



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Escola Politècnica Superior  
d'Enginyeria de Manresa

---

# **Diseño, simulación y validación de un mecanismo hidráulico que pueda ser impreso en 3D**

15 de febrero de 2022

---

trabajo de fin de grado que presenta

**Alicia Altaba Delgado**

en cumplimiento de los requisitos para alcanzar el Grado de Ingeniería de Automoción

**Dirección: Joan Antoni López**

*A mi familia, por todo el apoyo recibido  
durante toda la vida*

## Resumen

La investigación y el desarrollo de software dedicado a la computación de elementos finitos ha comportado grandes avances en la mecánica de fluidos.

Tales avances han logrado mejorar significativamente la precisión y la usabilidad de los resultados aplicados al medio ambiente, haciendo posible realizar cálculos y obtener resultados muy complejos en un breve espacio de tiempo.

El objetivo del presente proyecto es estudiar la dinámica de fluidos (y su comportamiento) de un mecanismo hidráulico que pueda ser impreso en 3D, mediante el método de los elementos finitos aplicados en el sector de la mecánica de fluidos. Para ello se utilizará el software ANSYS Fluent que ayudará en la simulación y la herramienta CATIA para la creación de la geometría.

Se realizará el estudio de la geometría con cierta rugosidad para comprobar si el funcionamiento de la geometría impresa por fabricación aditiva mantiene las mismas características que la geometría lisa.

## Resum

La investigació i el desenvolupament de programari dedicat a la computació d'elements finits ha comportat grans avenços a la mecànica de fluids.

Aquests avenços han aconseguit millorar significativament la precisió dels resultats aplicats al medi ambient, fent possible fer càlculs i obtenir resultats molt complexos en un breu espai de temps.

L'objectiu del present projecte és estudiar la dinàmica de fluids (i el seu comportament) d'un mecanisme hidràulic que pugui ser imprès en 3D, mitjançant el mètode dels elements finits aplicats al sector de la mecànica de fluids. Per això s'utilitzarà el programari ANSYS Fluent que ajudarà a la simulació i l'eina CATIA per a la creació de la geometria.

Es realitzarà l'estudi de la geometria amb certa rugositat per comprovar si el funcionament de la geometria impresa per fabricació additiva manté les mateixes característiques que la geometria llisa.

# Abstract

The research and development of software dedicated to finite element computing has led to great advances in fluid mechanics.

Such advances have significantly improved the accuracy and usability of the results applied to the environment, making it possible to perform calculations and obtain very complex results in a short time.

The objective of this project is to study the fluid dynamics (and its behavior) of a hydraulic mechanism that can be printed in 3D, through the finite element method applied in the field of fluid mechanics. For this, the ANSYS Fluent software will be used to help in the simulation and the CATIA tool to create the geometry.

The study of the geometry with a certain roughness will be carried out to check if the geometry printed by additive manufacturing maintains the same characteristics as the smooth geometry.

# ÍNDICE

Resumen	3
Resum	4
Abstract	5
1. Introducción	11
1.1. Origen y motivación del trabajo	11
1.2. Objetivo del trabajo	11
2. Impresión 3D	12
2.1. Historia de la fabricación aditiva	12
2.2. Tipos fabricación aditiva más relevantes	15
2.2.1. Extrusión de material	15
2.2.1.1. FDM	15
2.2.2 . Binder Jetting	16
2.2.3 . Material Jetting	16
2.2.4. Laminación de capas	17
2.2.5. Vat Photopolymerization	17
2.2.6. Deposición de energía dirigida (DED)	18
2.2.7. Fusión por lecho de polvo	18
3. Diseño del Dispositivo hidráulico	20
3.1. Componentes del dispositivo	20
3.1.1. Bomba	20
3.1.2. Pistón	21
3.1.3. Bombín	22
3.2. Planos del diseño de la geometría	24
3.3. Funcionamiento del dispositivo	27
3.3.1. Accionamiento	27
3.3.2. Vaciado del circuito	27
3.3.3. Esquema de funcionamiento	28
3.4. Especificaciones del dispositivo	29
3.4.1. Elevación de objetos	29
3.4.2. Fuerza requerida	29
4. Simulación CFD de la válvula 1.	32
4.1. Geometría de la válvula	32
4.2. Material del fluido	32
4.3. Modelo CFD	33
4.4. Parámetros para los diferentes cálculos.	34
4.4.1 Condiciones de contorno	36
4.5. Resultados de las simulaciones	38
4.5.1. Resultados 60º y 2 mm de separación	38

4.5.2. Resultados 60º y 5 mm de separación	40
4.5.3. Resultados ángulo 30º y 2 mm de separación	40
4.5.4. Resultados ángulo 30º y 5 mm de separación	41
4.5.5. Resultados ángulo 30º y 2 mm de separación con rugosidad, flujo turbulento	41
4.5.6. Resultados ángulo 30º y 2 mm de separación sin rugosidad, flujo turbulento	42
4.5.7. Resultados ángulo 45º y 2 mm de separación en 3D	42
4.6. Análisis de resultados	43
4.7. Comprobación de resultados	44
5. Visualización impresión 3D	48
5.1. BCN3D Stratos	48
5.2. CHITUBOX	49
6. Conclusiones	51
7. Bibliografía	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Fig. 1. Diagrama esquemático del proceso Binder Jetting (Rojas Arciniegas, A. J. (s. f.).)</i>	16
<i>Fig. 2. Esquema de funcionamiento (FABRICACIÓN POR CORTE Y LAMINADO. LOM., 2012)</i>	17
<i>Fig. 3. Esquema de fabricación aditiva DED (C.,L., 2022)</i>	18
<i>Fig. 4. Esquema del proceso de fusión por lecho de polvo. (SINTERIZADO LÁSER SELECTIVO SLS, 2018)</i>	19
<i>Fig. 5. Dibujo CAD dispositivo hidráulico[elaboración propia]</i>	20
<i>Fig. 6. Bomba del dispositivo hidráulico[elaboración propia]</i>	20
<i>Fig. 7. Medidas interiores de la bomba [elaboración propia]</i>	21
<i>Fig. 8 Dibujo CAD del conjunto pistón con medidas [elaboración propia]</i>	22
<i>Fig. 9. Conjunto pistón en apertura máxima de la palanca[elaboración propia]</i>	22
<i>Fig. 10. Conjunto pistón en apertura mínima de la palanca[elaboración propia]</i>	23
<i>Fig. 11. Dibujo CAD del conjunto bombín con medidas [elaboración propia]</i>	23
<i>Fig. 12. Plano del “product” del dispositivo hidráulico</i>	24
<i>Fig. 13. Plano de diferentes secciones del dispositivo hidráulico</i>	25
<i>Fig. 14. Lista de materiales del dispositivo hidráulico</i>	26
<i>Fig.15. Circuito hidráulico</i>	28
<i>Fig. 16. Principio de Pascal</i>	30
<i>Fig. 17. Esquema de distancias de la palanca</i>	31
<i>Fig. 18. Geometría para la simulación CFD.</i>	33
<i>Fig. 19. Características del mallado para la simulación CFD.</i>	34
<i>Fig. 20. Diferentes ángulos de apertura</i>	35
<i>Fig. 21. Punto posición 1</i>	35
<i>Fig. 22. Punto posición 2</i>	36
<i>Fig. 23. Presión estática</i>	38
<i>Fig. 24. Magnitud de velocidad</i>	38
<i>Fig. 25. Líneas de puntos de estudio 1 y 2</i>	38
<i>Fig. 26. Presión a lo largo del eje X</i>	39
<i>Fig. 27. Velocidad a lo largo del eje X</i>	39
<i>Fig. 28. Presión a lo largo del eje X</i>	39
<i>Fig. 29. Velocidad a lo largo del eje X</i>	39
<i>Fig. 30. Presión estática</i>	40
<i>Fig. 31. Magnitud de velocidad</i>	40
<i>Fig. 32. Presión estática</i>	40
<i>Fig. 33. Magnitud de velocidad</i>	40
<i>Fig. 34. Presión estática</i>	41
<i>Fig. 35. Magnitud de velocidad</i>	41
<i>Fig. 36. Presión con rugosidad</i>	41
<i>Fig. 37. Velocidad con rugosidad</i>	41
<i>Fig. 38. Presión con flujo turbulento</i>	42
<i>Fig. 39. Velocidad con flujo turbulento</i>	42
<i>Fig. 40. Distribución de la presión</i>	42
<i>Fig. 41. Distribución de la velocidad</i>	42



<i>Fig. 42. Presión en diferentes planos de la figura 3D.</i>	43
<i>Fig. 43. Velocidad en diferentes planos de la figura 3D.</i>	43
<i>Fig. 44. Esquema explicación ecuación Bernoulli (Xnomid, s. f.)</i>	44
<i>Fig. 45. y Fig. 46. Presión en P1</i>	45
<i>Fig. 47. y Fig. 48. Velocidad en P1</i>	45
<i>Fig. 49. y Fig. 50. Presión en P2</i>	46
<i>Fig. 51. y Fig. 52. Velocidad en P2</i>	46
<i>Fig. 53. Parámetros de impresión FDM</i>	48
<i>Fig. 54. Simulación de impresión FDM</i>	48
<i>Fig. 55. Parámetros de impresión SLA</i>	49
<i>Fig. 56. Simulación de impresión SLA</i>	49

## GLOSSARIO

*3D = Tridimensional*

*CAD = Computer-Aided Design (Diseño asistido por ordenador)*

*CFD = Computational Fluid Dynamics: (Dinámica de fluidos computacional)*

*AM = Additive manufacturing (Fabricación additiva)*

*SLA = StereoLithography Apparatus (Aparato de estereolitografía)*

*PVC = policloruro de vinilo*

*ASTM = American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)*

*r = radio*

*h = altura*

*P = presión*

*F = Fuerza*

*A = Área*

*m = masa*

*g = gravedad*

*M = momento*

*d = distancia*

*Eje X = eje horizontal*

*Eje Y = eje vertical*

*6DOF = 6 degrees of freedom (6 grados de libertad)*

*UDF = User defined function (Funciones definidas por el usuario)*

*$\omega$  = velocidad angular*

# 1. Introducción

## 1.1. Origen y motivación del trabajo

Una vez cursado el grado de Ingeniería de la Automoción, y vistas las asignaturas y los contenidos de las mismas, lo relativo a la fluidodinámica, así como el diseño por ordenador me resultaron interesantes por todo lo que se podía desarrollar con ambas. Eso justamente fue lo que me motivó para realizar este proyecto, ya que me permitía profundizar en estas dos áreas.

Trabajar con el software dedicado al CFD también contribuyó en gran parte a que me decantara por la presente propuesta, ya que me ayudará a familiarizarme con una herramienta que puede ser esencial en mi futuro profesional.

## 1.2. Objetivo del trabajo

El objetivo del trabajo se basa, principalmente, en realizar el estudio fluidodinámico de la válvula antirretorno de un mecanismo hidráulico accionado por una fuerza externa (con una parte del cuerpo, por ejemplo). Se quiere observar también la variabilidad de las características de la válvula en caso de realizar la fabricación de la bomba mediante una impresora 3D. Para ello se ha empleado el programa CATIA en el proyecto de la geometría y realizado las simulaciones con el uso del software ANSYS Fluent.

Como objetivo personal, cabe remarcar la importancia de aplicar y profundizar en lo que se ha impartido durante el grado universitario, tanto en diseño CAD como en simulación CFD, ya que probablemente forme parte de mi práctica habitual en mi futuro profesional. También es importante tener en cuenta los retos y desafíos que suponen el producir un proyecto individual con todo lo que ello supone de esfuerzo y responsabilidad.

## 2. Impresión 3D

La impresión 3D, también llamada fabricación aditiva, es un proceso a partir del diseño digital, en el que, sin moldes ni matrices, se van creando piezas (una a una) mediante capas de material. La gran diferencia con la fabricación sustractiva es que ésta crea material a partir de la extracción de partes de un bloque inicial. Utilizando la técnica de creación de objetos físicos 3D se reduce la cantidad de material sobrante y el tiempo de fabricación obteniendo numerosos beneficios tanto medioambientales como en la diversificación de los productos.

La impresión 3D ayuda a romper las barreras de las limitaciones físicas, dando la gran posibilidad a los diseñadores digitales de la personalización. Esto comporta, además, que haya una posibilidad de crear, a futuro, centros productivos deslocalizados, donde se multipliquen los recursos y se reduzcan desperdicios y retrasos.

Las limitaciones que se encuentran actualmente en la fabricación aditiva se hallan en los materiales, tanto por su coste como por su productividad. La AM (additive manufacturing) se usa actualmente para crear modelos físicos, prototipos, herramientas y otras muchas otras partes de producción tanto en plástico como en metales, cerámicas, cristales y materiales biológicos. Estos materiales alimentan las máquinas de impresión 3D a partir de hilos, cables, líquidos, polvos, pastas y láminas de material que conformarán los nuevos artículos.

### 2.1. Historia de la fabricación aditiva

La historia de la fabricación aditiva es mucho más antigua que lo que la mayoría de gente piensa hoy en día. El primer sistema de impresión 3D comercializado se remonta a la década de los 80.

El primer intento de crear elementos robustos utilizando fotopolímeros con láser se desarrolló a finales de la década de 1960 en el Battelle Memorial Facility. El ensayo consistía en el encuentro de dos frecuencias de emisión de luz láser en un tanque de brea, intentando polimerizar (endurecer) el material en el punto de intersección. El caucho de fotopolímero utilizado en este proceso fue desarrollado en la década de 1950 por DuPont.

La impresión 3D comenzó a comercializarse en 1987 con estereolitografía (SL, siglas en inglés) de sistemas 3D Systems. Es un proceso que solidifica capas finas de polímero líquido sensible a la luz ultravioleta (UV) mediante un láser. La SLA-1 (*StereoLithography Apparatus*) fue la primera máquina de fabricación aditiva que se comercializó.

En 1988, 3D Systems y Ciba-Geigy se asociaron en el desarrollo de materiales SL y comercializaron las resinas de acrilato de primera generación.

A la vez que 3D Systems, NTT Data CMET de Japón y Sony/D-MEC lanzan al mercado versiones de estereolitografía en el país asiático. En Europa, por otro lado, se empieza a comercializar en 1990 a través de Electro Optical Systems (EOS) de Alemania que vendió sus primeros sistemas de estereolitografía.

Tres tecnologías de AM se empezaron a distribuir en 1991, incluido el modelado por deposición fundida (*FDM*) de Stratasys, el curado de suelo sólido (*SGC*) de Cubital y la fabricación de objetos laminados (*LOM*) de Helisys. La tecnología *FDM* se basa en la extrusión de materiales termoplásticos en forma de filamento para producir piezas capa por capa. Por otra parte, el sistema curado de suelos sólidos (*SGC*) es una tecnología de fabricación aditiva basada en fotopolímeros en la que la producción de la geometría de la capa se lleva a cabo mediante una lámpara UV. Este sistema fue desarrollado y comercializado por Cubital Ltd. en 1986.. El último sistema fue el material laminado unido y cortado mediante *LOM*, que es una tecnología de adhesión de un papel específico mediante un láser guiado digitalmente.

La sinterización selectiva por láser (*SLS*) y el sistema de estereolitografía Soliform de Teijin Seiki estuvieron disponibles en 1992. Utilizando el calor de un láser, el sistema *SLS* fusiona materiales en polvo fundiendo las partículas que se unen de forma mecánica creando una pieza sólida.

En 1993, Soligen comercializó la fundición de producción directa de carcasa (*DSPC*). Usando un mecanismo de inyección de tinta, la tecnología *DSPC* deposita un aglutinante líquido sobre la cerámica en forma de polvo para formar cubiertas para su uso en el proceso de fundición a la cera perdida.

El año 1994 fue un año prolífico en el desarrollo de sistemas de fabricación aditiva nuevos. La tecnología ModelMaker de Solidscape empezó a estar disponible al igual que otros sistemas japoneses. Este sistema deposita materiales de cera utilizando un cabezal de impresión de inyección de tinta.

Uno de los nuevos sistemas japoneses era una pequeña máquina de estereolitografía de Meiko dirigida principalmente a los fabricantes de joyas.. Mientras tanto, Kira Corp. comercializó el primer sistema sin estereolitografía de Japón, llamado *Solid Center*, éste utiliza un motor de impresora láser estándar, tóner y un trazador x-y así como también una cuchilla para producir modelos similares a la madera mediante laminación de papel. Kira se refirió a *Solid Center* como la primera impresora 3D de papel normal.

A partir de 1996 comenzaron a ver la luz las impresoras 3D de bajo coste, como la máquina *Gensys*, la *ACTUA 2100* o la *Z402*, que utilizaban los métodos de extrusión y depositación de cera respectivamente.

En 1997 una empresa desarrolló un proceso llamado fabricación aditiva láser (*LAM*) que empleaba un láser de alta potencia y aleaciones de titanio en polvo

En el siglo XXI empieza a realizarse un desarrollo de nuevas tecnologías, entre ellas una impresora de inyección de tinta 3D que deposita y endurece fotopolímeros utilizando 1536 boquillas y una fuente de luz ultravioleta. También se desarrolla una máquina diseñada para producir patrones de cera de precisión. Precision Optical Manufacturing (POM) anuncia otro método de fabricación aditiva: la deposición directa de metal (DMD), que es un proceso de revestimiento por láser que produce y repara piezas usando polvo de metal.

En 2001, Solidimension de Israel introdujo su máquina de escritorio, una tecnología que lamina hojas delgadas de plástico PVC. Ese mismo año Envisiontec de Alemania mostró su máquina Perfactory en la que la tecnología utilizaba un fotopolímero de acrilato y tecnología de procesamiento de luz digital (DLP) para endurecer una capa completa a la vez.

Poco después, Menix, Co., vendió sus primeras máquinas de laminación variable VLM 300 en 2002. Su sistema utiliza un cortador de alambre caliente de 4 ejes para cortar láminas de poliestireno de alta densidad en un ángulo concreto para minimizar los escalones.

Durante los siguientes años, hasta 2007 todo tipo de comerciantes de todo el mundo, entre ellos: 3D Systems, Aspect Inc. of Japan, Voxeljet Technology, Trumpf, fueron desarrollando nuevos productos y perfeccionando las técnicas ya conocidas. Se desarrollaron ciertas impresoras que combinaban más de una tecnología y aumentaba el rendimiento de impresión. Durante todo este tiempo los fabricantes también se iban especializando en diferentes ámbitos como el médico, dental, prototipos, merchandising de videojuegos, etc...

En septiembre de 2008, Nuvotronics puso a disposición comercial su tecnología de microfabricación PolyStrata para dispositivos electrónicos y sensores muy pequeños. También en 2008, la empresa suiza Huntsman Advanced Materials anunció el desarrollo de un proceso de fabricación aditivo completamente nuevo basado en la tecnología *MLS (Micro LightSwitch)*. Esta tecnología utiliza 40.000 obturadores microscópicos y un enfoque puntual para dirigir la luz ultravioleta a la superficie del fotopolímero.

A partir de 2011, varias industrias habían adoptado la fabricación aditiva como método principal de fabricación. Los fabricantes de audífonos internos pronto adoptaron la tecnología AM para producir carcasas personalizadas en toda la industria. La industria dental comenzó también a experimentar un aumento similar en el uso de sistemas de fabricación aditiva. Sin embargo, el mercado dental ha logrado una expansión mucho más grande que el mercado de audífonos.

Los avances inmediatos en el uso de metales despertaron un gran interés y generaron un gran desarrollo de las tecnologías. Se cree que la posibilidad de que los nuevos diseños, junto con propiedades mecánicas similares a las combinaciones modernas con

las que los diseñadores están acostumbrados, podría acelerar la adopción de la fabricación aditiva hecha mediante metal a un ritmo mucho más rápido que la AM basada en polímeros. [<https://www.wohlersassociates.com/history2016.pdf>].

## 2.2. Tipos fabricación aditiva más relevantes

En la actualidad existen multitud de métodos para la fabricación aditiva, se diferencian en cómo se mantienen las capas para crear las piezas, en la regla de trabajo y en los materiales que se pueden utilizar. Las principales consideraciones al elegir una máquina suelen ser su velocidad, el coste de la impresión, el coste y la variedad de materiales y sus capacidades de color. Se determinan por la nomenclatura estándar de ISO/ASTM 52900.

### 2.2.1. Extrusión de material

La extrusión de material (ME) se basa en la tecnología que utiliza un material en forma de semi-líquido que se dispensa selectivamente a través de un nodo u orificio. Para crear la geometría deseada puede moverse indistintamente tanto el nodo como la plataforma de deposición en el eje x-y. Normalmente, el material virgen se trata de un filamento termoplástico que se calienta al ser extruido por el nodo.

Como contraprestación de este método, se necesitan estructuras de soporte para las zonas sobresalientes, que se quitan al finalizar la impresión.

La tecnología ME representa la mayor parte de instalaciones de máquinas de AM. Se introdujo en 1991.

#### 2.2.1.1. FDM

La tecnología FDM utiliza un cabezal móvil que sitúa un hilo de material termoplástico fundido sobre un sustrato. El material se calienta incluso 1°C por encima de su punto de fusión para que solidifique rápidamente tras la extrusión y después se fusione con las capas anteriores. Los cabezales del método FDM suelen ser dos boquillas casco, una para el material de la obra y otra para el material de apoyo.

La fácil operabilidad FDM, los equipos generalmente modestos y los materiales sin refinar lo hacen ideal para su uso por parte de profesionales así como para crear piezas de plástico a un costo mínimo. De todos modos, la precisión y la calidad de la superficie es relativamente deficiente en comparación con los procesos AM de resina en polvo.

En este proceso, la resolución de la pieza se ajusta según el tamaño de la boquilla del extrusor y los vacíos que se forman entre las filas circulares a medida que la boquilla los almacena. Como resultado, es posible que los tejidos no se integren por completo. Además, los niveles a menudo son claramente visibles en la superficie ya que el sistema no puede reproducir los detalles complejos que otras tecnologías pueden proporcionar.

### 2.2.2 . Binder Jetting

El proceso Binder Jetting utiliza al menos una boquilla fina para "rociar", de manera controlada, material fundido o, en general, un aglutinante para unir el polvo en un objeto sólido. Una vez depositado el adhesivo, se aplica calor externo hasta cierto valor sobre toda el área de la superficie de la capa impresa para asegurar la unión y garantizar una resistencia mecánica satisfactoria para los pasos de impresión siguientes. El principio de funcionamiento de este proceso es muy similar al de todos los procesos de fusión por láser, aunque no se produce cambio de fase; sin embargo, el aglutinante mantiene unidas las partículas de polvo. Esta interacción se repite para cada capa hasta obtener una parte impresa, denominada "cuerpo verde". Estos cuerpos verdes tienen una resistencia limitada y requieren una manipulación adicional, como puede ser la sinterización y, alternativamente, una segunda penetración de metal para lograr el rendimiento mecánico deseado.

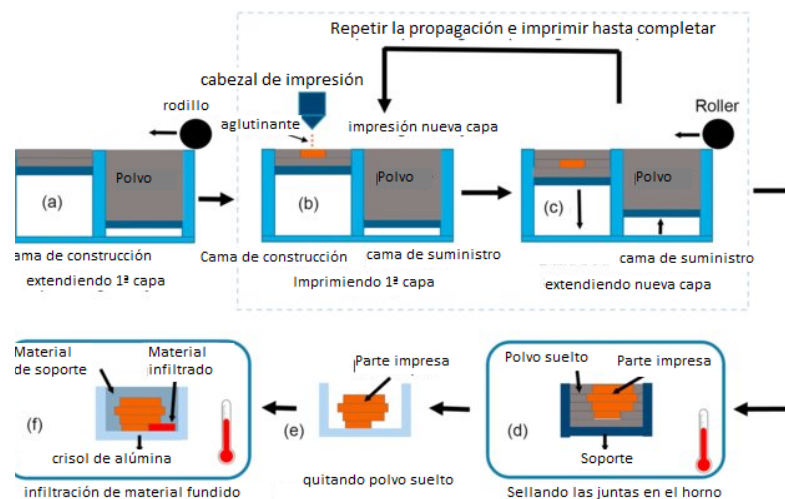


Fig. 1. Diagrama esquemático del proceso Binder Jetting (Rojas Arciniegas, A. J. (s. f.).).

### 2.2.3 . Material Jetting

De acuerdo con las normas ASTM, la inyección de material es un proceso de impresión 3D en el que se deposita selectivamente gota a gota el material de construcción. En el chorro de material, un cabezal de impresión dispensa gotas de un material fotosensible que se solidifica, construyendo una pieza capa a capa bajo luz ultravioleta (UV). Al mismo tiempo, el chorro de material crea piezas con un acabado superficial muy suave (liso) y una gran precisión dimensional. La impresión de múltiples materiales y una amplia gama de materiales como polímeros, cerámica, compuestos, biológicos e híbridos están disponibles en material jetting.



#### 2.2.4. Laminación de capas

La laminación de capas (Sheet lamination) es un proceso en el cual láminas de material se unen para crear un solo objeto. Los materiales pueden ser: papel con superficie adhesiva y cintas o papeles de metal.

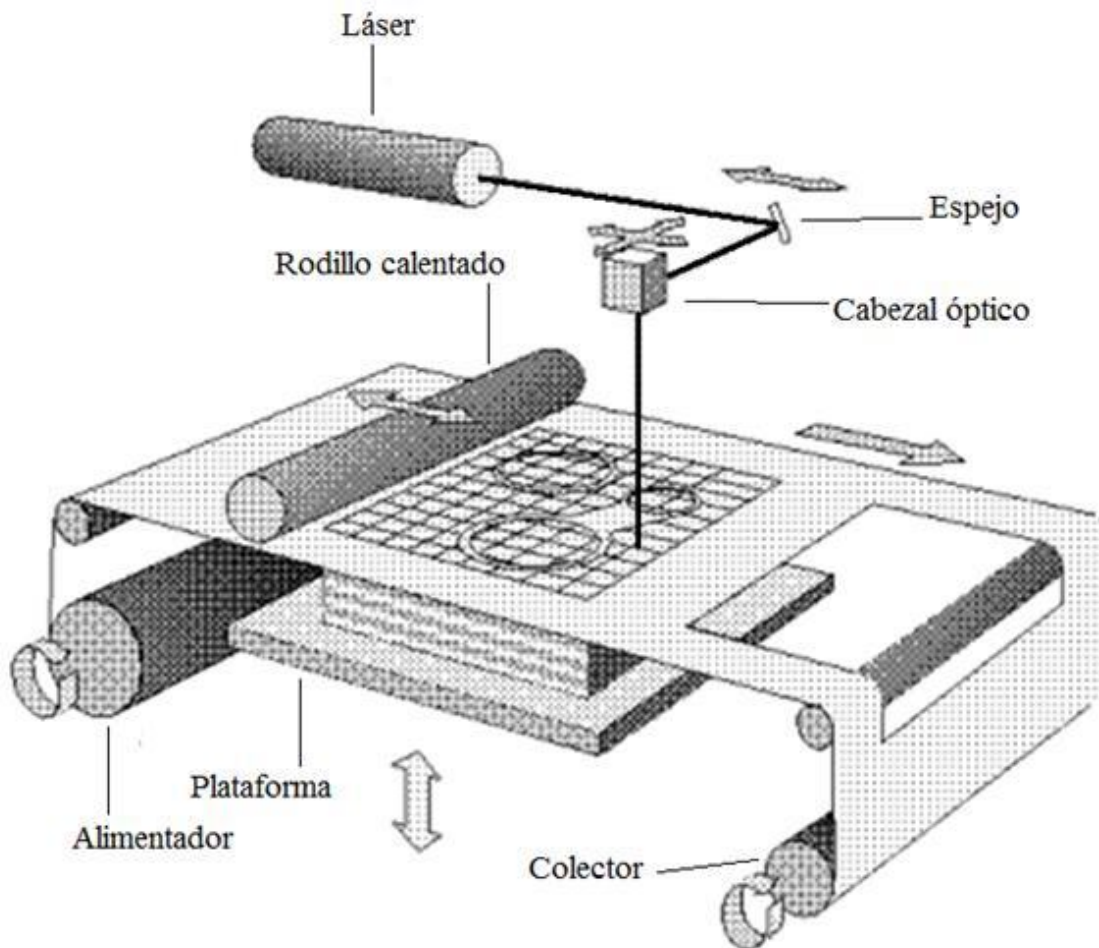


Fig.2. Esquema de funcionamiento (FABRICACIÓN POR CORTE Y LAMINADO. LOM., 2012)

Existen múltiples formas de unir los materiales: Procesos de unión y posterior mecanizado, procesos de mecanizado y posterior vinculación, unión térmica, procesos basados en sujeción de chapa y consolidación ultrasónica.

#### 2.2.5. Vat Photopolymerization

La fabricación aditiva mediante fotopolimerización de líquido en una cuba se denomina Estereolitografía (Stereolithography, SLA). Los procesos de fotopolimerización utilizan resinas líquidas curables por radiación, o fotopolímeros como materiales primarios. La mayoría de los fotopolímeros aceptan radiación en el rango de longitud de onda ultravioleta (UV) pero algunos también usan luz visible. Tras la irradiación, estos materiales experimentan reacciones químicas para transformarse en sólidos. Esta reacción se llama fotopolimerización y, a menudo, es compleja e involucra muchos químicos.

Al igual que con el método de base líquida, no hay soporte estructural durante el proceso de construcción. En este caso, a menudo será necesario agregar un aparato ortopédico para obtener la estructura deseada.

### 2.2.6. Deposición de energía dirigida (DED)

Es un proceso que se utiliza mayoritariamente para complementar otros objetos ya fabricados, ya sea para añadirles material o para repararlos. Utiliza un foco de energía (láser o haz de electrones) para fundir el material y depositarlo sobre una base, que puede ser un componente a reparar o un apoyo.

Este proceso utiliza el metal como material de adición. Éste es alimentado en forma de hilo o de polvo.

Para los sistemas que utilizan láser, se debe utilizar una cámara inerte si se utilizan metales reactivos. Por el contrario, en los sistemas de haces de electrones el proceso se realiza en el vacío ya que si no los electrones pueden interactuar entre sí.

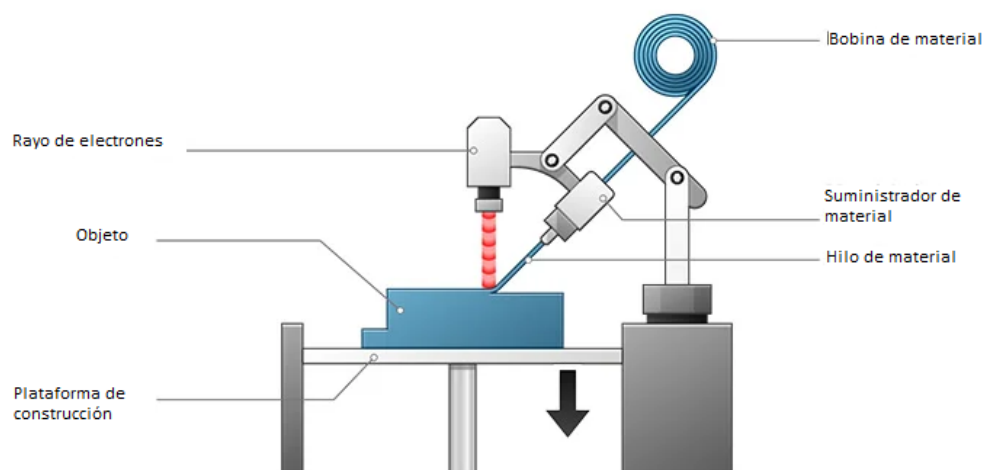


Fig. 3. Esquema de fabricación aditiva DED (C.,L., 2022)

### 2.2.7. Fusión por lecho de polvo

Es un proceso de impresión aditiva muy preciso. De manera semejante al proceso DED, utiliza una fuente de energía que fusiona partículas de polvo seleccionadas para crear geometrías muy complejas. Cuando se detecta el espesor establecido, la cámara se desplaza hacia abajo y el pistón de energía hacia arriba hasta conseguir el espesor de capa establecido. El rodillo vuelve a depositar partículas de polvo encima de la última capa fusionada para poder repetir el proceso hasta dar con la geometría deseada.

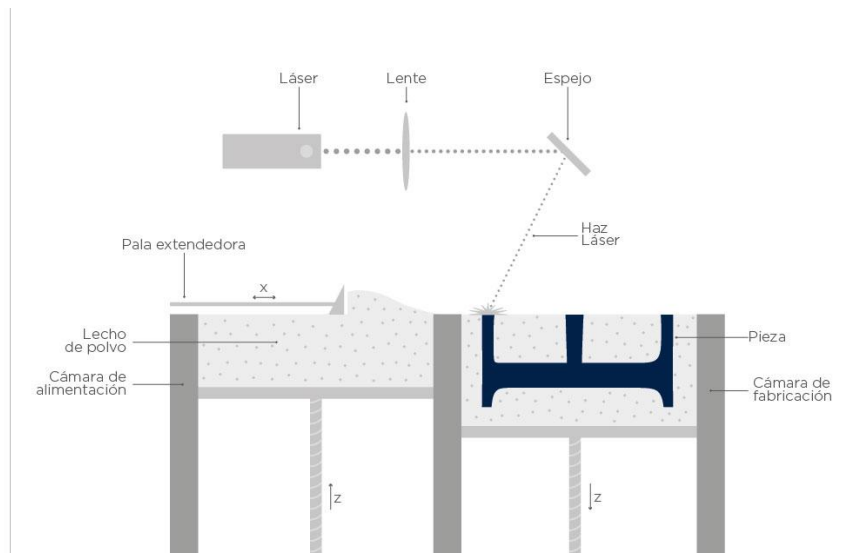
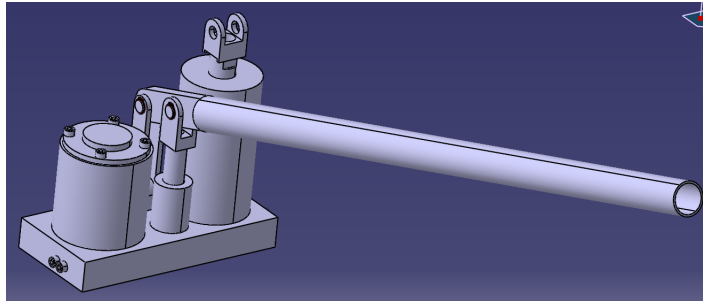


Fig.4. Esquema del proceso de fusión por lecho de polvo. (SINTERIZADO LÁSER SELECTIVO SLS, 2018)

### 3. Diseño del Dispositivo hidráulico

En este apartado se detalla la geometría diseñada a través del programa Catia V5.

Esta geometría muestra un dispositivo hidráulico cuyo objetivo es levantar un peso concreto.



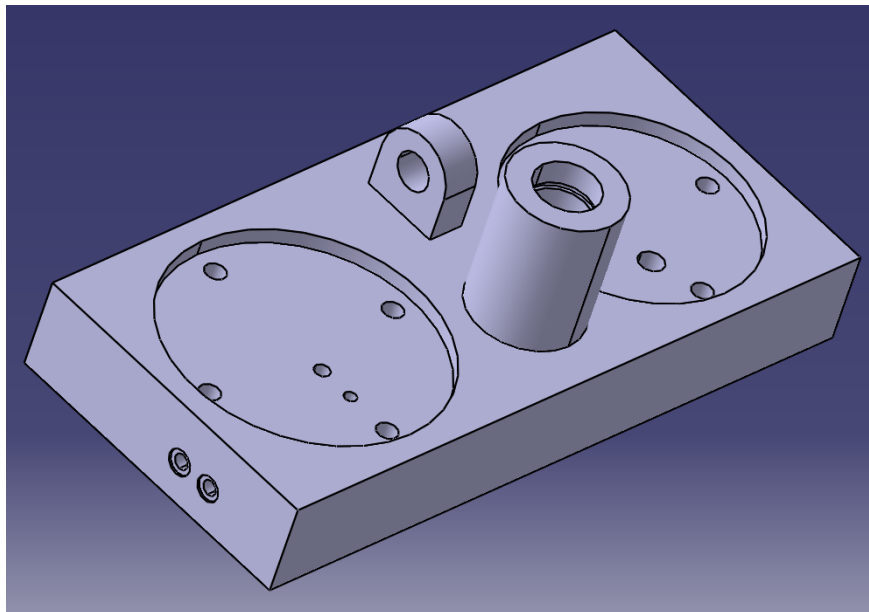
*Fig. 5. Dibujo CAD dispositivo hidráulico*

#### 3.1. Componentes del dispositivo

El dispositivo que se ha diseñado consta de varias partes. A continuación se detallan los componentes y la función de cada uno de ellos:

##### 3.1.1. Bomba

La bomba es un bloque macizo que consta de una base perforada y dos piezas soldadas, una actúa de bombín y otra que hace de sujeción para horquillas de la palanca.



*Fig. 6. Bomba del dispositivo hidráulico*

La base agujereada está formada por:

1. Entrada de aceite desde el tanque de almacenamiento y el orificio de distribución hacia las válvulas.
2. Entrada de aceite al bombín.
3. Válvula que bloquea la entrada de aceite al bombín
4. Entrada de aceite al pistón
5. Válvula que bloquea la entrada de aceite al cilindro del pistón
6. Orificio de retorno de aceite al tanque
7. Orificio de presión de circuito

Las medidas son las siguientes:

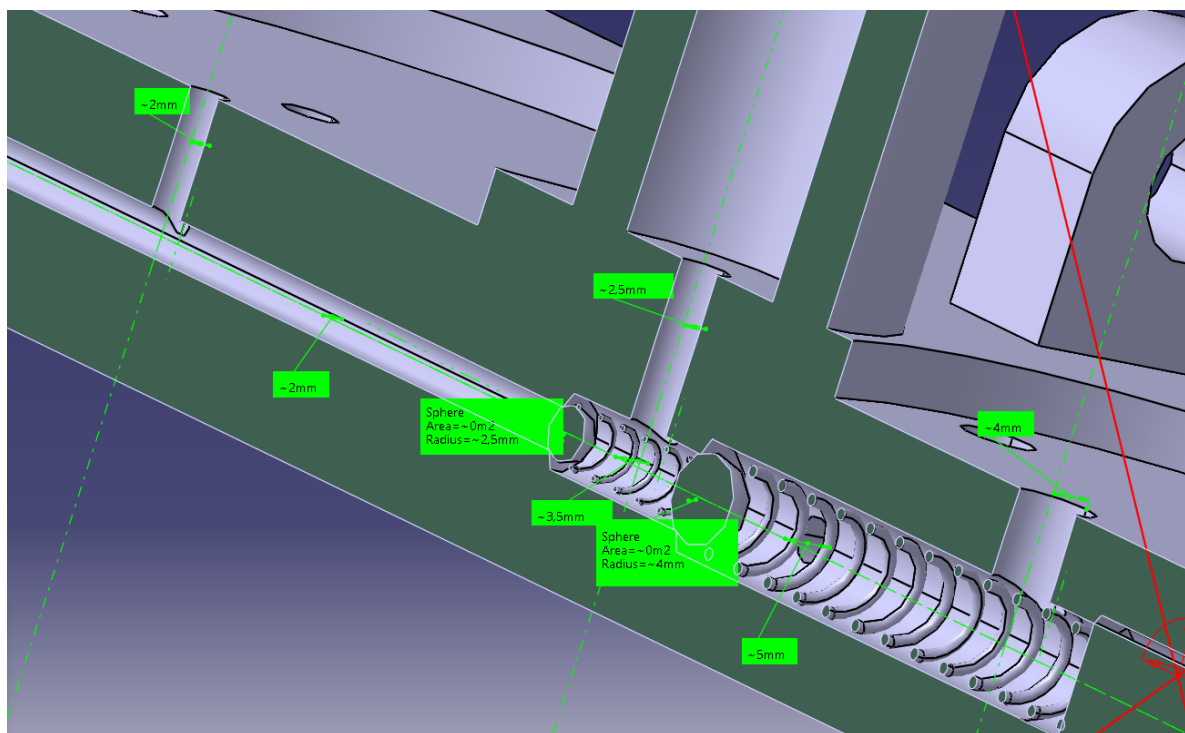


Fig. 7. Medidas interiores de la bomba

### 3.1.2. Pistón

El conjunto pistón está formado por el cilindro de llenado de aceite y el cilindro propiamente dicho, que sería la parte móvil del conjunto.

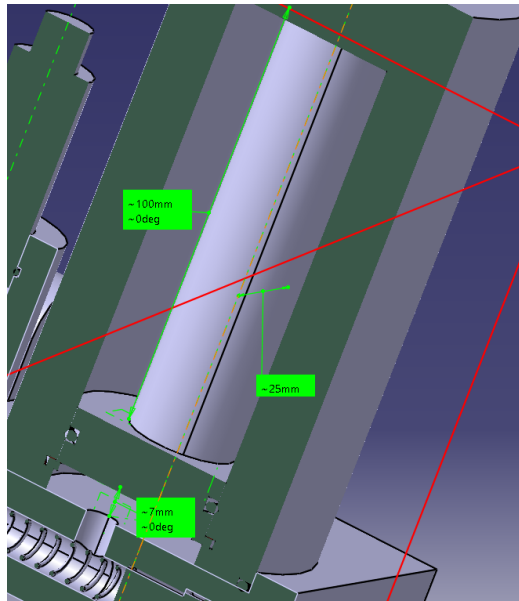


Fig. 8 Dibujo CAD del conjunto pistón con medidas

### 3.1.3. Bombín

El conjunto bombín está formado por las partes soldadas a la base de la bomba, es decir, el cilindro del pistón y la sujeción de las horquillas así como por la palanca móvil que acciona el cilindro interior de movimiento. La palanca está sujeta al conjunto dispositivo hidráulico mediante las horquillas, que también limitan su movimiento.

La palanca tiene un movimiento vertical de 200 mm partiendo de la posición inicial hacia arriba y el mismo movimiento desde la situación original hacia abajo.

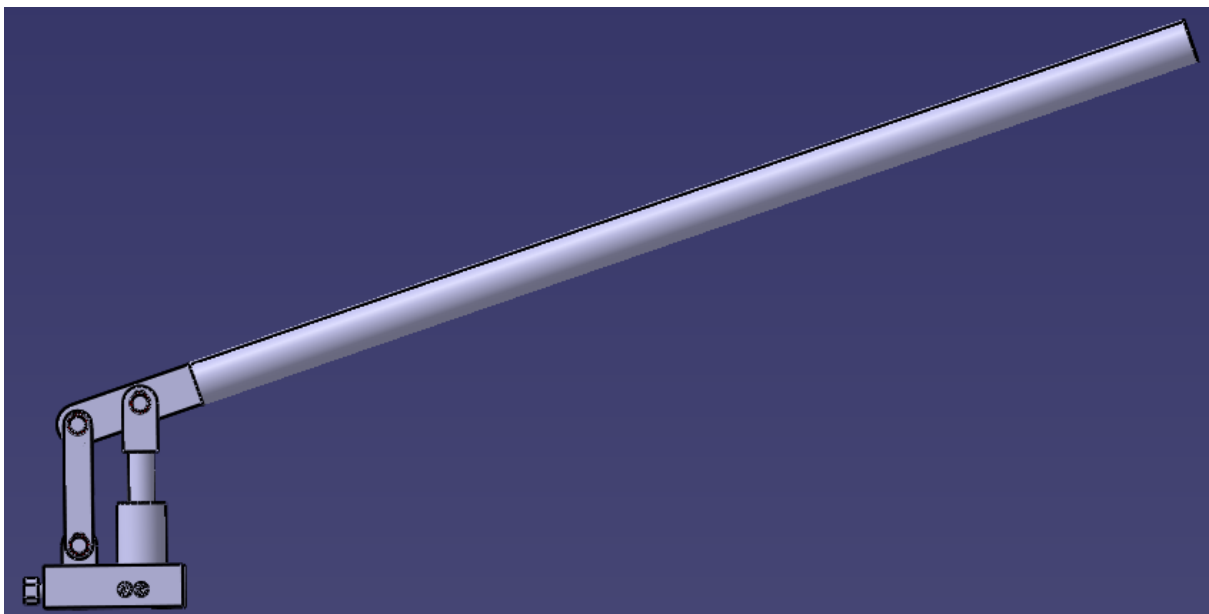
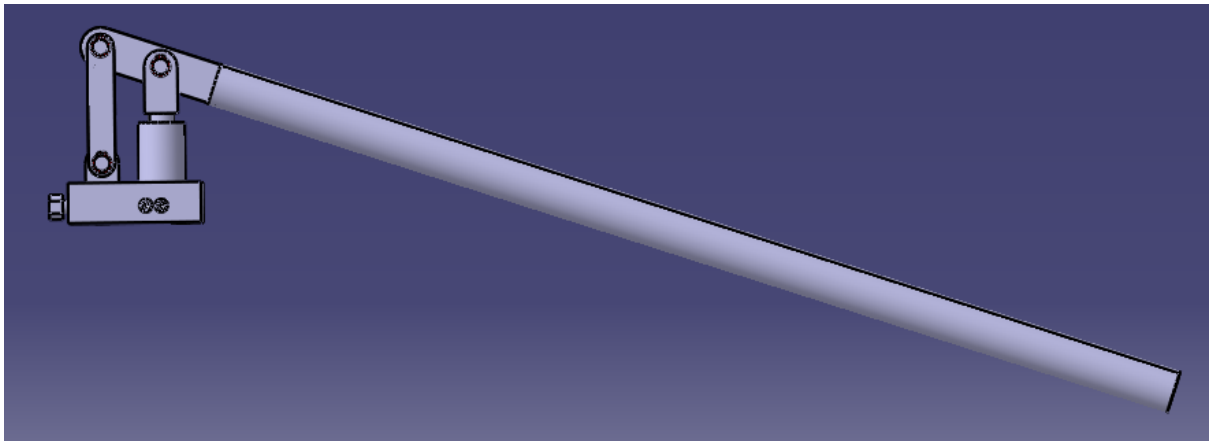
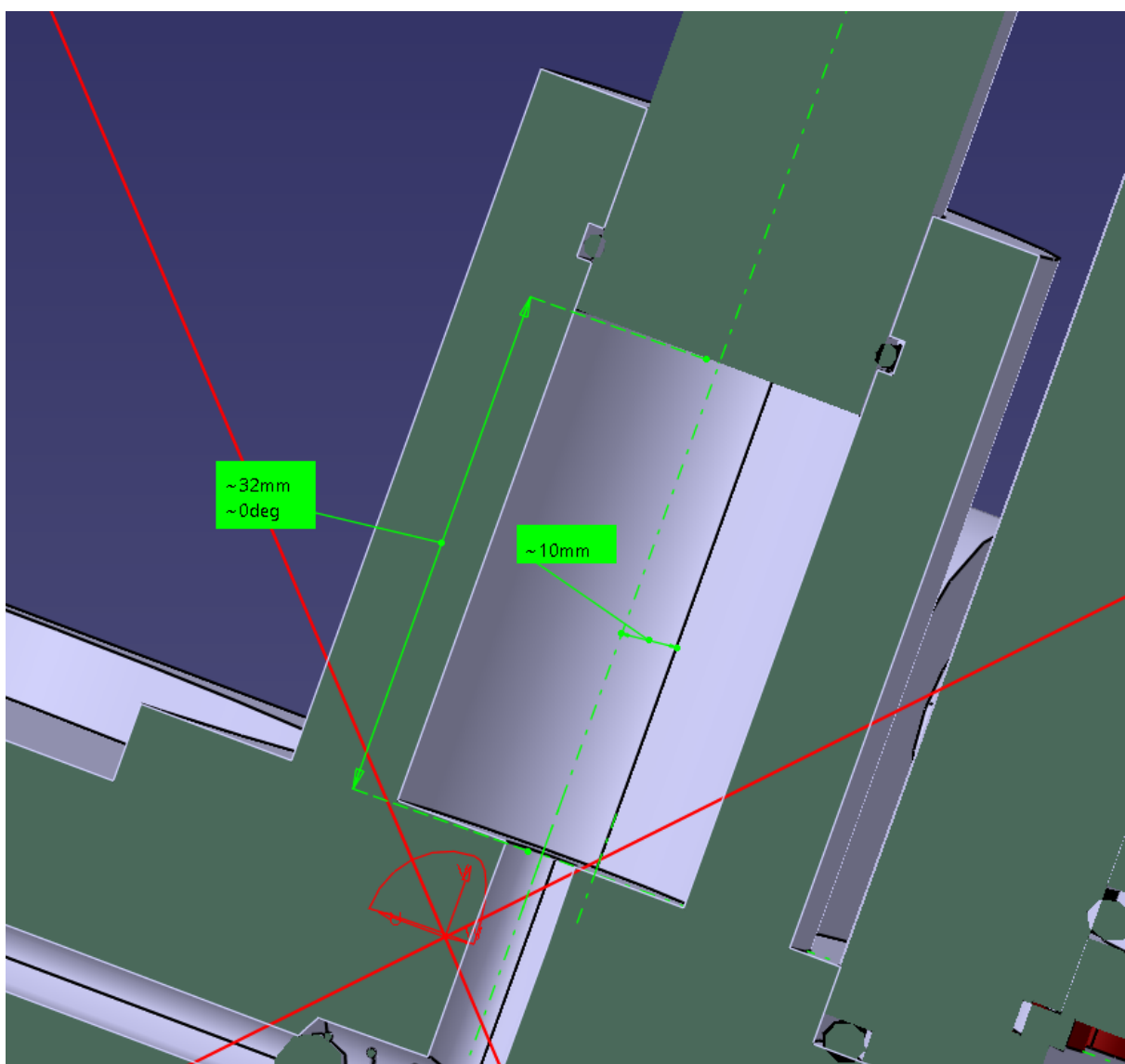


Fig. 9. Conjunto pistón en apertura máxima de la palanca



*Fig. 10. Conjunto pistón en apertura mínima de la palanca*



*Fig. 11. Dibujo CAD del conjunto bombín con medidas*

3.2. Planos del diseño de la geometría

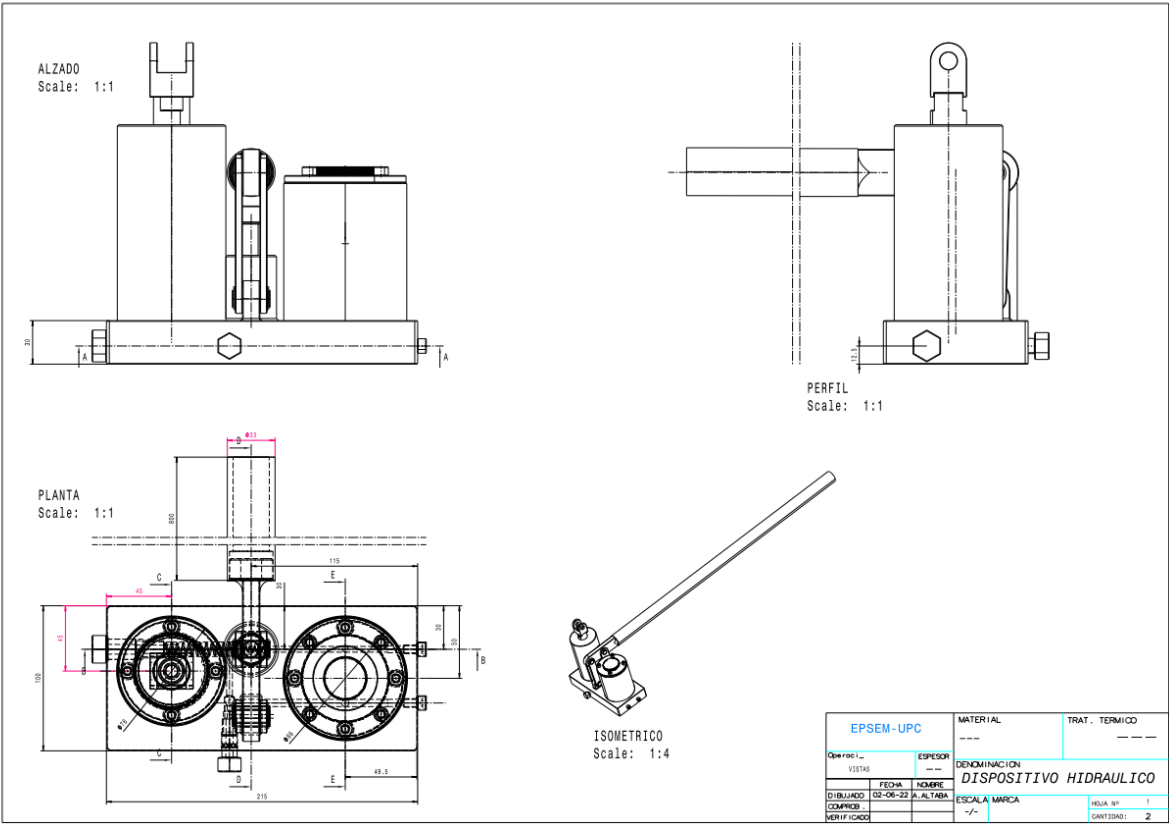


Fig. 12. Plano del “product” del dispositivo hidráulico



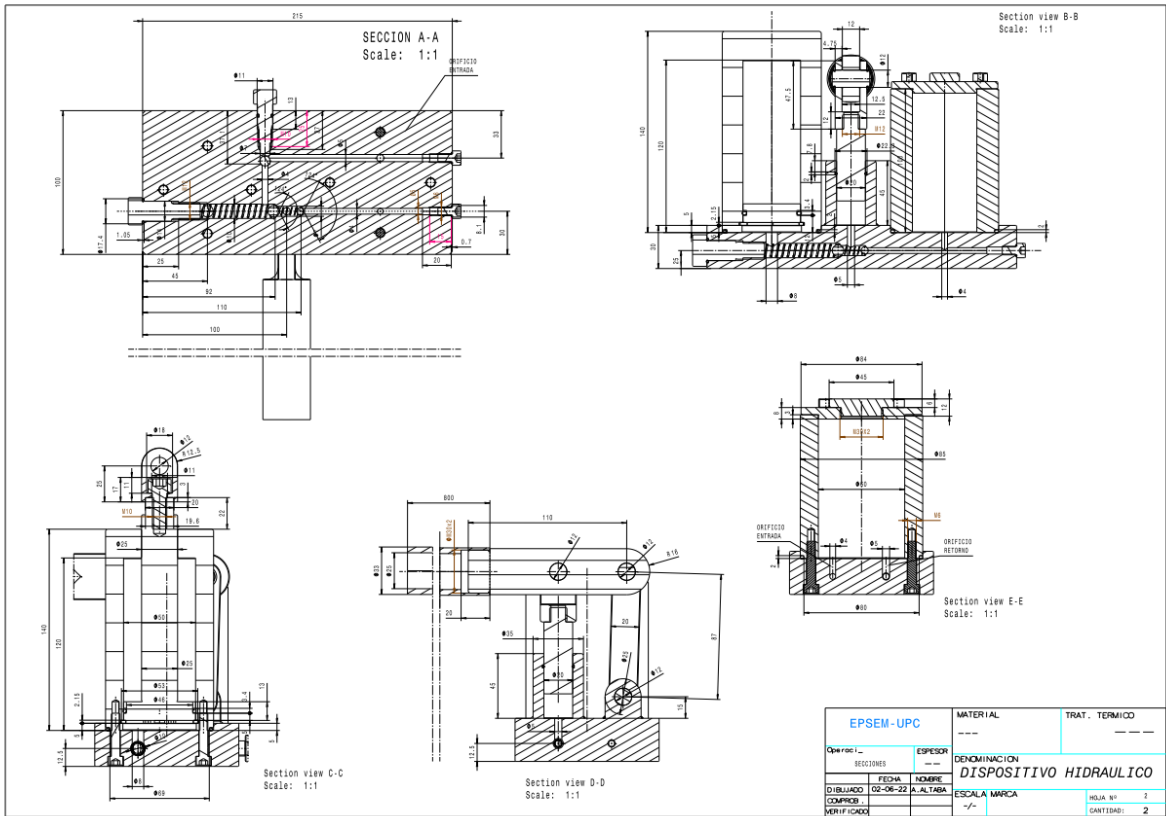


Fig. 13. Plano de diferentes secciones del dispositivo hidráulico

LISTA DE MATERIALES				
Realizado	A. ALTABA	DENOMINACIÓN CONJUNTO		DISPOSITIVO HIDRAULICO
Fecha	02.06. 2022			
Cant.	Denominación	Material	Dimensiones Netas	Código Cliente
		Tratamiento	Fabricante/Proveedor	Nº Norma/Referencia
CONJUNTO SOLDADO	PLACA BOMBA	F-112	215X100X30	
	BOMBIN	F-112	Ø35X45	
	SUJECCIÓN HORQUILLAS	F-112	12X25X27,5	
	BOLA Ø5	F-114	NORELEM	
	MUELLE Ø6	F-143	Ø6x05x15	
			NORELEM	
	BOLA Ø8	F-114	NORELEM	
	MUELLE Ø9	F-143	Ø9x1x50	
			NORELEM	
	BOLA Ø6	F-114	NORELEM	
	TORNILLO DE PRESIÓN	F-114	Ø19X46	
	JUNTA Ø8,5	NBR	Ø8,5X1,5	
			EPIDOR	
	JUNTA Ø19,5X1,5	NBR	Ø19,5X1,5	
			EPIDOR	
	TAPÓN LIMITADOR	F-112	Ø22X50	
	JUNTA Ø14,5X1,5	NBR	Ø14,5X1,5	
			EPIDOR	
2	TORNILLO		M6X10	DIN 912
	TORNILLO		M6X30	DIN 912
2	JUNTA Ø14,5X1,5	NBR	Ø14,5X1,5	
			EPIDOR	
	CARCASA CILINDRO	F-114	Ø75X140	
	EMBOLO CILINDRO	F-155	Ø50x155	
		Cementado HRc: 52 sup.		
	CABEZA EMBOLO	F-114	30X25X37,5	
	JUNTA Ø47,5X2,5	NBR	Ø47,5X2,5	
			EPIDOR	
	ANILLO CIRCLIP	D50	NORELEM	DIN 472
	JUNTA Ø69X2,5	NBR	Ø69X2,5	
			EPIDOR	
	TORNILLO		M10X25	DIN 912
	TANQUE	F-114	Ø85x100	
	JUNTA Ø80X2,5	NBR	Ø80X2,5	
			EPIDOR	
	TAPA TANQUE	F-114	Ø84x8	
	TAPÓN TANQUE	F-114	Ø45X12	
4	TORNILLO		M6X30	DIN 912
	BRAZO HORQUILLA	F-114	107X20X5	
	CABEZA BRAZO PALANCA	F-114	Ø34X126	
	BARRA BRAZO PALANCA	F-114	Ø33XØ25X800	DUCAL Ø33XØ25X800
			SCHRODER	
3	EJE CIRCLIP	F-114	Ø12X26	
	ANILLO CIRCLIP	D12	NORELEM	DIN 471
	PISTÓN BOMBIN	F-155	Ø20x60	
		Cementado HRc: 52 sup.		
	CABEZA BOMBÍN	F-114	25X22X47,5	

Fig. 14. Lista de materiales del dispositivo hidráulico

### 3.3. Funcionamiento del dispositivo

#### 3.3.1. Accionamiento

El funcionamiento del dispositivo hidráulico es enteramente mecánico. Resulta imprescindible que el circuito se encuentre vacío por completo y el tanque de aceite lleno. La palanca debe estar situada en su posición más baja para que el cilindro del bombín esté completamente libre de aceite.

Si el sistema hidráulico se encuentra en esta posición, el aceite proveniente del tanque no podrá pasar hacia el bombín debido a que la primera válvula bloquea la entrada, que se encuentra sujeta en ese punto gracias al resorte 1.

Para lograr que el pistón haga un movimiento vertical, que es el objetivo, hace falta accionar el dispositivo subiendo la palanca hasta su máximo movimiento, de esta manera se creará el vacío dentro del circuito. La primera válvula (de 5mm de diámetro), retrocederá a causa de la diferencia de presión, cosa que permitirá la entrada de aceite al bombín. Una vez la palanca esté en su máximo punto de altura, el bombín estará completamente lleno. Entonces se deberá aplicar una fuerza en la palanca hacia abajo, esto provocará una presión que empujará la válvula 1 hasta su posición inicial y creará, una vez bloqueada ésta, una presión que empujará la válvula 2 hacia el lado contrario a la fuerza del resorte 2. De esta manera se permite la entrada al interior del cilindro del pistón. Cuando se vacía el bombín completamente, la válvula 2 retorna a su posición inicial, bloqueando de nuevo la entrada de aceite del bombín al pistón.

Para conseguir el movimiento deseado, se deberá repetir el movimiento descrito anteriormente las veces que sea necesario. Los cálculos de accionamiento se detallan posteriormente en el trabajo.

#### 3.3.2. Vaciado del circuito

Para lograr que el pistón vuelva a su posición inicial y, por tanto, hacer descender el objeto previamente elevado, se debe desenroscar el tornillo ubicado en la parte posterior de la bomba. La función de este tornillo es sujetar la válvula que bloquea el paso del aceite por el conducto de retorno. Al quedar la válvula desbloqueada, el aceite que se encuentra dentro del cilindro del pistón es empujado por la fuerza de la gravedad desde la parte móvil del pistón hacia el conducto de retorno al tanque.

Un punto a tener en cuenta es que, al haber colocado la válvula 2, el aceite no puede acceder de nuevo al conducto del bombín.

Tras volver a colocar el tornillo en su posición y poniendo la palanca en su punto más bajo, se fija la válvula 3 en su posición de bloqueo de aceite. El circuito contiene en su interior el aceite restante que se encuentra en los conductos de acceso, tanto al bombín como al cilindro del pistón.

### 3.3.3. Esquema de funcionamiento

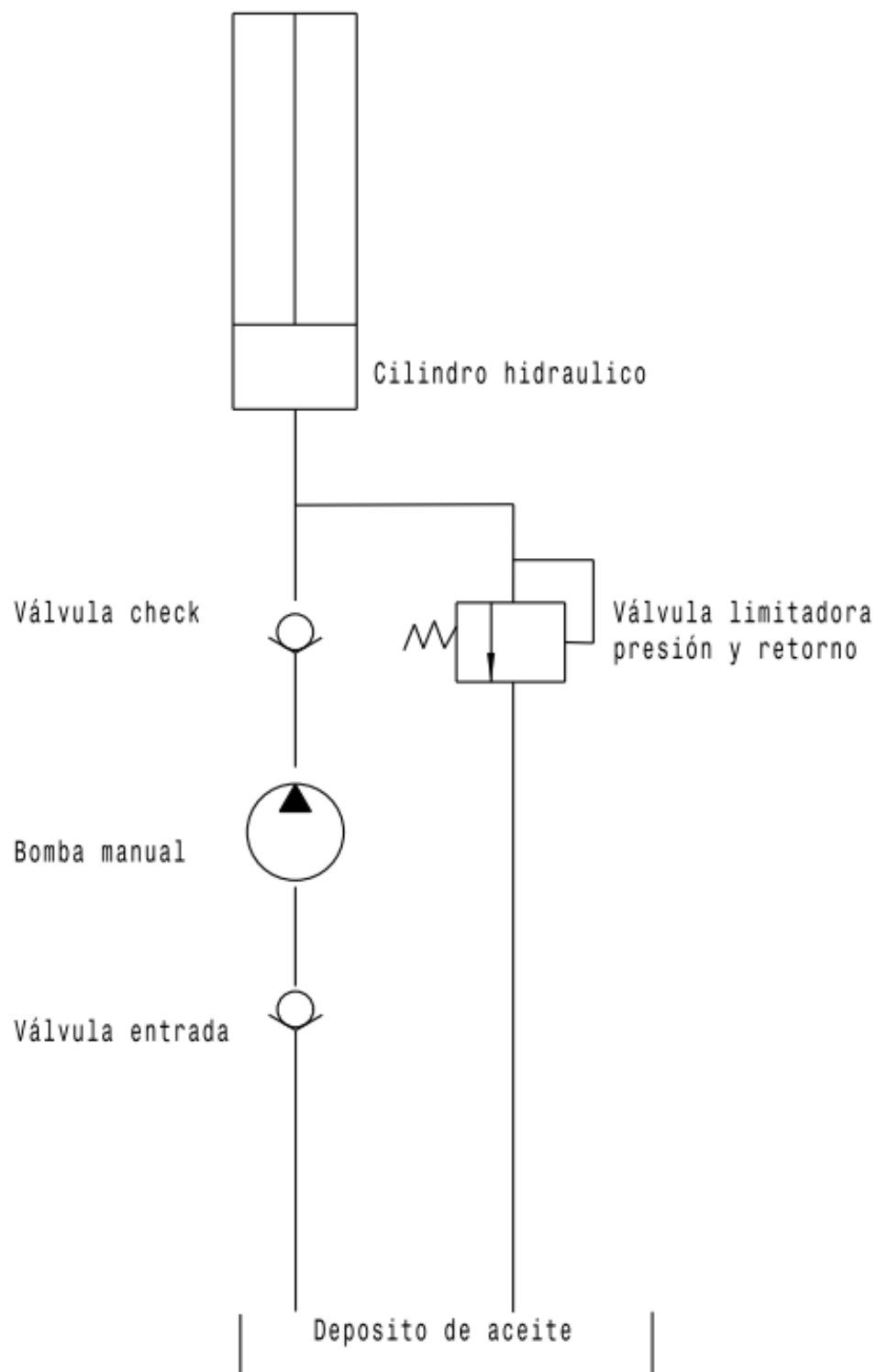


Fig.15. Circuito hidráulico

## 3.4. Especificaciones del dispositivo

### 3.4.1. Elevación de objetos

Según las medidas seleccionadas al diseñar el dispositivo hidráulico se consiguen unas especificaciones en concreto que definen el comportamiento de éste.

En referencia al bombín y teniendo en cuenta que la superficie del bombín ( $A_b$ ) se calcula:

$$A_b = \pi * r^2 = 314.15 \text{ mm}^2$$

Conociendo que el recorrido máximo del bombín es de 30 mm. resulta que cada vez que se acciona la palanca entra dentro del cilindro este volumen ( $V_b$ ) de aceite:

$$V_b = A_b * h = 9.42 * 10^3 \text{ mm}^3 = 0.00942 \text{ l}$$

Para calcular los milímetros de altura que se eleva el cilindro del pistón en cada movimiento de la palanca, debemos dividir el volumen que entra por la superficie del cilindro.

$$A_p = \pi * r^2 = 1963.5 \text{ mm}^2$$

$$h_p = V_b / A_p = 4.80 \text{ mm}$$

Por tanto, obtenemos que la altura que aumenta con cada movimiento de palanca (cada "llenado" del bombín) es de 4.80 mm.

En caso de necesitar elevar un objeto 100 mm, suponiendo que el circuito contiene el aceite restante del vaciado anterior, deberemos llenar el cilindro del pistón un total de:

$$100 / 4.80 = 20.83 \sim 21$$

Deberemos accionar la palanca 21 veces.

### 3.4.2. Fuerza requerida

Para calcular la fuerza necesaria a aplicar en la palanca para levantar cierto peso, nos basaremos en el teorema de Pascal de fluidos y en la conservación del momento angular.

Siguiendo el teorema de Pascal de fluidos: "La presión ejercida sobre un fluido poco compresible y en equilibrio dentro de un recipiente de paredes indeformables se transmite con igual intensidad en todas las direcciones y en todos los puntos del fluido." (*Principio de Pascal*, 2014). Es decir:

$$P_1 = P_2$$

O bien:

$$F_1/A_1 = F_2/A_2$$

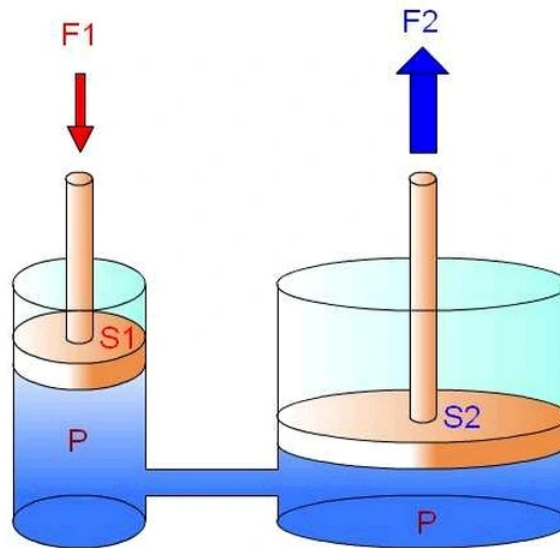


Fig. 16. Principio de Pascal

Con tal de simplificar los cálculos, se supone que se quiere levantar una masa de 1000 kg. Por tanto, dado que la fuerza es igual a masa por aceleración y redondeando la gravedad a  $10\text{m/s}^2$ . En este caso:

$$F_1 = m * g = 10000\text{N}$$

La superficie del pistón del cilindro es:

$$A_1 = \pi * r^2 = 1963.5\text{ mm}^2$$

Por lo que la fuerza que se debe aplicar al bombín es igual a:

$$F_2 = \frac{F_1 * A_2}{A_1}$$

Donde  $A_2$ :

$$A_2 = \pi * r^2 = 314.16\text{ mm}^2$$

Obtenemos:

$$F_2 = \frac{F_1 * A_2}{A_1} = 326.06\text{N}$$

Con estos datos, se puede concluir que la presión que se aplica al pistón es de:

$$P_1 = \frac{F_2}{A_2} = 1.038 \text{ kN/m}^2$$

Para calcular la fuerza necesaria a aplicar con la mano en el extremo de la palanca, utilizamos el teorema de conservación del momento angular nos dice que el momento de fuerza en el extremo de la barra y el momento en la sujeción del pistón del bombín es el mismo, por tanto encontramos:

$$M_e = M_s$$

$$F_e * d_e = F_s * d_s$$

Donde  $F_e$  = fuerza aplicada extremo barra y  $F_s$  = fuerza que se aplica al bombín

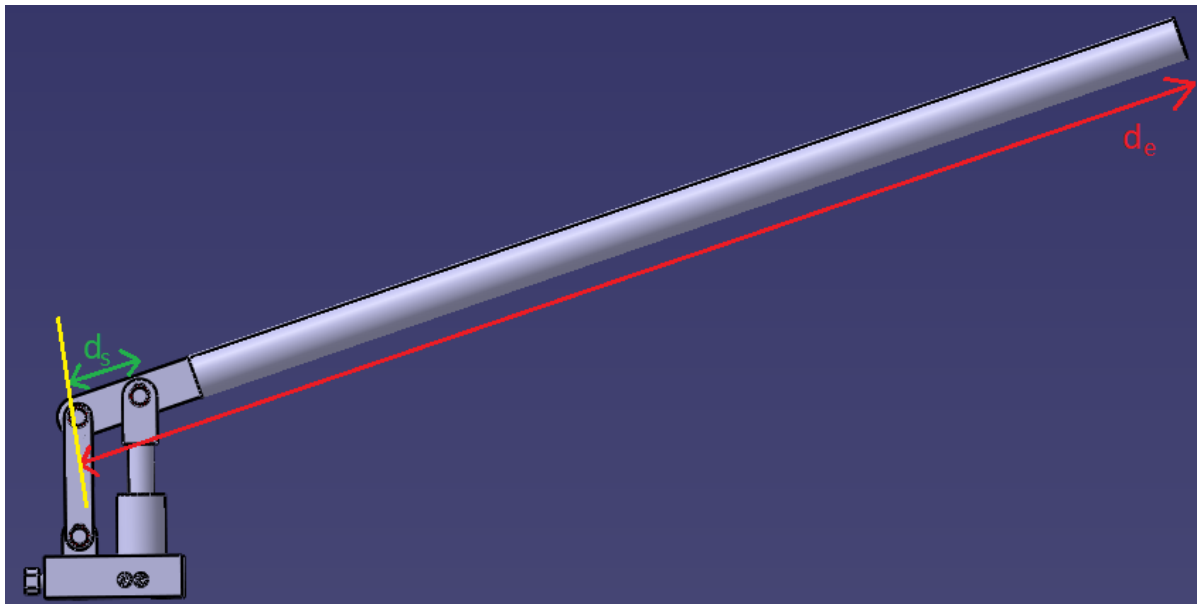


Fig. 17. Esquema de distancias de la palanca

La fuerza del bombín se aplica a una distancia  $d_s = 47,5$  mm del eje de las horquillas. Y la fuerza de la palanca a  $d_e = 800$  mm del mismo eje. Teniendo en cuenta que la distancia total palanca es de 847.5 mm y que se reduce el espacio de agarre de la mano (47.5mm) aplicando el teorema comentado, se obtiene:

$$F_e * 800 = 326.06 * 47.5$$

$$F_e = 19.36 \text{ N} = 1.93 \text{ Kg}$$

## 4. Simulación CFD de la válvula 1.

### 4.1. Geometría de la válvula

La geometría que se va a simular es la típica de una válvula de bloqueo de presión de líquidos.

Está compuesta por una cavidad por donde fluye un fluido, un esfera de bloqueo y un resorte cuya función es presionar la válvula contra la cavidad con tal de bloquear el fluido que pasa por esta.

Para la simulación se ha tenido en cuenta una válvula de diámetro 5mm. Se ha despreciado la propia masa de la válvula.

La cavidad que alberga la válvula tiene una entrada de flujo (inlet) de 4 mm y una salida (outlet) de 7 mm. Se trata de un cilindro multisección en el que se pasa de un diámetro a otro mediante un ángulo en concreto.

### 4.2. Material del fluido

Dado que se pretende simular un sistema hidráulico que trabaja mecánicamente, se ha simulado como fluido un aceite ISO-32.

Las ventajas de este aceite son:

- Elevada resistencia a la oxidación y el envejecimiento.
- Gran protección antioxidante y anti desgaste de los elementos lubricados.
- Excelente desemulsión y desaireación.
- Mínima formación de lodos y depósitos.
- Excelente filtrabilidad.
- Compatible con juntas y retenes habitualmente empleados.

*(Aceite hidráulico ISO 32 antidesgaste Maxifluid 32 HLP 5 litros, s. f.)*

Sus características físico-químicas son las siguientes:

---

CARACTERÍSTICAS	NORMA	VALOR
-----------------	-------	-------



Viscosidad a 100 °C (cSt)	AST M D-445	6,5-7,5
Índice de viscosidad, Mín	ASTM D-2270	100
Densidad a 15 °C, Típico (kg/l)	ASTM D-1298	0,870
Punto de congelación (°C)	ASTM D-97	<-20

Tabla 1. Características del aceite iso 32 HLP

### 4.3. Modelo CFD

El proceso de apertura de la válvula es un proceso de movimiento. Aún así para la simulación se ha tenido en cuenta un modelo estacionario a cierta distancia de la posición inicial de bloqueo. Dado que la estructura de la válvula es igual en todas las direcciones respecto al eje X, se ha simulado el plano transversal del flujo.

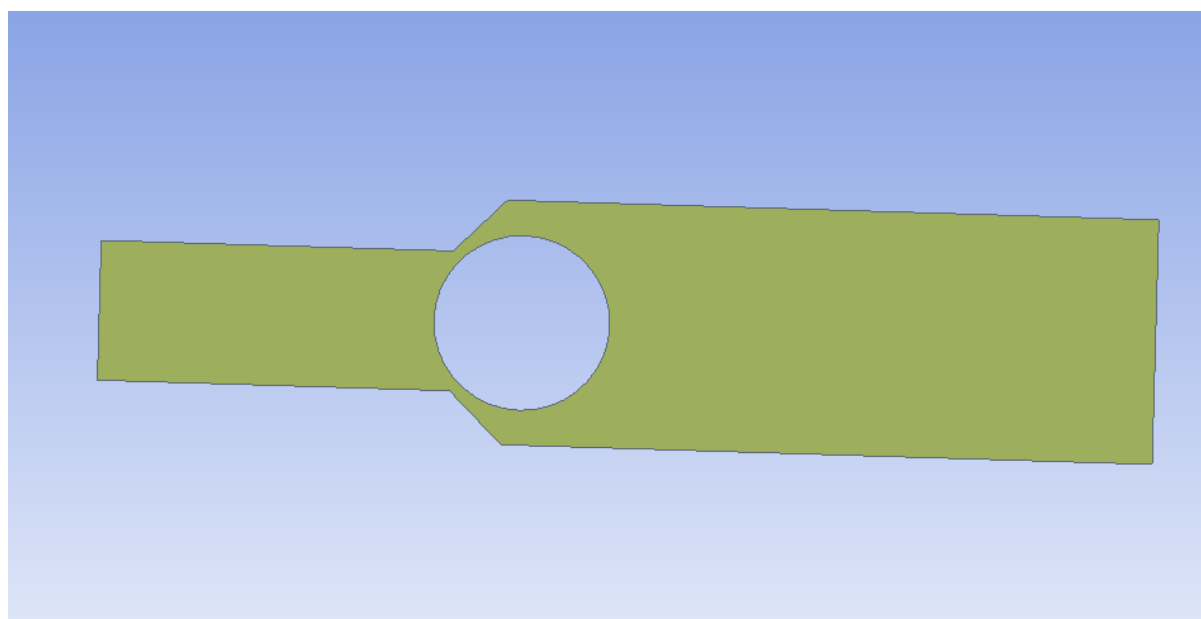


Fig. 18. Geometría para la simulación CFD.

El mallado que ha sido utilizado está formado por elementos de 0.1mm. Dado que para la simulación se ha utilizado el programa de Ansys Fluent en versión estudiante y éste tiene una limitación de elementos en la malla.

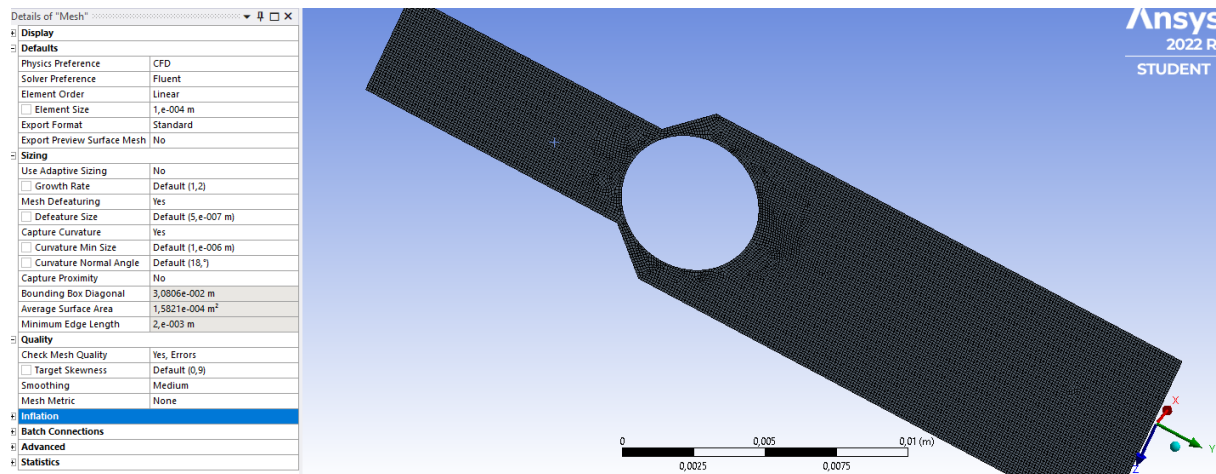


Fig. 19. Características del mallado para la simulación CFD.

Con tal de poder comparar los resultados con los medios que se disponen, se realiza un modelo numérico que adopta un flujo laminar.

En caso de haber querido simular un método más realista con movimiento, se debería haber definido un modelo turbulento, como el  $k-\varepsilon$ , ya es más consistente con estudios experimentales.

Para el movimiento de la válvula, primeramente se intentó aplicar una función de 6 "degrees of freedom" o 6DOF, en el que se permite visualizar el movimiento que tiene la válvula cuando se le aplica una presión. Esta función está definida como:

$$mx'' + cx' + kx = F_{fujo}$$

Dónde sabemos que la  $m$  es la masa de la válvula,  $c$  es el coeficiente de amortiguación y  $k$  es el coeficiente de rigidez del resorte. Sabiendo que  $x$  es la posición de la válvula, podemos definir  $x'$  e  $x''$  como velocidad y aceleración de la válvula respectivamente.

Finalmente, la aplicación del modelo UDF que impone el movimiento de 6DOF no ha sido aplicado por la dificultad que ha surgido al intentar realizar la simulación.

#### 4.4. Parámetros para los diferentes cálculos.

El estudio se basa en las características del flujo de aceite que pasa dentro de la cavidad de la válvula y cómo afecta que se modifique el ángulo que hay dentro de ésta y cómo afecta la rugosidad del material del que está hecha. En este trabajo se simulan 2 ángulos diferentes:  $30^\circ$ , y  $60^\circ$ . 2 posiciones diferentes: a 2 mm y a 5 mm. También se realiza una simulación 3D. Para visualizar mejor el ángulo a modificar, se adjunta la Fig. 20.

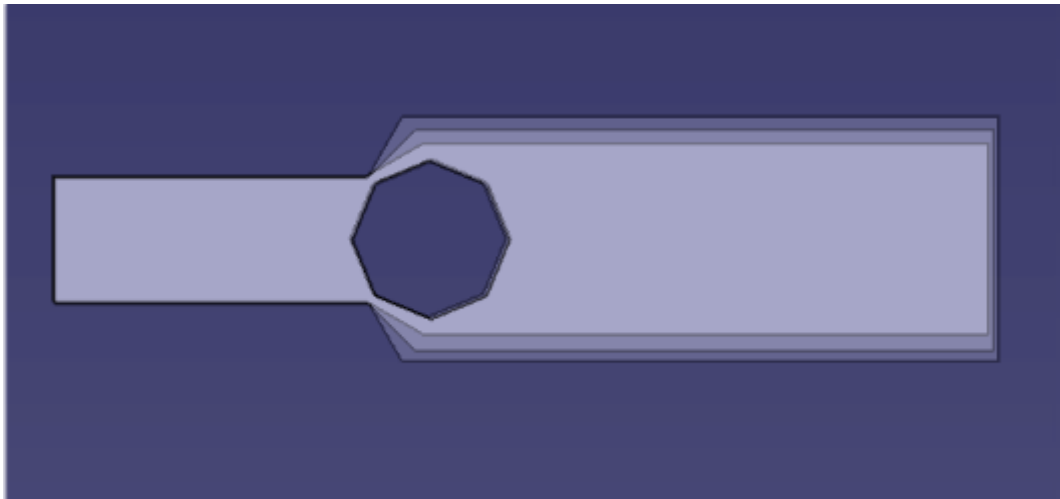


Fig. 20. Diferentes ángulos de apertura

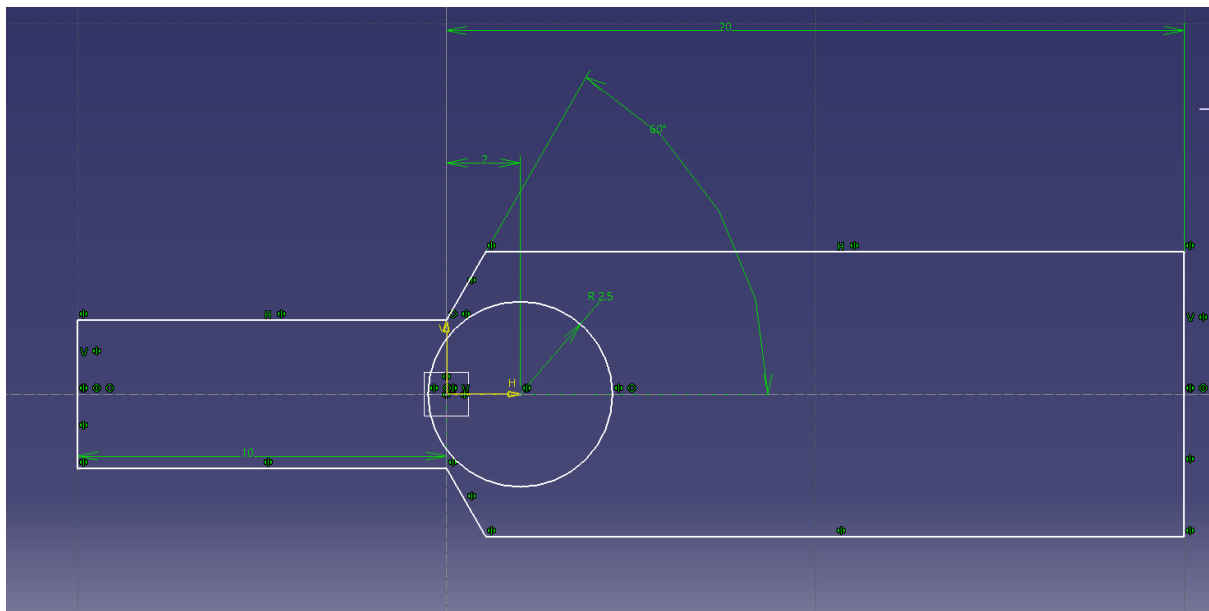


Fig. 21. Punto posición 1

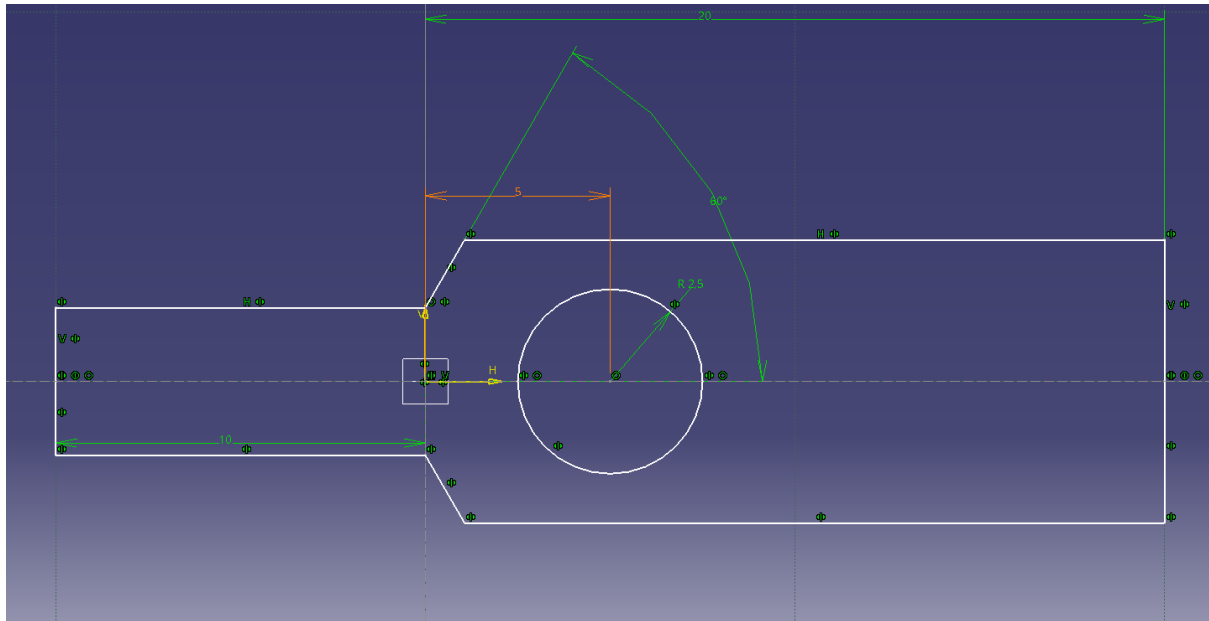


Fig. 22. Punto posición 2

La válvula mantendrá las mismas características en todas las simulaciones.

#### 4.4.1 Condiciones de contorno

Se fija la entrada de flujo por la parte más estrecha y la salida por el punto más alejado del extremo de la cabida con diámetro mayor.

En la entrada de fluido suponemos una presión de 0 Pa,. La velocidad, en cambio, sí tiene un valor, que se define mediante la ecuación de conservación de la potencia

$$F_e * d_e * \omega = F_{fluid} * v_{fluid}$$

En este caso  $F_e$ , es la fuerza que se aplica en la palanca con tal de generar un gradiente de presión para hacer retroceder la válvula.  $d$  es la distancia que recorre el bombín,  $F_{fluid}$  es la fuerza del fluido, calculada previamente como  $F_2$  y  $v_{fluid}$  es la velocidad que se alcanza, nuestra incógnita.

Para calcular  $\omega$ , sabiendo que el ángulo de apertura máxima de la manera es de  $30^\circ$  y que se tarda 2 s en abrir:

$$\omega = \frac{30^\circ}{2} * \frac{2 * \pi \text{ rad}}{360^\circ} = \frac{\pi \text{ rad}}{12 \text{ s}}$$

Obtenemos así:

$$19.36 * 800 * \frac{\pi}{12} = 326.06 * v_{fluid}$$

$$v = 12.43 \text{ m/s}$$

También se ha realizado la simulación de una cavidad con rugosidad. En este caso se quiere comprobar el correcto funcionamiento en caso de fabricar la bomba mediante fabricación aditiva.

El acabado de la superficie se puede definir en términos del valor de la rugosidad de la superficie. Dado que los sistemas FDM se basan en un proceso aditivo capa a capa, el efecto escalera está presente y afecta el acabado superficial de la pieza. El efecto escalera depende de la inclinación de la superficie y del espesor de la capa (Medellin-Castillo & Zaragoza-Siqueiros, 2019).

La impresión 3D SLA a menudo se elige por su acabado superficial de calidad relativamente alta. Sin embargo, la rugosidad superficial promedio de las piezas impresas en 3D SLA está en el rango de 0,4 a 2 ptm, que es relativamente rugosa en comparación con la de los procesos de pulido/acabado, típicamente de 0,1 a 0,4 g. (Shirley Suet-Ning Lu, 2018)

Por este motivo, para la simulación con superficie no-lisa, se ha definido una altura de rugosidad de 0,7 m y una constante de rugosidad de 0,5 arbitrariamente.

Cabe remarcar que para la simulación con rugosidad se ha utilizado un flujo turbulento ya que, los flujos laminares no están influenciados por la rugosidad dado que las líneas de corriente cubrirán la rugosidad que se estratifica. La consecuencia es que el factor de fricción es independiente de la rugosidad. (<https://forum.ansys.com/>)

## 4.5. Resultados de las simulaciones

### 4.5.1. Resultados 60º y 2 mm de separación

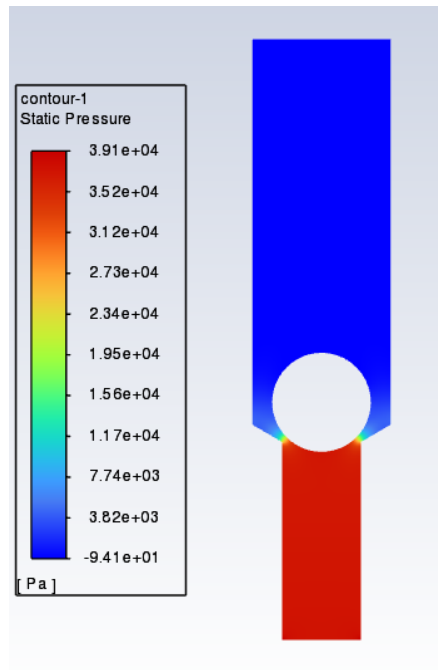


Fig. 23. Presión estática

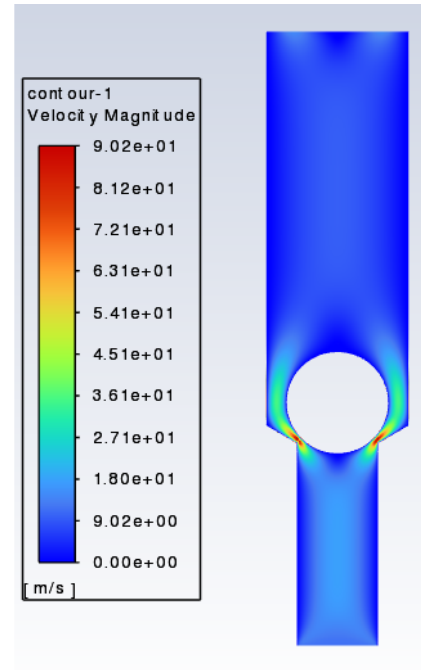


Fig. 24. Magnitud de velocidad

Para poder obtener unos resultados en diferentes posiciones de la válvula se han definido 3 líneas a lo largo de la geometría 2D para estudio. La línea 1 es la más cercana al "inlet", la línea 2 es la más cercana al outlet y la línea 3 atraviesa la válvula.

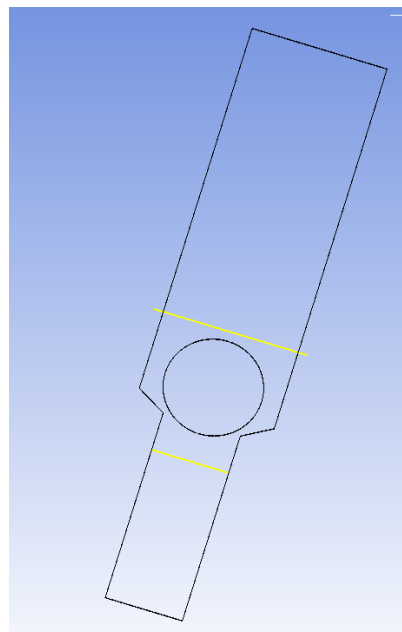


Fig. 25. Líneas de puntos de estudio 1 y 2

## Resultados línea 1.

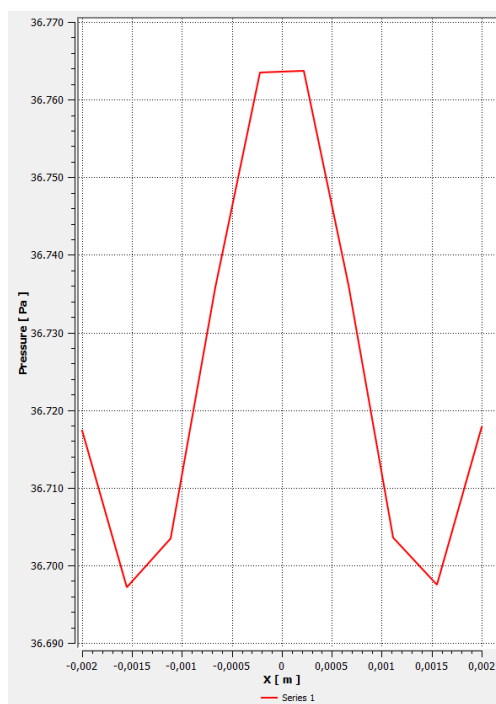


Fig. 26. Presión a lo largo del eje X

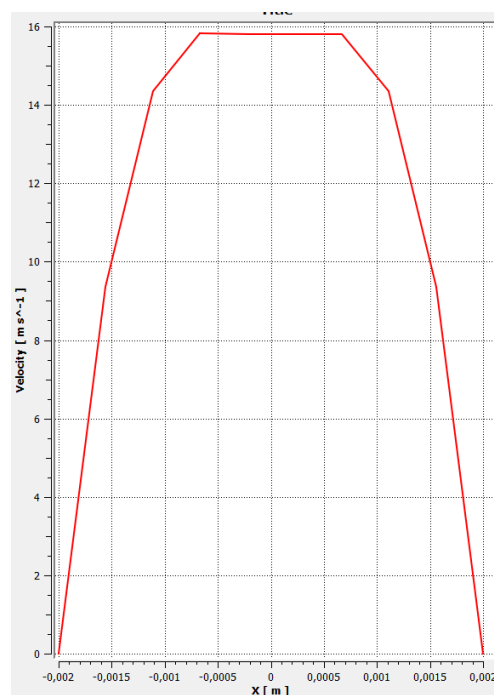


Fig. 27. Velocidad a lo largo del eje X

## Resultados de la línea 2:

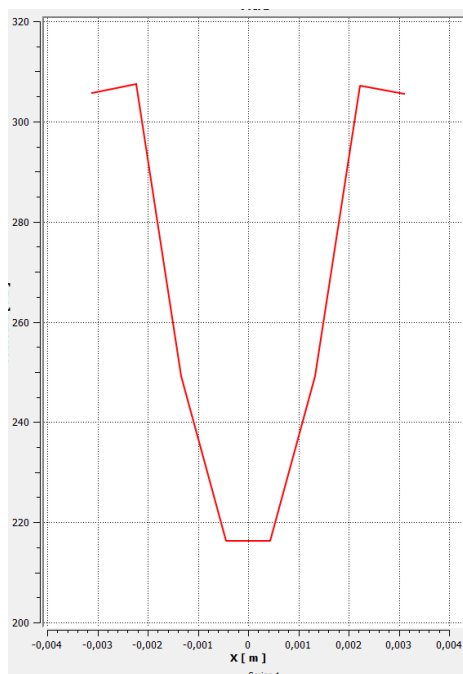


Fig. 28. Presión a lo largo del eje X

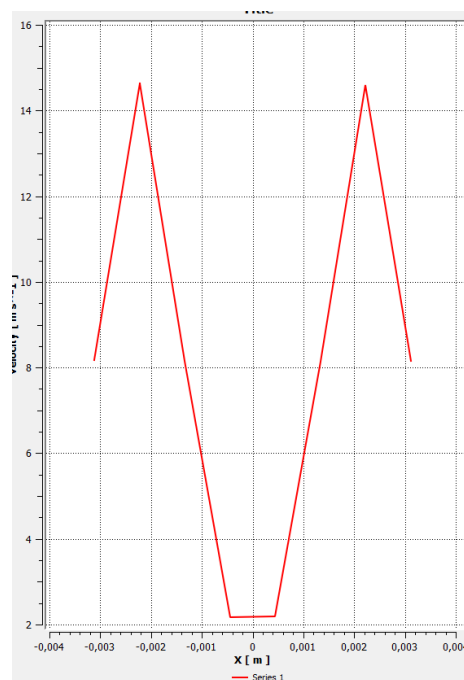


Fig. 29. Velocidad a lo largo del eje X

#### 4.5.2. Resultados 60° y 5 mm de separación

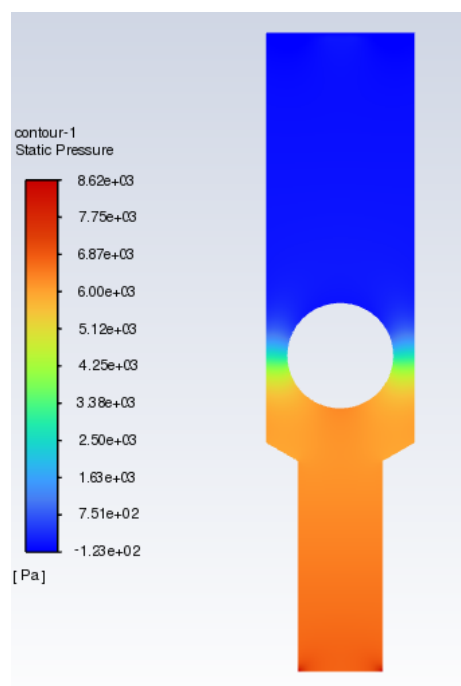


Fig. 30. Presión estática

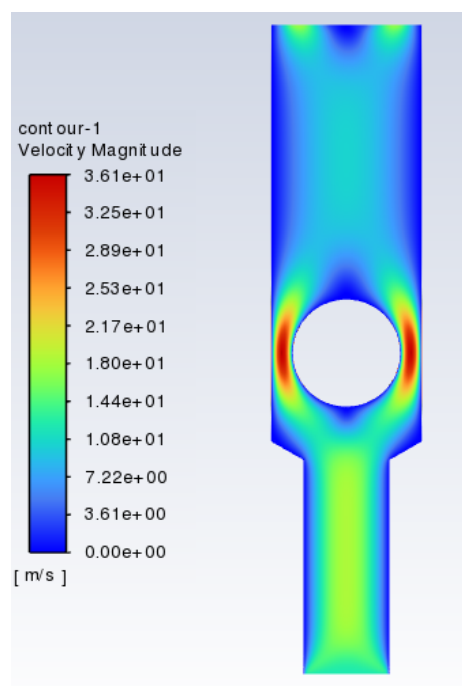


Fig. 31. Magnitud de velocidad

#### 4.5.3. Resultados ángulo 30° y 2 mm de separación

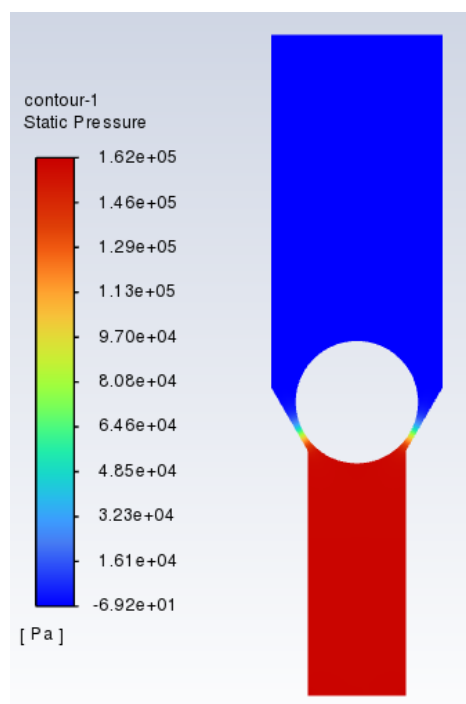


Fig. 32. Presión estática

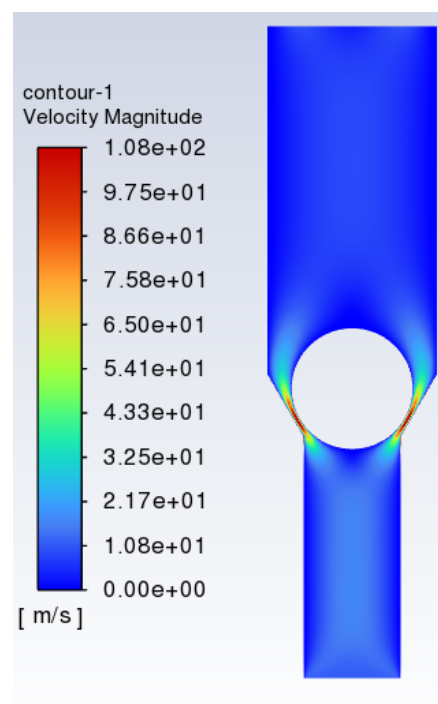


Fig. 33. Magnitud de velocidad



#### 4.5.4.Resultados ángulo 30º y 5 mm de separación

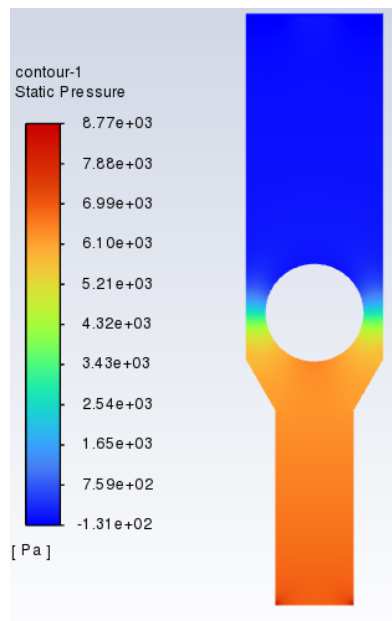


Fig. 34. Presión estática

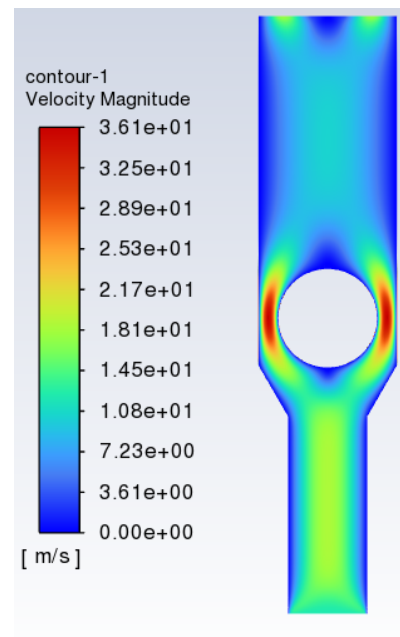


Fig. 35. Magnitud de velocidad

#### 4.5.5.Resultados ángulo 30º y 2 mm de separación con rugosidad, flujo turbulento

Se ha querido realizar la simulación de la cavidad con rugosidad para poder comprobar el correcto funcionamiento de ésta. En caso de tener rugosidad, se puede observar la siguiente distribución de presiones en la Fig. 36 y velocidades en Fig. 37:

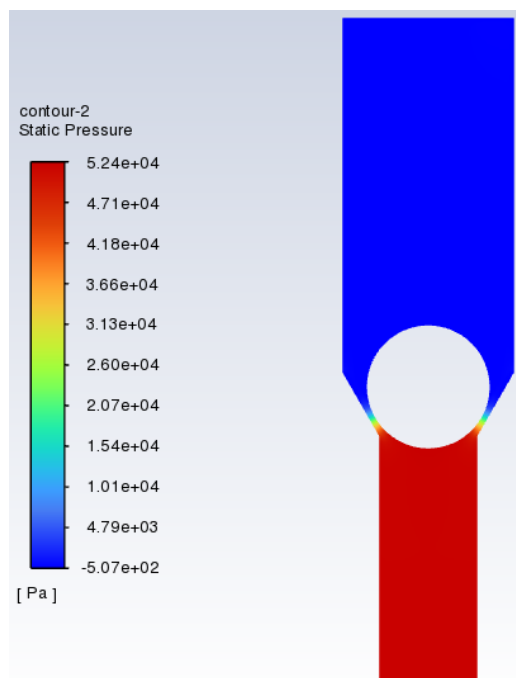


Fig. 36. Presión con rugosidad

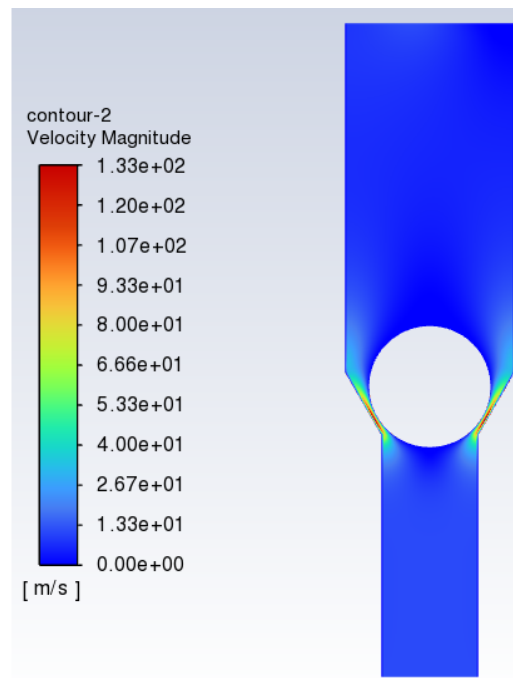


Fig. 37. Velocidad con rugosidad

#### 4.5.6.Resultados ángulo 30º y 2 mm de separación sin rugosidad, flujo turbulento

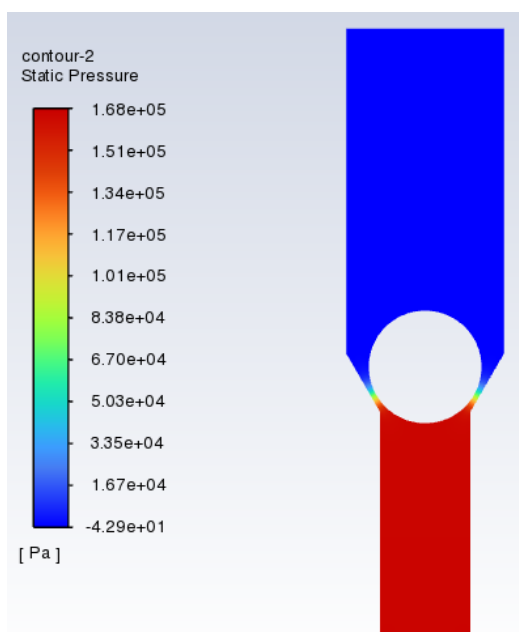


Fig. 38. Presión con flujo turbulento

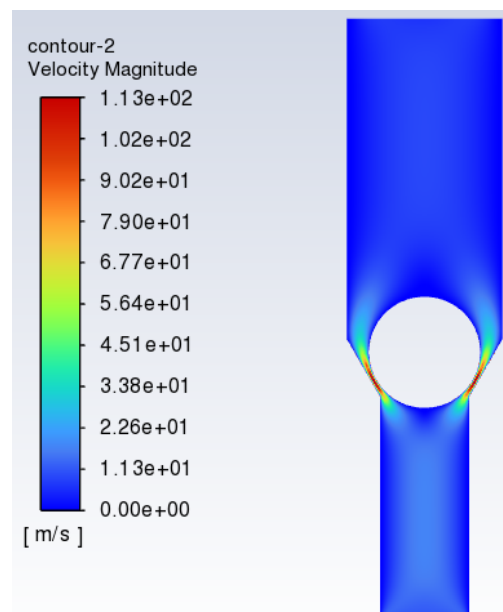


Fig. 39. Velocidad con flujo turbulento

#### 4.5.7.Resultados ángulo 45º y 2 mm de separación en 3D

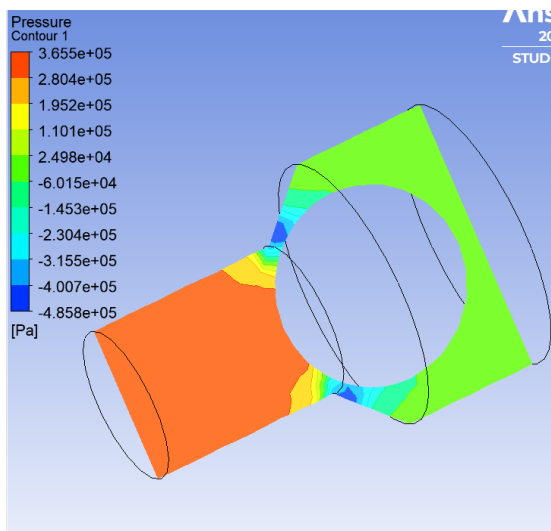


Fig. 40. Distribución de la presión

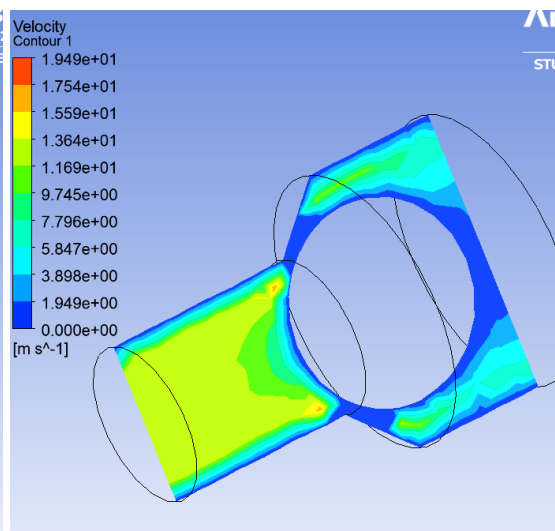


Fig. 41. Distribución de la velocidad

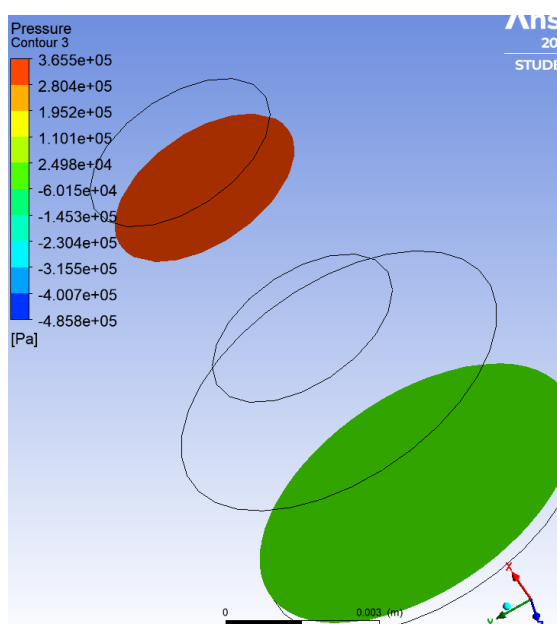


Fig. 42. Presión en diferentes planos de la figura 3D.

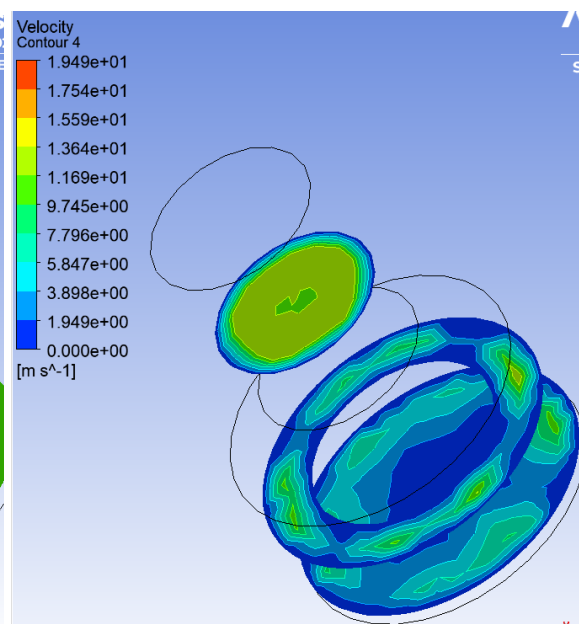


Fig. 43. Velocidad en diferentes planos de la figura 3D.

## 4.6. Análisis de resultados

La primera simulación, de ángulo  $60^\circ$  se supone muy temprana a la apertura de la válvula. Esto conlleva que el flujo debe pasar a través de las pequeñas aperturas a una gran velocidad hacia el gradiente de presión. Antes de toparse con la válvula el flujo crea una presión que decrece drásticamente posteriormente, este hecho se puede comprobar observando las figuras 26 y 28, que muestran la presión en diferentes momentos de apertura.

En referencia a la velocidad, se observa que ésta disminuye en los laterales, debido a la fricción con el entorno. También cabe comentar que se puede ver cómo la velocidad aumenta al pasar por los canales entre la válvula y la cavidad. Este hecho se demuestra a continuación mediante la ecuación de Bernoulli.

En caso de querer comprobar también el efecto de la apertura, es decir, el ángulo entre los dos diámetros, se observa que tanto la velocidad como la presión máxima es mayor en el caso del ángulo de  $30^\circ$  a 2mm de separación. Este hecho ocurre porque cuanto mayor es el ángulo, el flujo tiene más área de expansión y por tanto, la presión decrece. Dado que hay menos presión, el flujo no pasa con tanta rapidez hacia la parte posterior de la válvula, hay un gradiente de presión menor.

En el análisis de resultados con rugosidad se ha podido observar que la presión máxima disminuye frente a la presión cavidad lisa. Por el contrario, la magnitud de la velocidad máxima aumenta. Esto es así ya que la rugosidad en las paredes de un canal afecta la caída de presión de un fluido que fluye a través de éste. Este efecto de rugosidad se

puede describir por la constricción del área de flujo y el aumento de la tensión de cizalladura de la pared. (G. Kandlikar, 2005)

Aún así, los valores del conducto con rugosidad son bastante similares a los de la cavidad lisa, por tanto se supone la viabilidad de la creación de la bomba mediante impresión 3D

Como último punto a comentar se encuentra la simulación 3D realizada para comprobar que efectivamente las simulaciones en 2D obtienen los mismos resultados que al hacerse en 3D.

## 4.7. Comprobación de resultados

Mediante los gráficos que se adjuntan como Fig. 26, Fig. 27, Fig. 28 y Fig. 29 se puede comprobar que al “chocar” el fluido con la válvula esférica se produce una disminución tanto de velocidad como de presión tras de esta.

Analíticamente se puede comprobar este fenómeno mediante la ley de Bernoulli, que es la siguiente:

$$\frac{v^2 \cdot \rho}{2} + P + \rho \cdot g \cdot h = \text{constante}$$

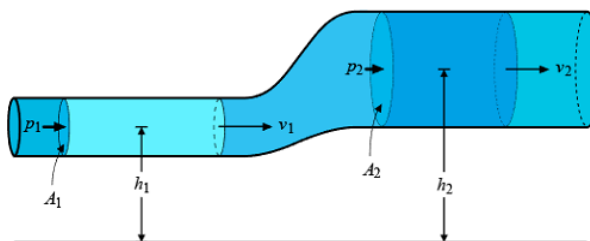


Fig. 44. Esquema explicación ecuación Bernoulli (Xnomid, s. f.)

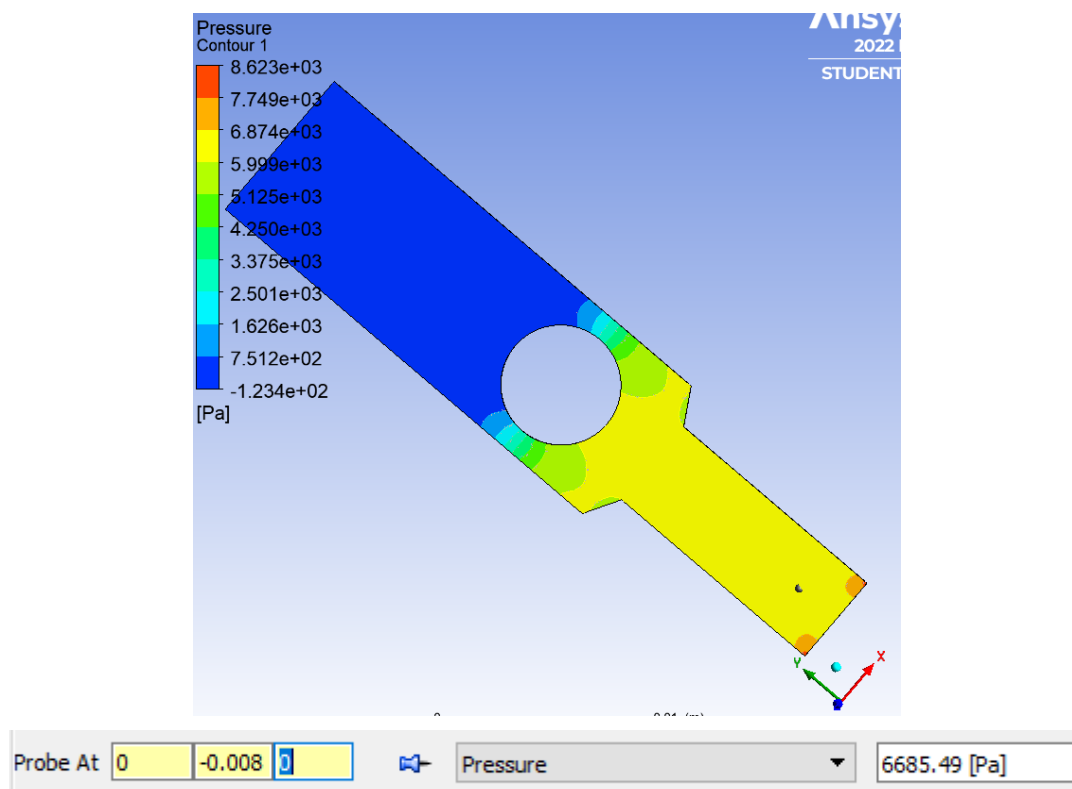
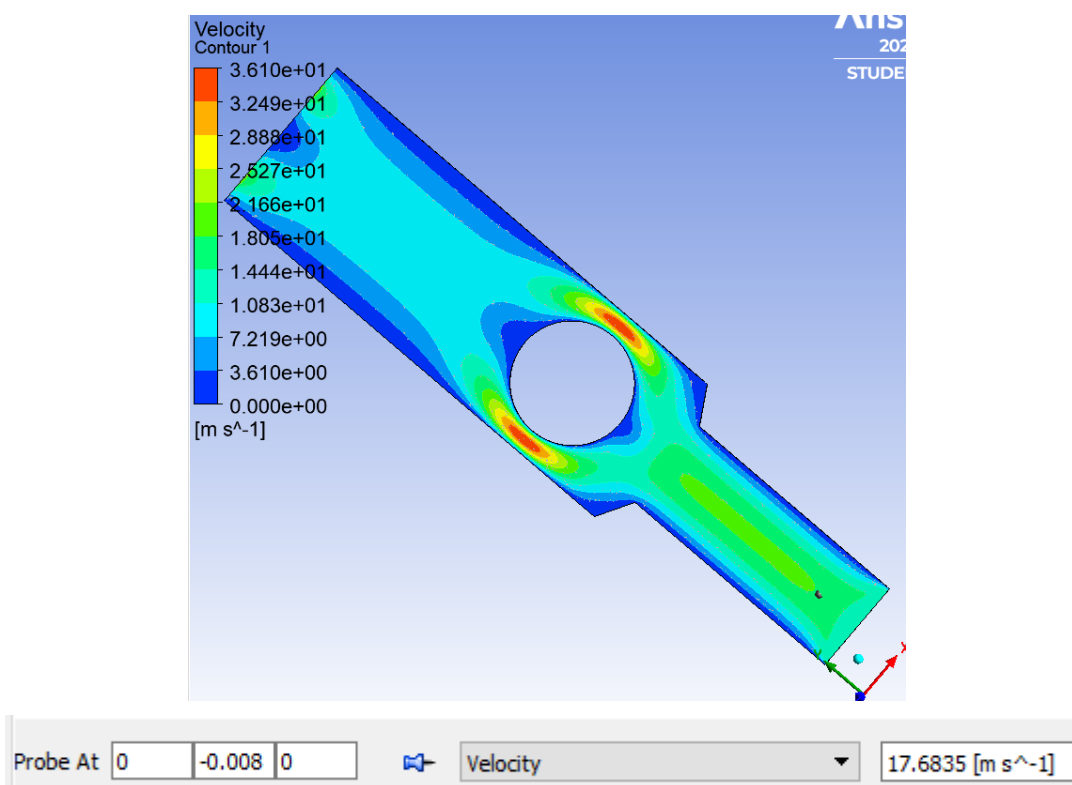
Donde  $v$  es la velocidad del fluido en el punto considerado,  $\rho$  es la densidad,  $P$  es la presión,  $g$  la gravedad y  $h$  la altura en dirección de la gravedad.

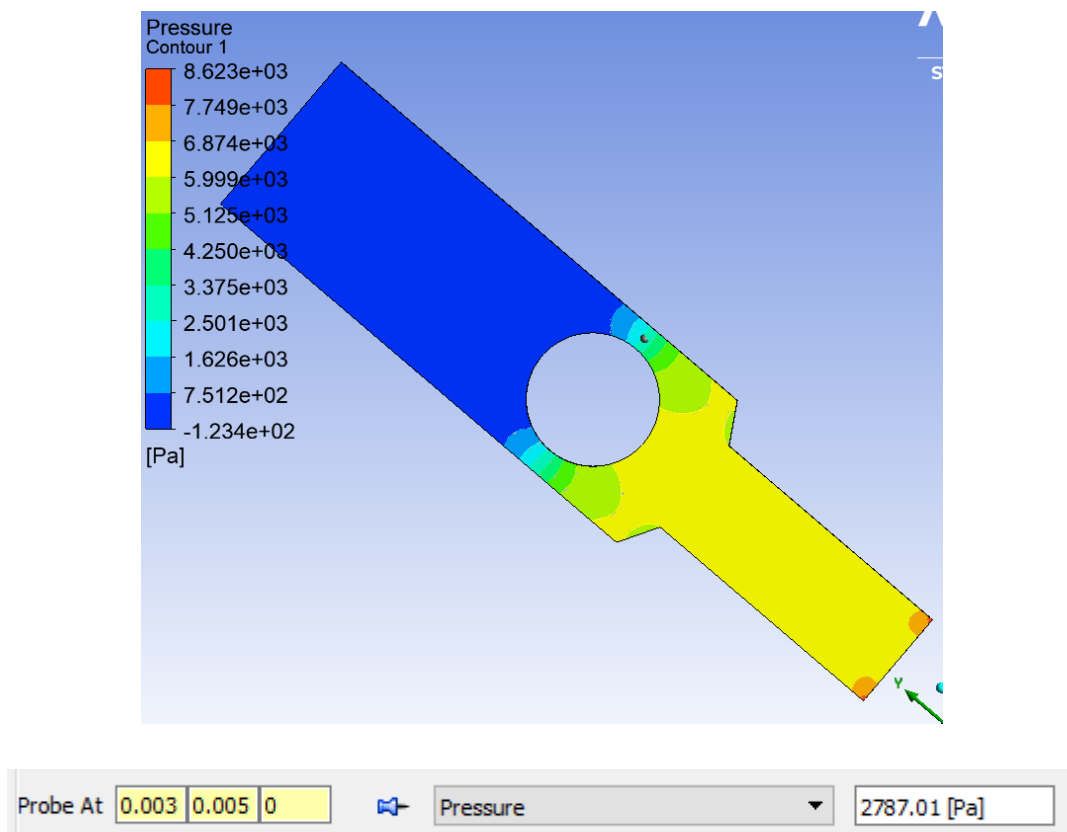
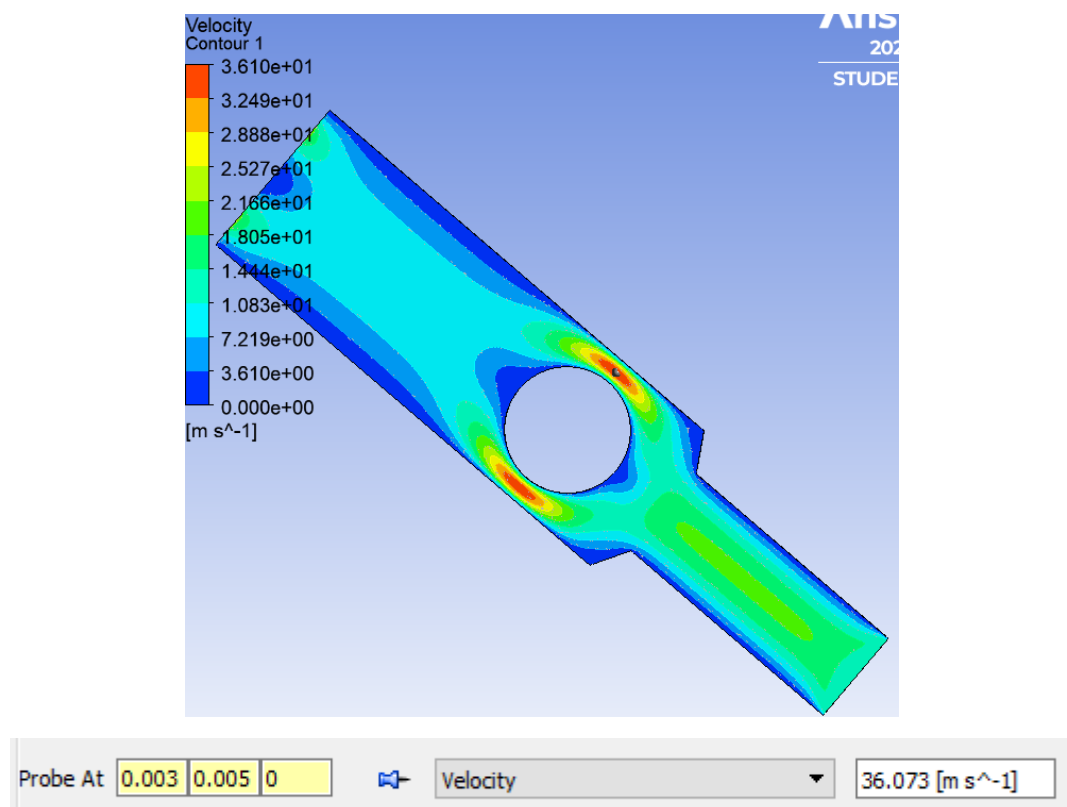
$$\frac{v_1^2 \cdot \rho}{2} + P_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 = \frac{v_2^2 \cdot \rho}{2} + P_2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

Para comprobar que se cumple la ecuación, se toman como puntos de posición los siguientes:

P1(0, -0.008, 0)

P2(0.003, 0.005, 0)

*Fig. 45. y Fig. 46. Presión en P1**Fig. 47. y Fig. 48. Velocidad en P1*

*Fig. 49. y Fig. 50. Presión en P2**Fig. 51. y Fig. 52. Velocidad en P2*

Dado que el flujo se divide hacia dos puntos distintos, tenemos que tener en cuenta la presión y la velocidad en la bifurcación. Como se trata de una bifurcación simétrica, se multiplica el valor por 2. Si se sustituyen los valores exactos, se encuentra:

$$\frac{17.6835^2 \cdot \rho}{2} + 6685.49 + \rho \cdot g \cdot 0 = \left( \frac{36.073^2 \cdot \rho}{2} + 2787.01 + \rho \cdot g \cdot 0 \right) \cdot 2$$

$$6821.517 \text{ N.m} \sim 6360.835 \text{ N.m}$$

Se comprueba que el resultado es bastante aproximado. Debe tenerse en cuenta que la ecuación de Bernoulli se cumple siempre y cuando se trabaje con un fluido laminar sin fricción. En la simulación no se ha obviado la fricción, por tanto, la diferencia de valores es la energía perdida por la fricción interna.

Error absoluto	Error relativo
$ 6821.517 - 6360.836  = 460,68 \text{ N.m}$	$\frac{ 6821.517 - 6360.836 }{6821.517} = 6\%$

*Tabla. 2. Errores de resultado de Bernoulli*

Con el resultado de los errores obtenidos, se puede concluir que las pérdidas por fricción del fluido con las paredes del conducto representan el 6% de la energía total.

Se puede afirmar, pues, que las simulaciones y los resultados obtenidos han sido correctos.

## 5. Visualización impresión 3D

Se ha querido visualizar cómo quedaría la impresión 3D de la bomba, que contiene el conducto con la válvula, con diferentes tecnologías.

Se han utilizado dos programas diferentes: BCN3D Stratos y CHITUBOX.

### 5.1. BCN3D Stratos

Este software se utiliza para simular la impresión 3D mediante tecnología FDM. El resultado que se muestra en la Fig. 53. se ha obtenido con los parámetros de impresión predefinidos por el programa.

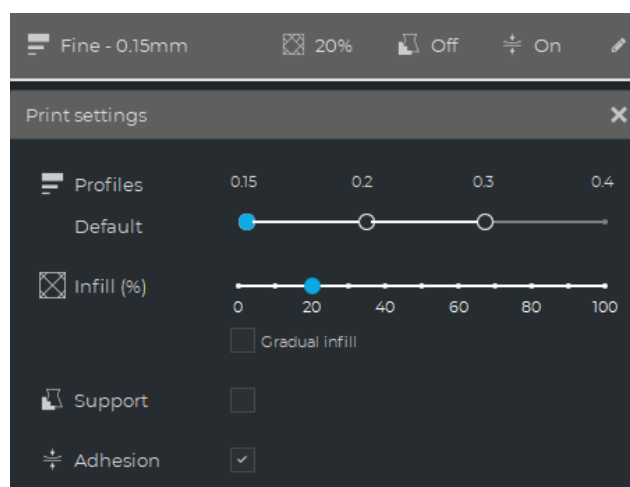


Fig. 53. Parámetros de impresión FDM

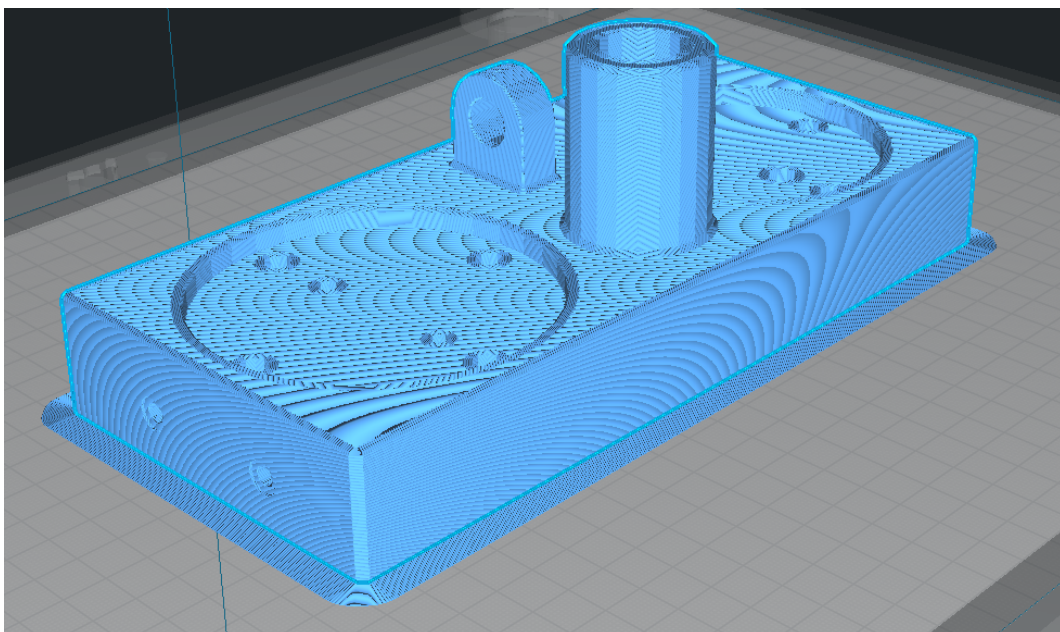


Fig. 54. Simulación de impresión FDM



## 5.2. CHITUBOX

CHITUBOX es un programa que simula la impresión mediante tecnología SLA. Para esta simulación también se han escogido los parámetros que facilita el programa por defecto.

Altura capa:	<input type="text" value="0,050"/>	mm	Bottom Lift Distance:	<input type="text" value="5,000"/>	+	<input type="text" value="0,000"/>	mm
Total capas inferiores:	<input type="text" value="8"/>		Lifting Distance:	<input type="text" value="5,000"/>	+	<input type="text" value="0,000"/>	mm
Exposure Time:	<input type="text" value="6,000"/>	s	Distancia de ...aer inferior:	<input type="text" value="5,000"/>	+	<input type="text" value="0,000"/>	mm
Bottom Exposure Time:	<input type="text" value="50,000"/>	s	Distancia de retracción:	<input type="text" value="5,000"/>	+	<input type="text" value="0,000"/>	mm
Recuento de ca...de transición:	<input type="text" value="0"/>		Veloc. elevación inferior:	<input type="text" value="65,000"/>	&	<input type="text" value="0,000"/>	mm/min
Tipo de máquina:	<input type="text" value="Lineal"/>	▼	Lifting Speed:	<input type="text" value="65,000"/>	&	<input type="text" value="0,000"/>	mm/min
Modo de espera... la impresión:	<input type="text" value="Tiem..."/>	▼	Velocidad de...ón inferior:	<input type="text" value="150,000"/>	&	<input type="text" value="0,000"/>	mm/min
Tiempo de desc... del ascender:	<input type="text" value="0,000"/>	s	Velocidad de retracción:	<input type="text" value="150,000"/>	&	<input type="text" value="0,000"/>	mm/min
Tiempo de desc... del ascender:	<input type="text" value="0,000"/>	s					
Tiempo de desca...s de retirarse:	<input type="text" value="0,000"/>	s					

Fig. 55. Parámetros de impresión SLA

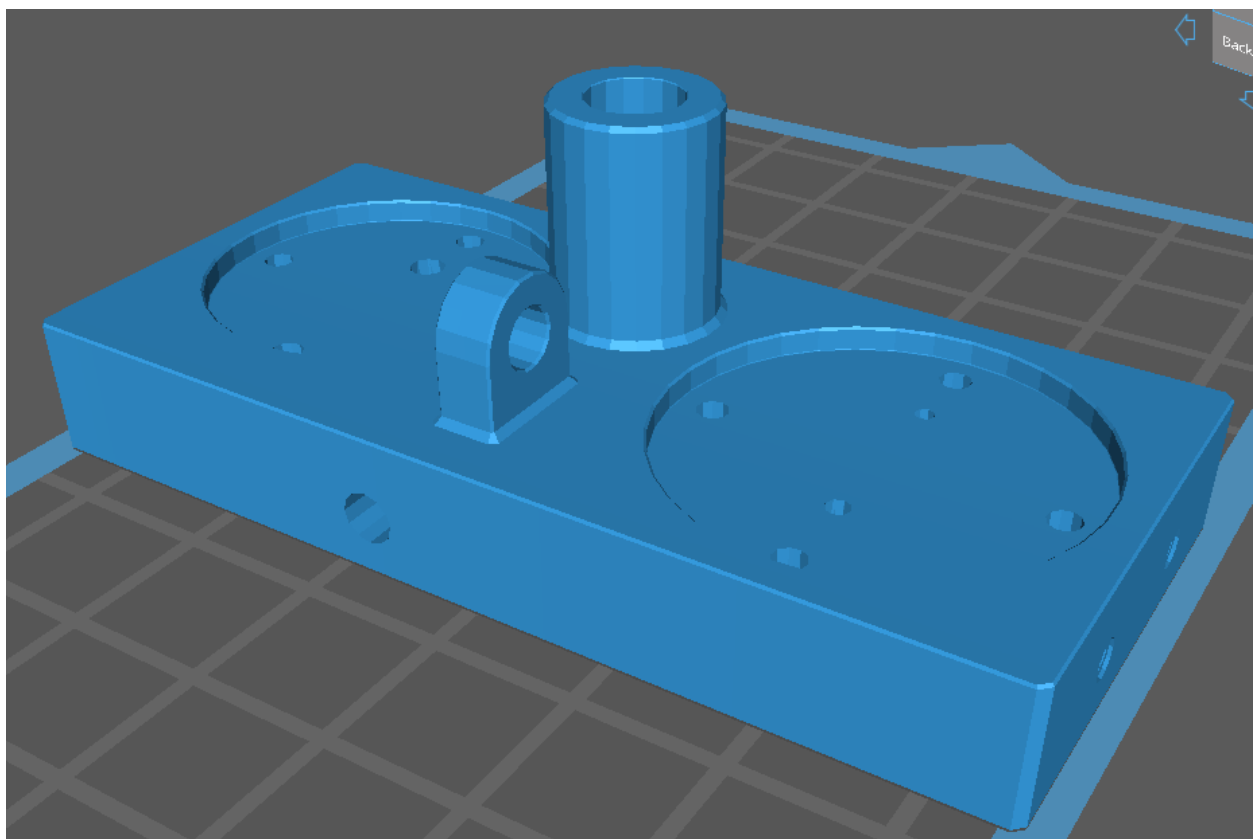


Fig. 56. Simulación de impresión SLA

### 5.3. Observaciones

Se puede observar que la teoría que se ha explicado durante el trabajo es visiblemente cierta, ya que la geometría de la simulación de impresión por tecnología FDM es visualmente mucho más rugosa que la de tecnología SLA.

Un punto importante ha sido el sobrante que se ha generado automáticamente en la impresión FDM en la base de la bomba. Este hecho supondría el futuro mecanizado de dicha bomba.

Aún así, ambas bombas han sido impresas como se esperaba, no han hecho falta soportes de ningún tipo y la geometría no ha sido modificada.

## 6. Conclusiones

Partiendo de un dispositivo hidráulico diseñado por mí en su totalidad, se han obtenido los resultados del comportamiento de la dinámica del fluido que empuja una válvula perteneciente a dicho dispositivo. El movimiento de este fluido se genera al accionar la bomba que forma parte de éste mediante una palanca cuya finalidad es levantar un peso.

Sabiendo que los objetivos del trabajo era realizar el estudio fluidodinámico mediante simulación CFD y examinar la viabilidad de realizar la fabricación de la geometría mediante fabricación aditiva, se puede concluir que: los resultados de las simulaciones han sido válidos ya que cumplen los requisitos de la ecuación de Bernoulli y además son físicamente posibles. Las técnicas de simulación CFD han permitido comprobar que una geometría con cierta rugosidad, característica que viene dada por la fabricación aditiva, mantiene unas propiedades similares a las de una geometría lisa. Tal y como se esperaba, la fabricación de la bomba por impresión 3D es viable y recomendada, ya que el proceso, tal y como se ha estudiado en los primeros apartados del trabajo, es más respetuoso con el medioambiente.

Hay que destacar que las simulaciones realizadas en este trabajo se han obtenido en unas condiciones de velocidad constantes y por tanto, en la práctica se podrían observar variaciones. El estudio de diferentes velocidades de entrada, diferentes medidas de conductos y válvulas sería el siguiente paso a seguir para la continuación de este trabajo.

La simulación CFD ha dado un buen resultado. Aunque cabe destacar que cuenta con limitaciones; un punto a mejorar sería la malla creada, aumentando su número de elementos y detallando más las zonas en las que el fluido padece más distorsión o dónde se pretenda una resolución mejor. Otro punto de mejora es el diseño de la válvula con tal de optimizar su aerodinámica para reducir la presión que se ha de ejercer sobre ésta. Aún así, es preciso señalar que el objetivo del trabajo no era el diseño de una geometría óptima, por tanto existen diferentes aspectos de ésta que podrían ser susceptibles de mejora en futuros proyectos.

## 7. Bibliografía

[1] 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies, (n.d.).  
<https://doi.org/10.1007/978-981-13-0305-0>

- [2] Additive Manufacturing Technologies, (n.d.). <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>
- [3] H. Bikas, & P. Stavropoulos, G. Chrysosolouris, Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review, (n.d.). <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>
- [4] M. Del Mar, B. Martinez, MASTER FINAL PROJECT ADDITIVE MANUFACTURING OF METALS Memory and Annexes, (n.d.).
- [5] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing Second Edition, (n.d.).
- [6] H.I. Medellin-Castillo, J. Zaragoza-Siqueiros, Design and Manufacturing Strategies for Fused Deposition Modelling in Additive Manufacturing: A Review, Chinese J. Mech. Eng. (English Ed. 32 (2019). <https://doi.org/10.1186/S10033-019-0368-0>.
- [7] F.J. Mercado Rivera, A.J. Rojas Arciniegas, Additive manufacturing methods: techniques, materials, and closed-loop control applications, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 109 (2020) 17–31. <https://doi.org/10.1007/S00170-020-05663-6>.
- [8] N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan, An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications, Procedia Manuf. 35 (2019) 1286–1296. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2019.06.089>.
- [9] by Shirley Suet-Ning Lu, A. John Har Associate Professor of Mechanical Engineering Thesis Supervisoi, Improving Surface Quality of SLA 3D Printed Parts Via Controlled Dip-Coating Signatu re redacted Signature redacted Signature redacted, (2018).
- [10] T. Wohlers, T. Gornet, History of Additive Manufacturing, (2016).
- [11] Modeling Roughness on a channel — Ansys Learning Forum, (n.d.). <https://forum.ansys.com/discussion/4969/modeling-roughness-on-a-channel> (accessed June 7, 2022).
- [12] Additive Manufacturing | What Is Additive Manufacturing? | Autodesk, (n.d.). <https://www.autodesk.com/solutions/additive-manufacturing> (accessed February 22, 2022).
- [13] Hydraulic oil ISO 32 anti-wear Maxifluid 32 HLP 5 litres, (n.d.). <https://www.hidraflex.com/en/lubricating-oils/1647-hydraulic-oil-iso-32-maxifluid-32-hlp-5-litres> (accessed May 22, 2022).
- [14] Principio de Pascal | Física Termodinamica, (n.d.). <https://hernanleon1002.wordpress.com/fisica-de-fluidos-y-termodinamica/primer-corte/marco-teorico/principio-de-pascal/> (accessed May 19, 2022).
- [15] Guía completa: Deposición de energía directa - 3Dnatives, (n.d.). <https://www.3dnatives.com/es/guia-deposicion-de-energia-directa-100920192/#!> (accessed May 31, 2022).

- [16] FDM o SLA: Guía comparativa de impresoras 3D de 2020, (n.d.). <https://formlabs.com/es/blog/fdm-sla-comparacion-tipos-impresoras-3d/> (accessed April 14, 2022).
- [17] The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing - 3Dnatives, (n.d.). <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/> (accessed April 20, 2022).
- [18] FABRICACIÓN POR CORTE Y LAMINADO. LOM. | tfmrimuned, (n.d.). <https://tfmrimuned.wordpress.com/fabricacion-por-corte-y-laminado-lom/> (accessed May 31, 2022).
- [19] ¿Qué es la ecuación de Bernoulli? (artículo) | Khan Academy, (n.d.). <https://es.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-bernoullis-equation> (accessed May 19, 2022).
- [20] FABRICACIÓN POR CORTE Y LAMINADO. LOM. | tfmrimuned, (n.d.). <https://tfmrimuned.wordpress.com/fabricacion-por-corte-y-laminado-lom/> (accessed May 31, 2022).
- [21] Principio de pascal – Fisica de Fluidos y Termodinamica, (n.d.). <https://wfms95.wordpress.com/primer-corte/blaise-pascal/principio-de-pascal/> (accessed May 19, 2022).
- [22] VAT Photopolymerisation | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University, (n.d.). <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/> (accessed April 14, 2022).
- [23] Powder bed fusion - DMLS, SLS, SLM, MJF, EBM | Make, (n.d.). <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion> (accessed April 20, 2022).
- [24] SINTERIZADO LÁSER SELECTIVO SLS | Blog Ingenius, (n.d.). <https://eddm.es/blog-ingenius/sinterizado-laser-selectivo-sls/> (accessed May 31, 2022).
- [25] Procesos de Fabricación Aditiva (AM) – Diseño Generativo con Solid Edge, (n.d.). <https://generativedesignpro.wordpress.com/2018/05/12/procesos-de-fabricacion-aditiva-am/> (accessed April 14, 2022).
- [26] A. Altet Graell, Millora de les propietats de peces processades per impressió 3D, (2020).
- [27] C.K. Chua, K.F. Leong, 3D Printing and additive manufacturing: Principles and applications (with companion media pack) - fourth edition of rapid prototyping, 3D Print. Addit. Manuf. Princ. Appl. (With Companion Media Pack) - Fourth Ed. Rapid Prototyp. (2014) 1–518. <https://doi.org/10.1142/9008>.

[28] S.G. Kandlikar, D. Schmitt, A.L. Carrano, J.B. Taylor, Characterization of surface roughness effects on pressure drop in single-phase flow in minichannels, *Phys. Fluids*. 17 (2005) 100606. <https://doi.org/10.1063/1.1896985>.

[29] F.J. Mercado Rivera, A.J. Rojas Arciniegas, Additive manufacturing methods: techniques, materials, and closed-loop control applications, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 109 (2020) 17–31. <https://doi.org/10.1007/S00170-020-05663-6>.

[30] T.T. Wohlers, Wohlers report 2019 : 3D printing and additive manufacturing state of the industry, (2019).

[31] Xnomind, Ecuación de Bernoulli archivos - Principio de, (n.d.). <https://www.principiode.com/tag/ecuacion-de-bernoulli/> (accessed May 31, 2022).