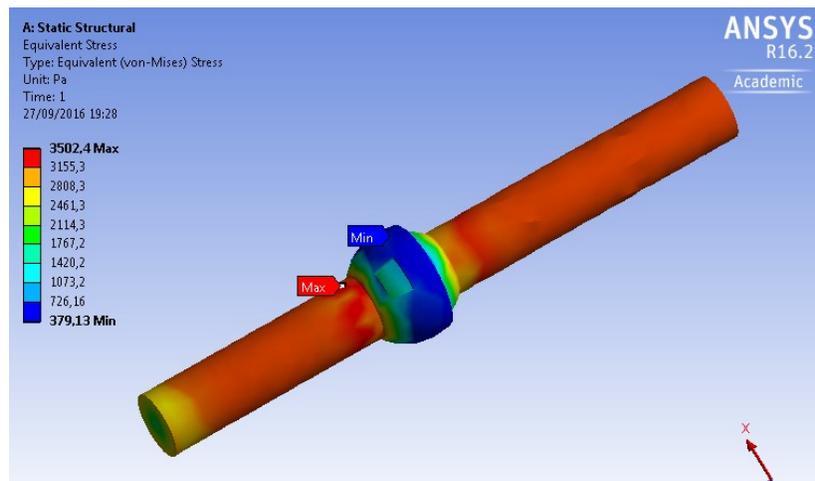
Además de diseñar mecanismos que sean funcionales y sea posible imprimirlos y lavarlos de forma correcta, es necesario que cumplan funciones estructurales.

Para modelar el comportamiento de estos mecanismos, se va a realizar un análisis con Elementos Finitos de los mismos ante cargas habituales para cada tipo de par, con el fin de mostrar que el diseño orientado a impresión 3D es perfectamente válido a la hora de introducir estos elementos con función real. En todos los análisis, se modelizan mediante parámetros las propiedades del *ABSplus*.

6.1. Par esférico

Se somete a la rótula esférica a varios tipos de esfuerzo: tracción pura, flexión pura y tracción-flexión aplicando una carga puntual en una rótula no alineada.

El resultado de cada una de estas tres pruebas se puede ver en la Ilustración 36, la Ilustración 37, y la Ilustración 38.



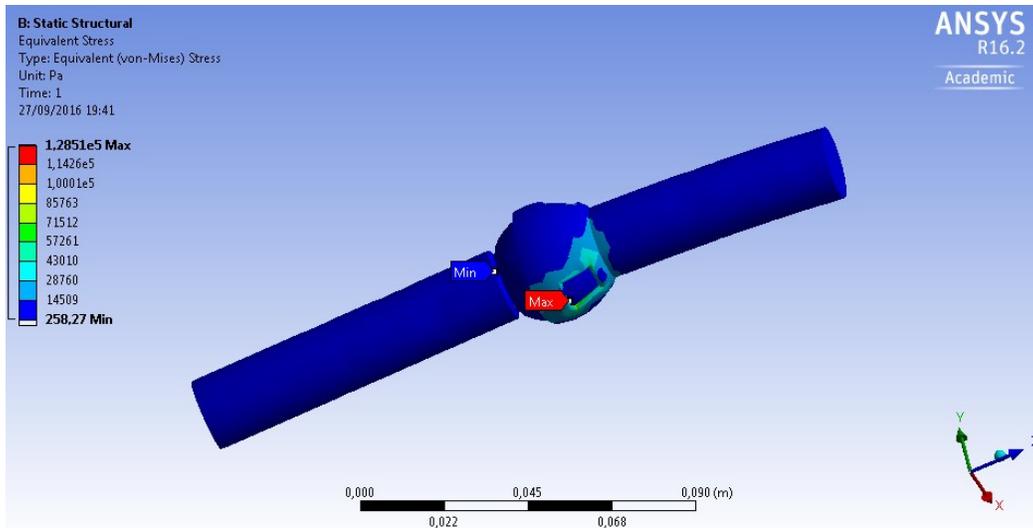


Ilustración 38 – Rótula a tracción-flexión

- **A tracción:**
 - Se empotra un extremo de la rótula y se aplica una fuerza axial de 1kgf en otro.
 - Se ve que las tensiones se concentran en el eje longitudinal, estando en el máximo en la zona de cambio de sección, que es intrínsecamente una zona de concentración de tensiones. Esto podría evitarse con el rediseño del casquillo a un cinturón envolvente, que no requiere rebajes para aumentar la movilidad de forma imprescindible.
- **A flexión:**
 - Se empotran ambos extremos de la rótula y se aplica una fuerza radial de 1kgf en el centro.
 - También presenta un comportamiento normal de viga, sin mayor injerencia de los huecos de lavado.
- **A tracción-flexión:**
 - Se da un ángulo a la rótula, se empotra uno de los extremos y se aplica una carga de 1kgf en el extremo opuesto, en sentido axial.
 - El comportamiento es bueno, aunque la combinación de esfuerzos provoca que las tensiones máximas se trasladen a la zona de los huecos de lavado; esto podría paliarse con un rediseño de los huecos con formas aptas para evitar concentradores de tensión.

6.2. Par rotativo

Se somete al par rotativo a un esfuerzo de tracción-flexión (Ilustración 39), para comprobar su comportamiento ante una carga mixta, que ya se ha comprobado que es la más exigente.

Para ello, al igual que en la rótula, se empotra una de las caras extremas (la de mayor superficie), y se somete en dirección axial a una fuerza de tracción de 1kgf.

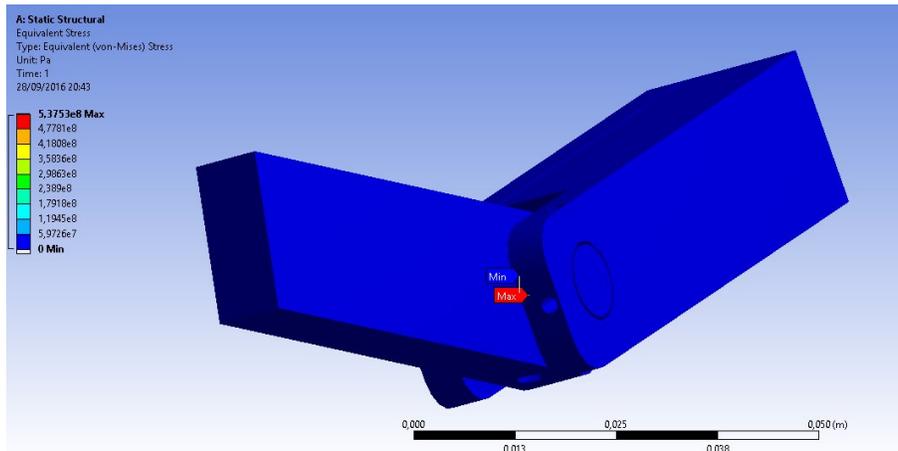


Ilustración 39 – Par rotativo a tracción-flexión

Tal y como se muestra en la Ilustración 40, el comportamiento es el esperado en este tipo de unión con bulón: la mayor carga se concentra a cortante en el borde del mismo.

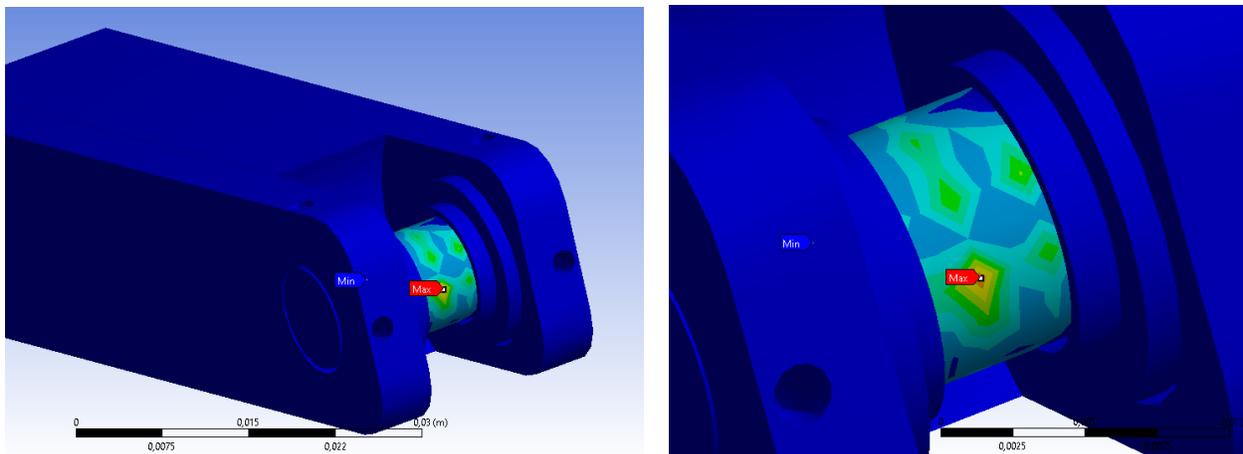


Ilustración 40 – Detalle del esfuerzo máximo

6.3. Mecanismo

Para probar la funcionalidad del mecanismo, se le somete a dos tipos de carga en la rótula superior que podrían simular un esfuerzo externo para moverlo. Se busca ver los efectos sobre las rótulas a ángulos no rectos, la posible flexión en el par prismático, así como la torso-flexión en el par rotativo.

En primer lugar, se somete a un momento de 1kgf·m a la barra superior (Ilustración 41), habiendo fijado previamente la cara inferior de la deslizadera. El comportamiento global es bueno, reduciéndose

las tensiones máximas a las zonas de concentración de tensión descritas en las rótulas. Apenas si surgen tensiones fuera de rango en las áreas de mayor contacto de los pares, pero no hay efectos negativos

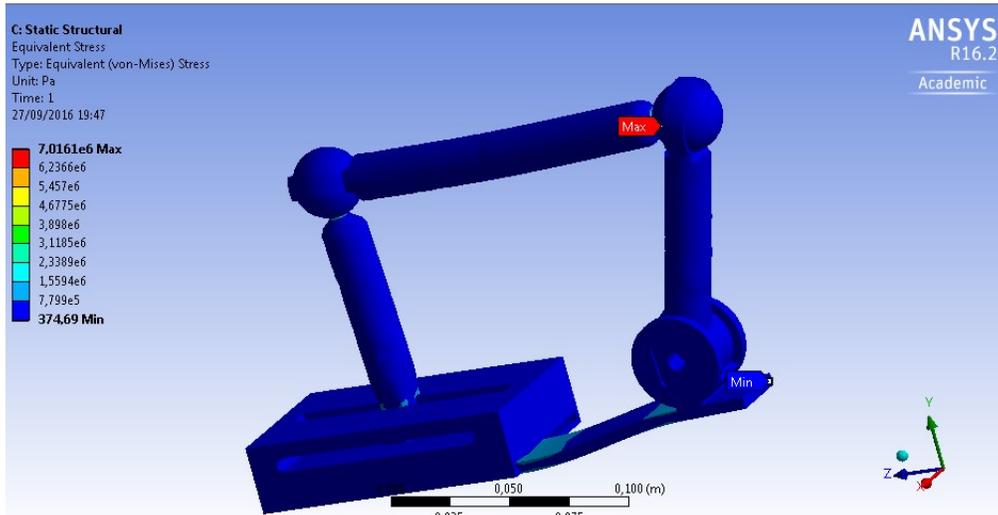


Ilustración 41 – Mecanismo sometido a torsión

destacables en las ranuras de lavado como podría esperarse.

Al no existir zonas de montaje ni ajustes mecánicos, se evitan zonas extra de concentración de tensiones, lo cual es una ventaja de este tipo de sistemas.

La Ilustración 42 muestra detalles de las zonas de mayor concentración de tensiones. La Ilustración 43, indica que la base del par rotativo, muy esbelta, se comporta mal dada la compresión que sufre y padea.

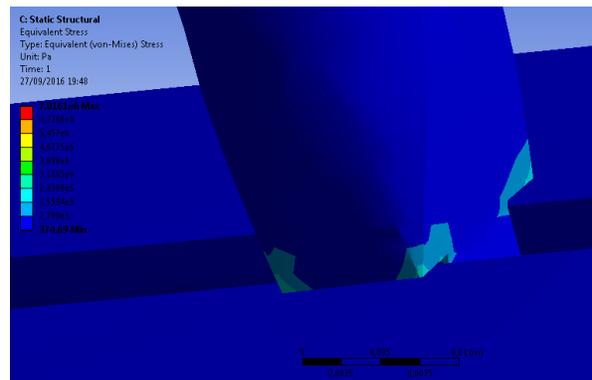
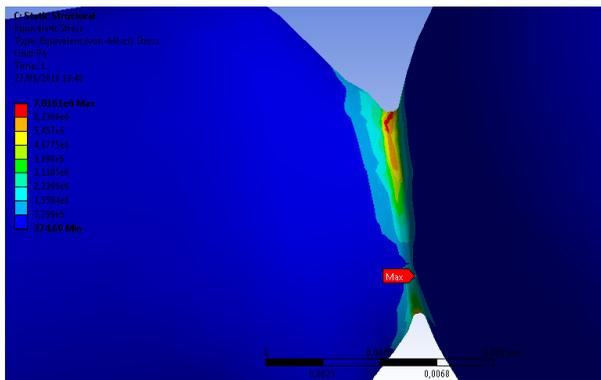


Ilustración 42 – Zonas de concentración de tensiones

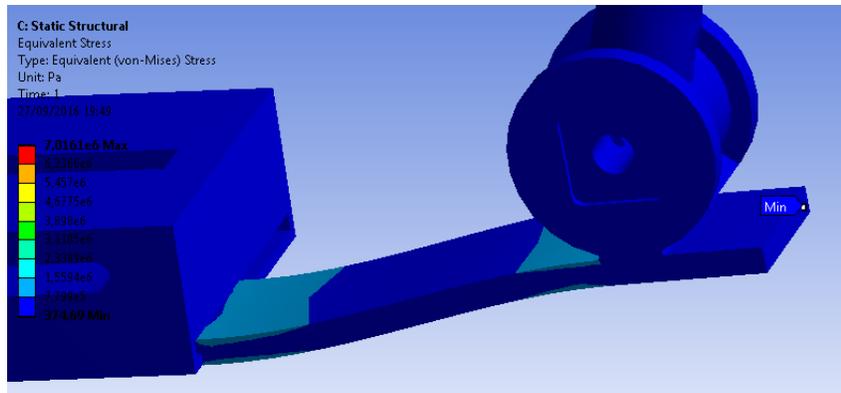


Ilustración 44 – Pandeo de la base

También se somete al mecanismo a un esfuerzo de flexión (Ilustración 44), con una fuerza de 1kgf vertical y hacia abajo sobre el eje superior habiendo fijado las caras inferiores.

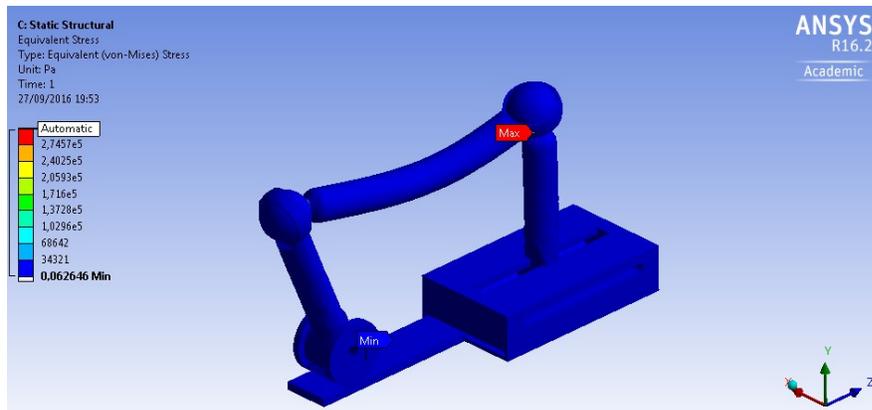


Ilustración 43 – Mecanismo sometido a flexión

El resultado es excepcionalmente bueno, resistiendo el mecanismo sin mayores problemas que los ya acaecidos, es decir, la concentración de tensiones en las zonas de rebaje de la rótula (Ilustración 45).

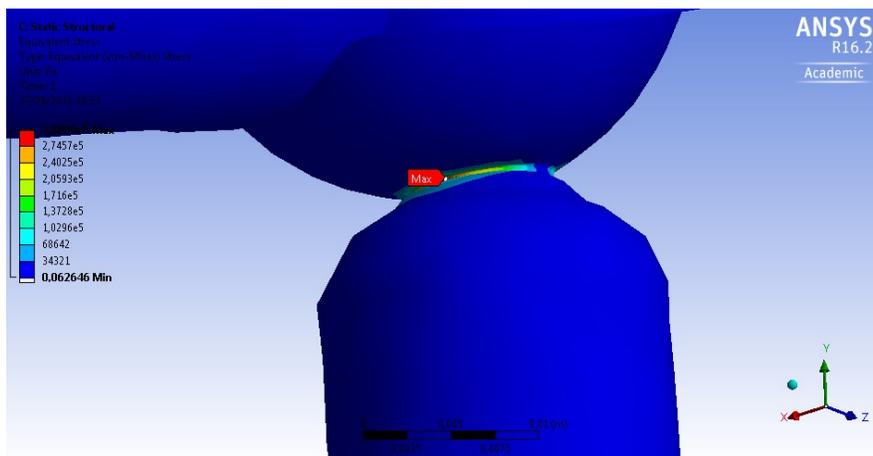


Ilustración 45 – Zona de concentración de tensiones

7. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para este estudio, no cabe contemplar un análisis de implantación, pues la amortización del propio aparato de impresión 3D así como de todos los medios necesarios (sistema de lavado, consumibles, etc.) depende directamente del volumen de trabajo con los mismos.

La inversión inicial en una impresora 3D similar a la empleada en este caso, supone un desembolso considerable que sólo sería justificable a priori si el producto final es comercializable. En caso de usarse sólo para prototipos, la justificación económica depende de lo que se ahorre en cuestión de tiempo y dinero en 3DP frente a otros métodos tradicionales.

Para mostrar esta comparativa, se va a plantear a modo de ejemplo una comparativa de fabricación de un prototipo de rótula esférica, mediante impresión 3D y mediante mecanizado.

El presupuesto en el caso de impresión 3D está recogido en la Tabla 5.

Tabla 5 – Presupuesto para 3DP

	ELEMENTO	PRECIO UNITARIO	UNIDADES	COSTE
GASTOS	MATERIAL DE FABRICACIÓN	242,10 €/L	0,06 L	15,65 €
	MATERIAL DE SOPORTE	242,10 €/L	0,20 L	48,42 €
	QUÍMICO DE LAVADO	3,00 €/kg	1,00 kg	3,00 €
	SUBTOTAL GASTOS			67 €

	ELEMENTO	PRECIO POR HORA	HORAS	COSTE
HORAS INTERNAS	HORAS DE DISEÑO	15,00 €/h	40 h	600,00 €
	HORAS DE IMPRESIÓN	10,00 €/h	15 h	150,00 €
	SUBOTOTAL PERSONAL			750,00 €

	ELEMENTO	PRECIO UNITARIO	VIDA ÚTIL	USO	% AMORTIZADO	AMORTIZACIÓN
AMORTIZACIONES	EQUIPO (PC)	400€	2 año(s)	45 h	0,7705%	3,08 €
	IMPRESORA 3D	50000€	2 año(s)	15 h	0,2568%	128,42 €
	LICENCIAS SOFTWARE	3600€	1 año(s)	40 h	1,3699%	49,32 €
	SUBTOTAL AMORTIZACIONES					

COSTES DIRECTOS	SUBTOTAL GASTOS	248 €
	SUBTOTAL PERSONAL	750 €
COSTES INDIRECTOS	C. INDIRECTOS	70 €
	C. FINANCIEROS	0 €
TOTAL		1068 €

El presupuesto en el caso de fabricación tradicional está recogido en la Tabla 6.

Tabla 6 – Presupuesto para fabricación tradicional

	ELEMENTO	PRECIO UNITARIO	UNIDADES	COSTE
GASTOS	MATERIAL DE FABRICACIÓN	2,10 €/L	0,15 L	0,32 €
	SUBTOTAL GASTOS			0,32 €

	ELEMENTO	PRECIO POR HORA	HORAS	COSTE
HORAS INTERNAS	HORAS DE DISEÑO	15,00 €/h	100 h	1500,00 €
	HORAS DE FABRICACIÓN	10,00 €/h	16 h	160,00 €
	HORAS DE MONTAJE	10,00 €/h	8h	80,00 €
	SUBOTOTAL PERSONAL			1660,00 €

	ELEMENTO	PRECIO UNITARIO	VIDA ÚTIL	USO	% AMORTIZADO	AMORTIZACIÓN
AMORTIZACIONES	EQUIPO (PC)	400 €	2 año(s)	45 h	0,7705%	3,08 €
	IMPRESORA 3D	150000 €	6 año(s)	16 h	0,0913%	136,99 €
	LICENCIAS SOFTWARE	3600 €	1 año(s)	40 h	1,3699%	49,32 €
	SUBTOTAL AMORTIZACIONES					189,38 €

COSTES DIRECTOS	SUBTOTAL GASTOS	190 €
	SUBTOTAL PERSONAL	1660 €
COSTES INDIRECTOS	C. INDIRECTOS	129 €
	C. FINANCIEROS	0 €
TOTAL		1979 €

En ambos casos, el coste de los equipos se compensa teniendo en cuenta sus vidas útiles, quedando ajustada la diferencia entre ambos. El caso de impresión 3D dispara el precio del material, pues aún es caro; sin embargo, su precio se debe a que aún no tiene un uso altamente extendido.

La gran diferencia entre ambos es la mano de obra. Mientras que para fabricar una pieza a mano, además de necesitar más horas de diseño para poder tener en cuenta las fases de montajes, se suman las

horas del propio montaje. Aun suponiendo que pudiera tardarse lo mismo en fabricar una y otra, el coste es prácticamente el doble; lo que se traduce en un precio final de casi 900€ más caro.

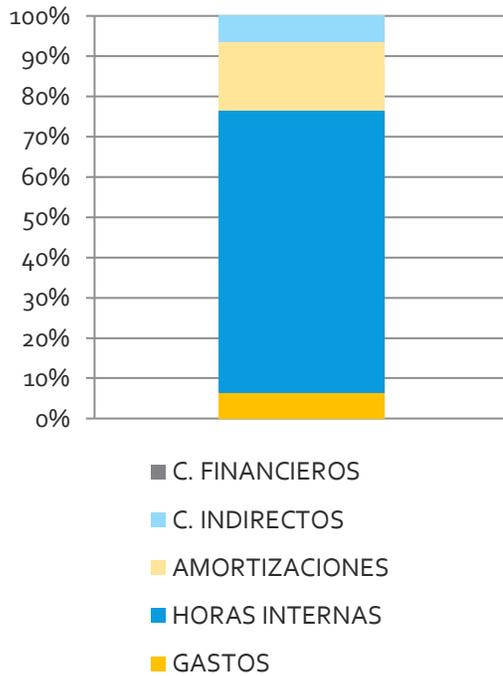


Gráfico 9 – Comparativa de costes (3DP)

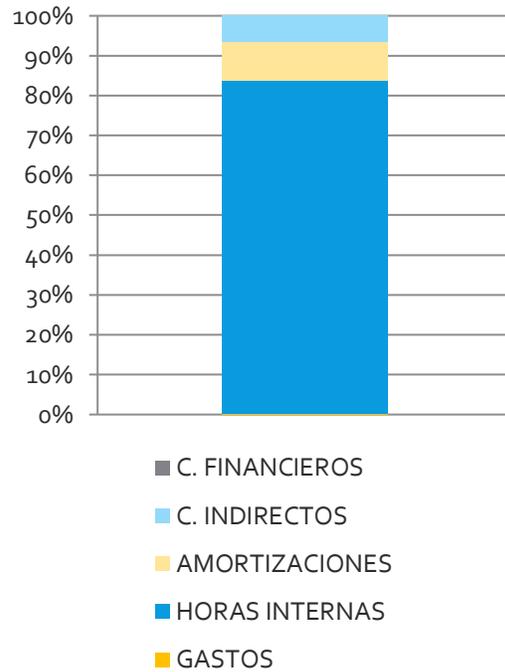


Gráfico 8 – Comparativa de costes (Fabr. Tradicional)

Los gráficos 8 y 9 muestran la diferencia entre uno y otro: las horas internas suponen casi un 85% para la fabricación tradicional, mientras que son un 65% en el caso de la impresión 3D.

8. CONCLUSIONES

La fabricación de mecanismos reales, y por extensión de cualquier máquina mediante impresión 3D ha demostrado tener un buen futuro por delante. En este trabajo, se han realizado alternativas sencillas, modelos básicos que son los cimientos de máquinas mucho más complejas; y el resultado ha sido positivo.

Durante el diseño de las piezas, se abarata en costes y en tiempo si se diseña la pieza bajo términos exclusivamente de funcionalidad, obviando requisitos de montaje que encarecen el diseño final. Además, aunque aquí solo se han llevado a cabo elementos y mecanismos sencillos, con el hardware adecuado es posible imprimir todo tipo de maquinaria perfectamente operativa mecánicamente, lo que puede dar pie en un futuro próximo a fabricar directamente todo tipo de máquina herramienta, y por extensión probablemente cualquier producto.

La impresión 3D está evolucionando constantemente, y pese a que en la actualidad comercialmente se emplee casi en exclusividad materiales plásticos como el ABS empleado en este proyecto, los desarrollos de impresión en todo tipo de materiales están avanzando y pueden ofrecer grandes resultados.

En los diseños expuestos en este documento, el resultado de impresión ha sido positivo. No sólo se han conseguido elementos funcionales, sino que el tiempo de diseño de los mismos ha sido realmente bajo. El diseño puede hacerse algo más complejo al tener que tener en cuenta las restricciones propias de la impresión 3D (uso de bebederos y canales de lavado), pero se simplifica en términos de montaje, además de ofrecer una integridad mayor precisamente por no necesitar montaje alguno.

El desarrollo que la impresión 3D puede ofrecer es patente en cuanto a que un mecanismo que en un caso real requeriría de 4 elementos fabricados y montados por separado, además de una fabricación manual o por fundición de los soportes de los mismos, pasa a ser un mero CAD de conjunto que pasa directamente a producción sin ningún tipo de análisis más allá de la disposición física en la bandeja de impresión.

Con impresoras de alta resolución, es posible fabricar casi cualquier cosa; no en vano, las prótesis biocompatibles son fabricadas con esta tecnología, puesto que no hay otra técnica mejor para malear materiales biocompatibles con el ser humano. Sin embargo, no sólo en este campo hay futuro para esta forma de trabajo, puesto que en una producción en serie de mecanismos sencillos sería posible implementarse en la actualidad con los medios disponibles; las empresas más punteras están invirtiendo en esta tecnología porque el ahorro en tiempo de diseño y en complejidad de producción es considerable. Precisamente es esta inversión constante y creciente lo que hará en no mucho tiempo disminuir los costes de material, haciendo esta tecnología alcanzable a todo tipo de empresas.

Ahora, con esta tecnología, cualquier pequeña empresa puede comenzar a fabricar sus productos sin invertir en maquinaria pesada y tecnológicamente avanzada; los diseños son mucho más resistentes estructuralmente y apenas si presentan más problemas de los que podría presentar un diseño convencional, como se ha visto en el análisis de Elementos Finitos.

En resumen, este trabajo demuestra que diseños que elaborar con medios tradicionales sería complejo y casi artesanal, son posibles de fabricar en pocas horas y con no más medios que una máquina que si bien requiere de una inversión inicial grande, no es ni la mitad de lo que podría ser en caso de centros de mecanizados o maquinaria a medida. Invertir en desarrollos de tecnología 3D favorece a la

industria, tanto a la pequeña como a la grande, y supondrá en un futuro cercano la forma básica de hacer prototipos y en uno no tan lejano, el medio más básico y utilizado de fabricación en serie; sobre todo con el desarrollo de tecnologías DoB que prácticamente flexibilizan los materiales a un amplio abanico.

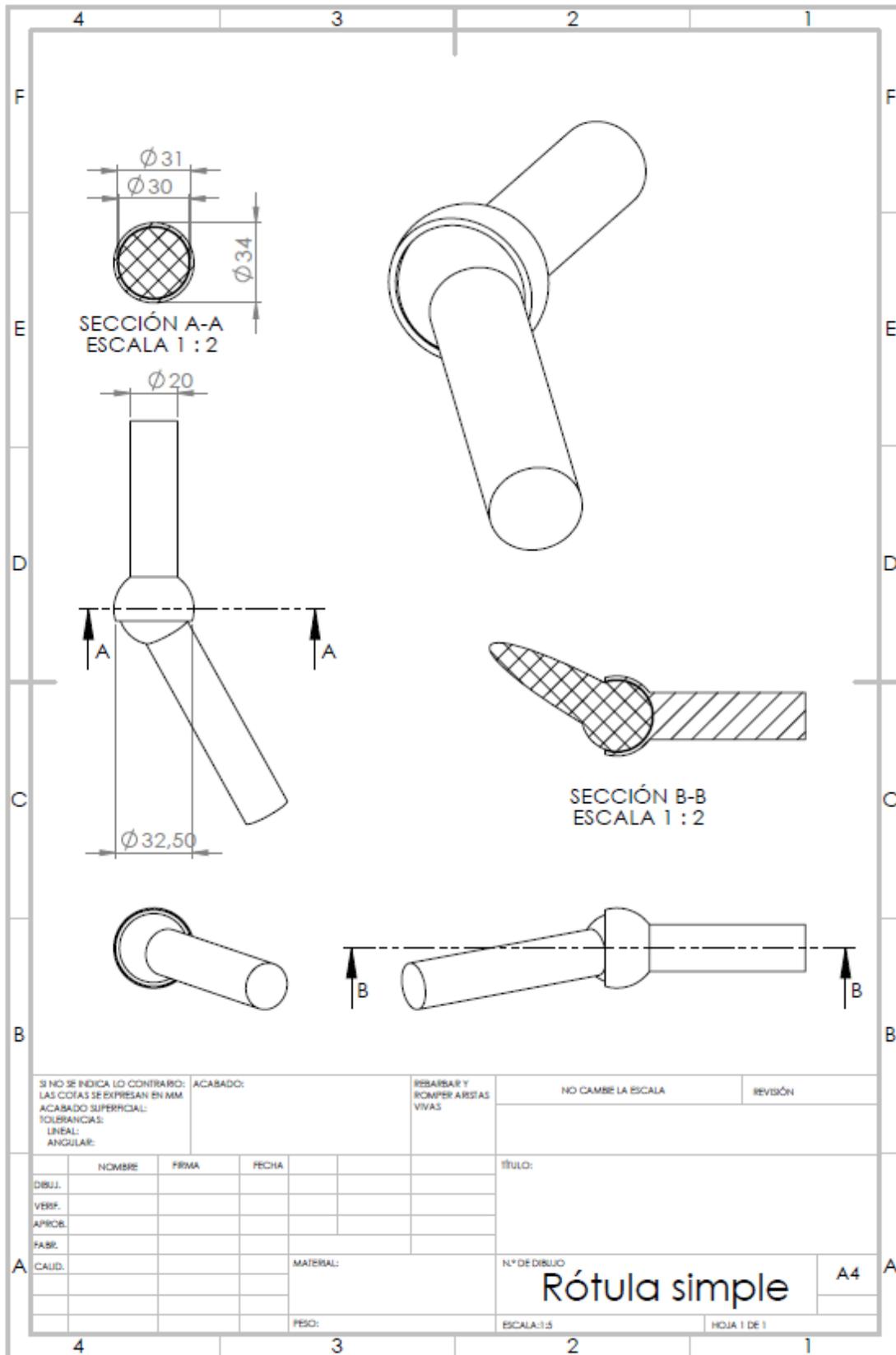
Siguiendo unas pautas como las expuestas en este trabajo, y adaptando la filosofía empresarial al uso de esta tecnología, se abre un campo aún por desarrollar que pronto dará frutos, no sólo económicamente para las empresas, sino que acabará revirtiendo en un beneficio para la sociedad con el abaratamiento de los productos finales.

9. BIBLIOGRAFÍA

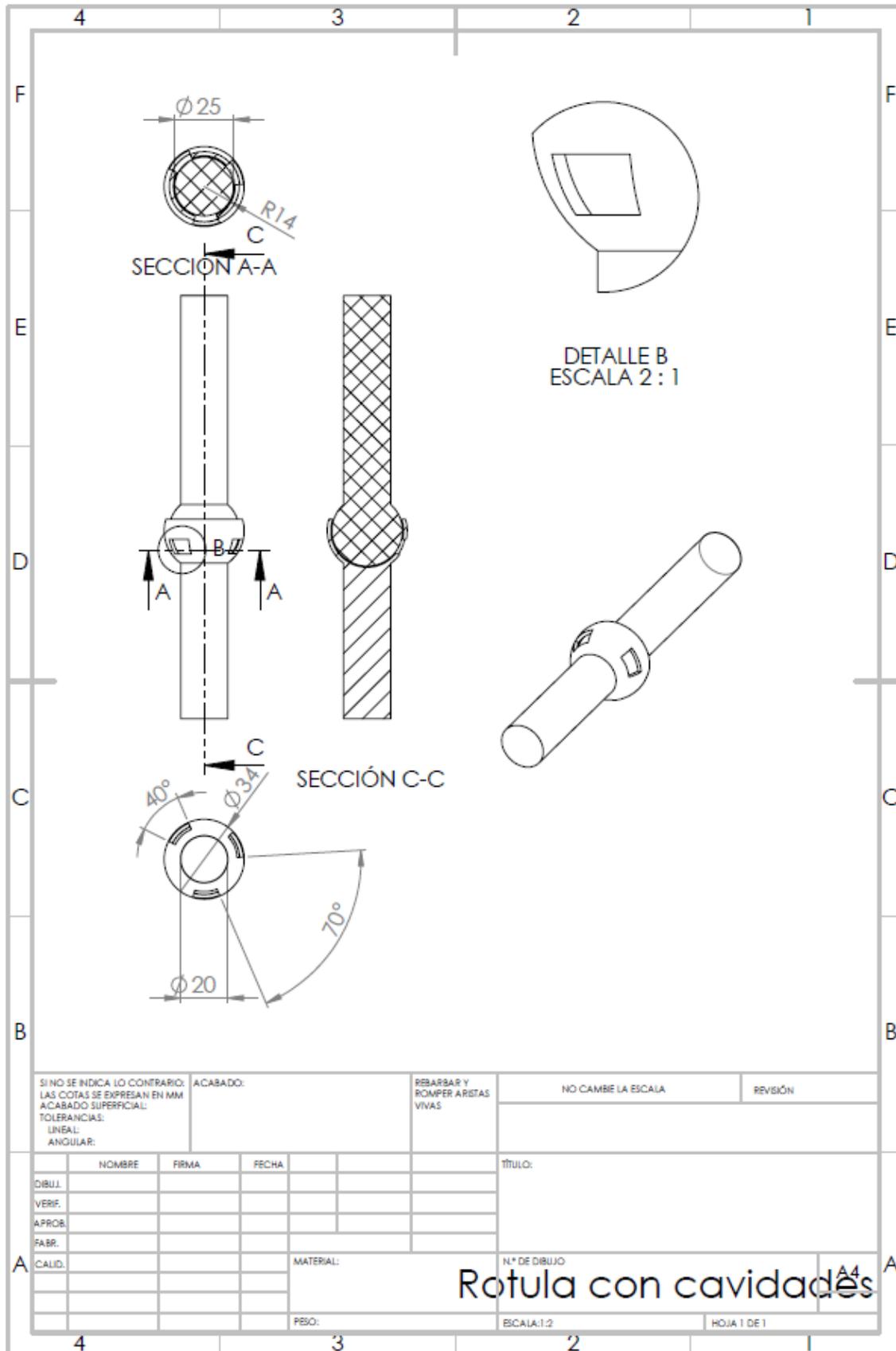
- Bellini, A., & Güçeri, S. (2003). Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 9, 252-264.
- Dimitrov, D., Schreve, K., & de Beer, N. (2006). Advances in three dimensional printing - state of the art and future perspectives. *Rapid Prototyping Journal*, 12, 136-147.
- Huang, J. L. (2013). Fatigue analysis of FDM. *Rapid Prototyping Journal*, 19, 291-299.
- Moore, J., & Williams, C. (2012). *Fatigue characterization of 3D printed elastomer material*. (V. P. University, Ed.)
- Tai, K., Garg, A., & Savalani, M. (2014). State-of-the-art in empirical modelling of rapid prototyping processes. *Rapid Prototyping Journal*, 20, 164-178.
- Thomas, J. P., Rodríguez, J. F., & Renaud, J. E. (2003). Design of fused-depositions. ABS components for stiffness and strength. *Journal of Mechanical Design*, 545-551.
- Waytashek, M., & Letcher, T. (2014). Material property testing of 3DP specimen. *IMECE2014*. Montreal, Quebec, Canada.

10. ANEXOS

10.1. Anexo I: Plano de la rótula simple



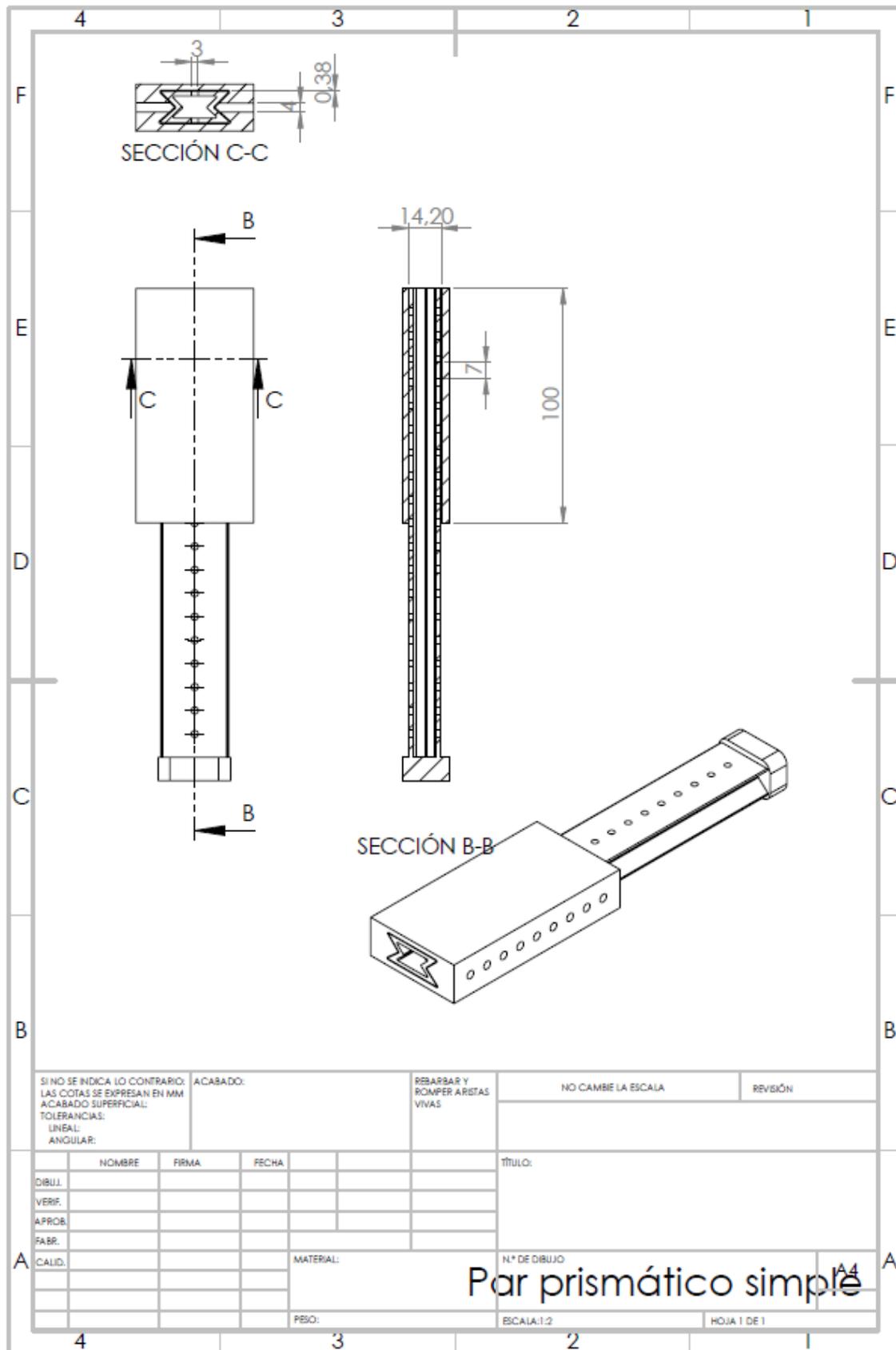
10.2. Anexo II: Plano de la rótula con cavidades



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	A4
			PESO:	ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1

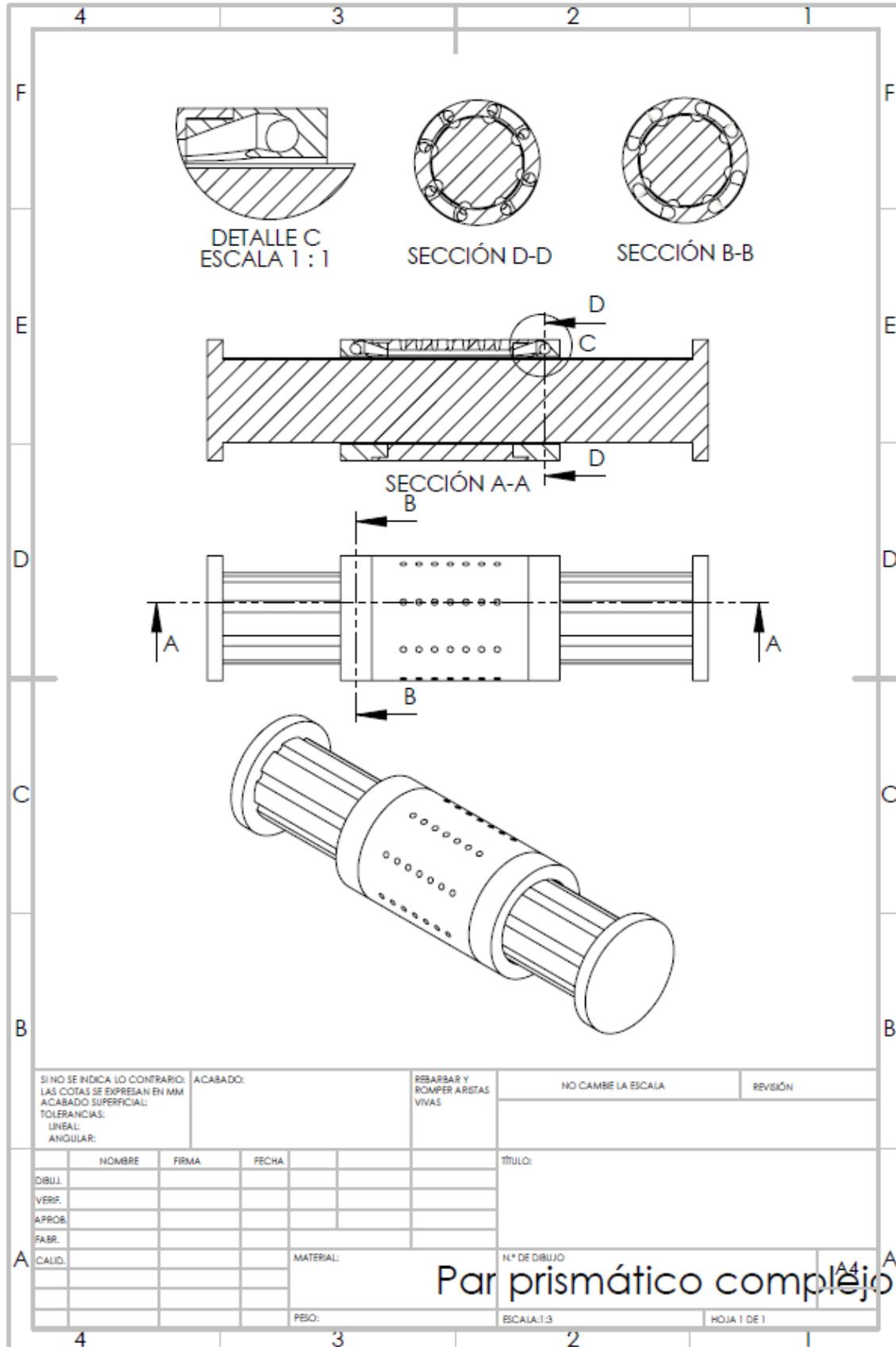
Rotula con cavidades

10.3. Anexo III: Plano del par prismático simple



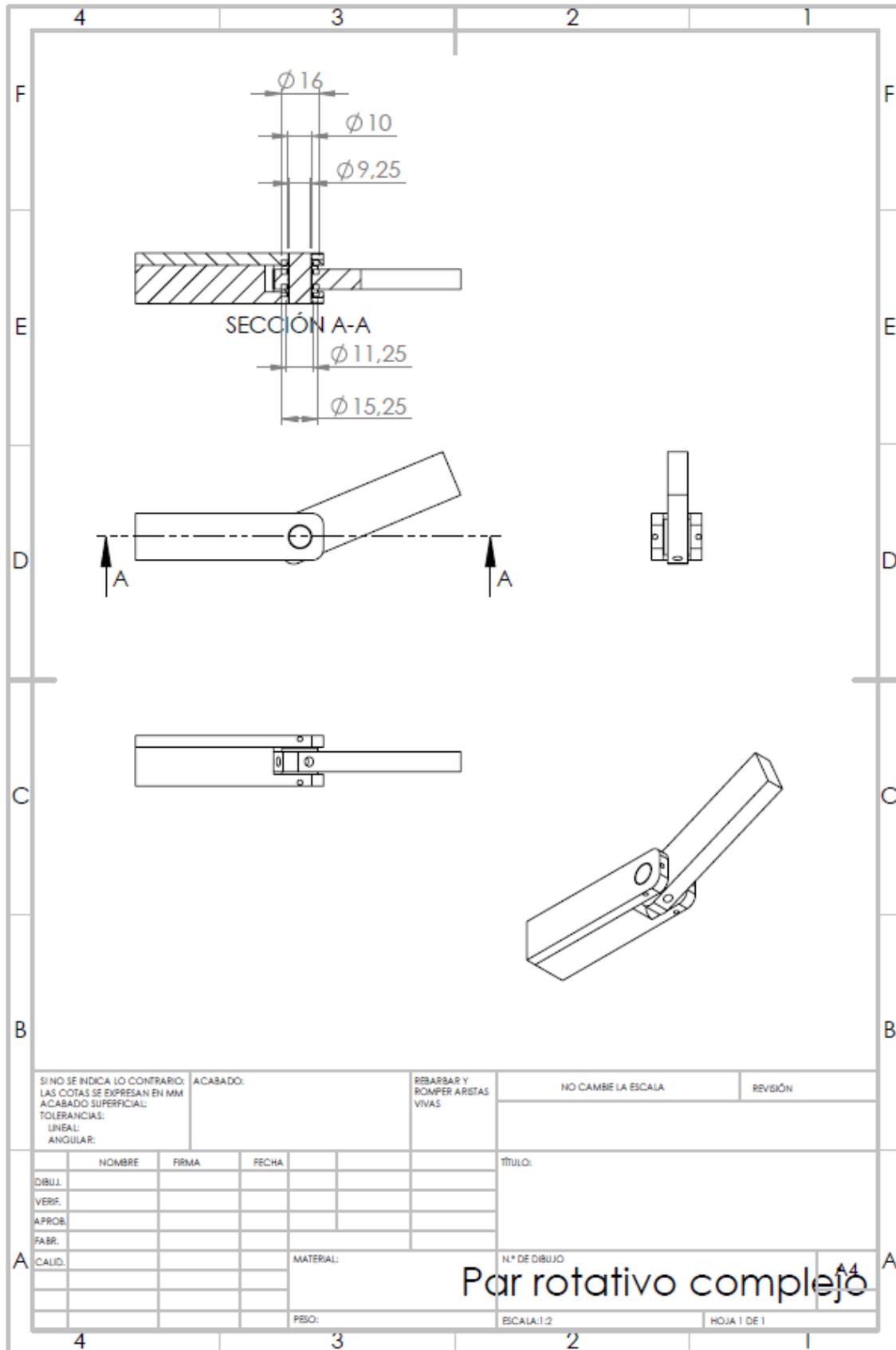
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA		TÍTULO:	
VERIF.						
APROB.						
FABR.						
CALID.				MATERIAL:	Nº DE DIBUJO	A4
				PESO:	ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1

10.4. Anexo IV: Plano del par prismático complejo



Par prismático complejo

10.5. Anexo V: Plano del par rotativo complejo



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
DIBUJ.		NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:	
VERIF.									
APROB.									
FABR.									
CALID.				MATERIAL:		N° DE DIBUJO		A4	
				PESO:		ESCALA: 1:2		HOJA 1 DE 1	

Par rotativo complejo

10.6. Anexo VI: Plano del mecanismo

