

GIPUZKOAKO INGENIARITZA ESKOLA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE GIPUZKOA

GRADU AMAIERAKO LANA/ TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en	INGENIERÍA MECÁNICA	Gradua
Fecha	13/07/2016	Data

DISEÑO Y MONTAJE DE UN EQUIPO PARA EL ESTUDIO DEL
TEOREMA DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO

MEMORIA

Ikaslearen izen eta abizenak/ Nombre y apellidos del alumno/a:

Mikel BARRAL POVEDA

Zuzendariaren izen eta abizenak/ Nombre y apellidos del director/a:

D. Gorka ALBERRO EGUILEGOR

Índice

1. Introducción.....	1
1.1 Motivación y descripción.....	1
1.2 Estructura de la documentación del proyecto	1
2. Base Teórica: Teorema de la cantidad de Movimiento	2
2.1 Desarrollo teórico del teorema de la cantidad de movimiento	2
2.2 Aplicación del teorema de la cantidad de movimiento	4
3. Fase de Diseño	5
3.1 Diseño de la instalación hidráulica	5
3.2 Modelado 3D mediante Solid Edge.....	8
4. Fase de Construcción	13
4.1 Impresión 3D.....	13
4.1.1 Programas de control de la impresora	13
4.1.2 Proceso de impresión	16
4.1.3 Acabado superficial post-impresión	17
4.2 Construcción por mecanizado.....	18
5. Montaje	19
6. Pruebas y Resultados	24
6.1 Comprobación del inyector con diferentes diámetros.....	24
6.2 Resultados teóricos con los pesos utilizados en las pruebas.	27
6.3 Pruebas con el equipo en funcionamiento	28
6.3.1 Obstáculo con ángulo de deflexión de 120°	28
6.3.2 Obstáculo con ángulo de deflexión de 90°	29
6.3.3 Obstáculo con ángulo de deflexión de 180°	29
6.3.4 Obstáculo con ángulo de deflexión de 30°	30
6.4 Comparación entre resultados teóricos y experimentales.....	30

7. Conclusiones	33
8. Agradecimientos	34
ANEXO I: Presupuesto.....	35
ANEXO II: Guión de Prácticas.....	36
9. ANÁLISIS DE FUERZAS DE CHORROS SOBRE OBSTÁCULOS (Tema XX) ...	37
9.1 OBJETO DEL ENSAYO.....	37
9.2 FUNDAMENTO TEÓRICO	37
9.3 MATERIAL A UTILIZAR	37
9.4 MÉTODO OPERATORIO.....	38
9.5 MEDIAS EXPERIMENTALES	39
9.6 TRABAJO DE GABINETE.....	40
9.7 DATOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	41
ANEXO III: Planos	42

1. Introducción

1.1 Motivación y descripción

El objetivo de este proyecto es construir un banco de prácticas destinado al y análisis del impacto de un chorro contra diferentes obstáculos y estudiar dicho efecto mediante el teorema de cantidad de movimiento.

Para ello se ha diseñado un prototipo basado en el banco instalado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Bilbao. Las diferentes piezas necesarias para la construcción del prototipo se realizaran mediante diferentes medios, algunas de ellas se encargaran a órganos externos a la escuela y otras se fabricaran con equipo disponible en el propio centro.

Para el diseño se han tenido en cuenta parámetros y cálculos como los de la instalación hidráulica.

1.2 Estructura de la documentación del proyecto

El proyecto se ha dividido en diferentes apartados siguiendo principalmente el orden de ejecución. En los primeros apartados se habla de todo lo referente a la teoría detrás del ensayo, el diseño y planificación de éste, más adelante se tratan los métodos utilizados para conseguir las diferentes piezas y por último se describe el modo en el que se ha montado el banco, las dificultades que han surgido. Para concluir se dan una serie de conclusiones que se han obtenido tras la realización de este proyecto.

2. Base Teórica: Teorema de la cantidad de Movimiento

Como se resume en el título del proyecto, el fin de la construcción de este banco, es el de analizar el efecto que produce un chorro sobre diferentes obstáculos cuando éste es desviado en diferentes direcciones. La definición por la que se rige este comportamiento se denomina Teorema de la cantidad de movimiento. Y lo que se busca con la realización de la práctica, es comparar el resultado teórico que se determina como se verá a continuación con los resultados obtenidos en este banco de ensayo.

2.1 Desarrollo teórico del teorema de la cantidad de movimiento

Se parte de la segunda ley de Newton donde:

$$\sum \vec{F}_{ext} = m \cdot \vec{a} \rightarrow \sum \vec{F}_{ext} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$$
$$\sum \vec{F}_{ext} \cdot dt = m \cdot d\vec{v} = d\vec{p}$$

Donde $d\vec{p}$ se denomina a la variación de la cantidad de movimiento.

Por otro lado se define un volumen de control y se suponen las siguientes hipótesis:

- Flujo permanente
- Flujo unidimensional
- Flujo incompresible

Y se puede continuar el desarrollo definiendo una salida y entrada que a las que se llaman 1 y 2 en los extremos del volumen de control.

$$\begin{aligned}\sum \vec{F}_{ext} \cdot dt &= d\vec{P}_2 - d\vec{P}_1 = dm_2 \cdot \vec{v}_2 - dm_1 \cdot \vec{v}_1 \\ \sum \vec{F}_{ext} &= \frac{dm_2}{dt} \cdot \vec{v}_2 - \frac{dm_1}{dt} \cdot \vec{v}_1 = \dot{m}_2 \cdot \vec{v}_2 - \dot{m}_1 \cdot \vec{v}_1 \\ \sum \vec{F}_{ext} &= \rho_2 \cdot Q_2 \cdot \vec{v}_2 - \rho_1 \cdot Q_1 \cdot \vec{v}_1 \rightarrow \sum \vec{F}_{ext} = \rho(Q_2 \cdot \vec{v}_2 - Q_1 \cdot \vec{v}_1)\end{aligned}$$

Cuando existen más de una entrada y/o salida:

$$\sum \vec{F}_{ext} = \rho \cdot \left[\sum (Q \cdot \vec{v})_{salida} - \sum (Q \cdot \vec{v})_{entrada} \right]$$

2.2 Aplicación del teorema de la cantidad de movimiento

Para determinar la expresión que define el comportamiento en esta práctica se parte de la ecuación obtenida en el último apartado y se aplica en un caso de dos dimensiones, ya que todas los obstáculos son piezas de revolución por lo que no cambia su forma a lo largo del ángulo.

Se denomina Q_0 y V_0 a las condiciones de entrada y Q_1 y V_1 , Q_2 y V_2 uno para cada lado.

$$\sum \vec{F}_{ext} = \rho \cdot \left[\sum (Q \cdot \vec{v})_{salida} - \sum (Q \cdot \vec{v})_{entrada} \right]$$

$$R_y = \rho \cdot [-Q_2 \cdot v_2 \cdot \cos\theta - Q_1 \cdot v_1 \cdot \cos\theta + Q_0 \cdot v_0]$$

Por continuidad se deduce que:

$$Q_1 = Q_2 = \frac{Q_0}{2}$$

Y aplicando el teorema de Bernoulli:

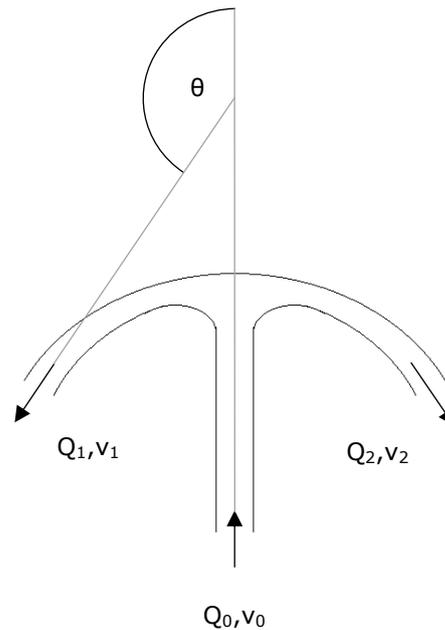
$$v_0 = v_1 = v_2 = v$$

$$R_y = \rho \cdot [-Q_0 \cdot v \cdot \cos\theta + Q_0 \cdot v_0]$$

$$R_y = \rho \cdot [-Q_0 \cdot v \cdot \cos\theta + Q_0 \cdot v_0]$$

$$R_y = \rho \cdot Q_0 \cdot v \cdot [-\cos\theta + 1]$$

$$R_y = \rho A_0 v_0^2 [1 - \cos\theta]$$



Mediante ese desarrollo se define la fuerza que va a ejercer el chorro sobre la superficie que desvía éste. Por ello se van a construir diferentes obstáculos de impacto que desviarán el chorro con diferente ángulo.

El ángulo θ se define como el ángulo que forma la dirección de entrada del chorro con la dirección de salida, que en el caso de la figura podrían ser unos 150° . Por supuesto se puede deducir de la expresión que cuanto mayor es el ángulo entre 0 y 180 , es decir que el chorro salga con sentido opuesto al que ha llegado, mayor será la fuerza que ejerce el chorro.

Teniendo en cuenta esta fuerza, y sabiendo que la finalidad del banco de ensayo es relacionar los resultados teóricos con los prácticos, se ha diseñado un sistema en el que mediante unas pesas calibradas y por igualdad de fuerzas en un sistema se puede obtener el caudal necesario para lograr que el chorro efectúe una determinada.

3. Fase de Diseño

En este apartado se va a tratar todo lo relacionado con los primeros pasos del proyecto que son los referentes al diseño. Lo primero que se ha realizado es observar un prototipo utilizado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Bilbao, y con esa base se ha partido para el diseño de éste. Además de esto, se han tenido en cuenta las características la bomba disponible en uno de los laboratorios de Mecánica de Fluidos para su posterior uso en este proyecto.

3.1 Diseño de la instalación hidráulica

La instalación que se va a usar en este proyecto está actualmente en uso para el ensayo de golpe de ariete. Por lo que lo primero ha sido estudiar la instalación para barajar la posibilidad de añadir el prototipo a este banco y así compartir la instalación hidráulica.



Figura 3-1-1. Banco DIKOIN FL01.4

La instalación es un producto de la empresa Dikoin:

Tabla 3-1. Características del banco FL01.4

Bomba	
Altura manométrica máxima:	23 m.c.a.
Caudal:	10-160 l/min
Altura manométrica:	21-10 m.c.a.
Potencia consumida:	750 W
Potencia max.	950 W
Velocidad de giro:	2.900 r.p.m.
Depósitos	
Capacidad de almacenamiento en depósito inferior:	100 litros
Depósitos de calibración superior:	0 a 8 litros 0 a 40 litros

Estos datos van a ser los que se van a usar como referencia para el posterior diseño de las partes no estructurales, las que influirán en el flujo del agua, en este caso la boquilla de los cabezales.

Además, la instalación cuenta con piezómetros calibrados en litros. Es junto con el tapón que permite cerrar el depósito de calibración de 40 litros, se puede medir el caudal de la bomba.

Con todos estos datos podemos calcular la velocidad máxima del chorro a la salida de la boquilla, para ello se mantiene fijo el diámetro de salida y se varía el caudal, como se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 3-2. Velocidad según caudal

Área de salida (m ²)	Caudal (l/min)	Caudal (m ³ /s)	Velocidad (m/s)
5,027E-05	10	1,67E-04	3,32
5,027E-05	40	6,67E-04	13,26
5,027E-05	70	1,17E-03	23,21
5,027E-05	100	1,67E-03	33,16
5,027E-05	130	2,17E-03	43,10
5,027E-05	160	2,67E-03	53,05

Nota: El área de salida se obtiene a partir del dato de diámetro de 8 mm

En la tabla no se tiene en cuenta la altura manométrica máxima de la bomba y por ello se alcanzan valores del orden de 50 m/s. Se hace el cálculo mediante el teorema de Bernoulli y se calcula la velocidad máxima con el límite de altura máxima en 23 m.c.a. como se define en las características de la bomba.

También se han calculado las diferentes velocidades de salida para diferentes diámetros de salida de chorro en el apartado 6.1.

3.2 Modelado 3D mediante Solid Edge

Una vez se ha estudiado la instalación hidráulica, se tienen los datos suficientes para hacer un primer modelado de lo que será el prototipo, con las distancias base definidas.

Lo primero se han tomado las medidas del banco Dikoin FL01.4 y se ha modelado éste mediante el software Solid Edge.

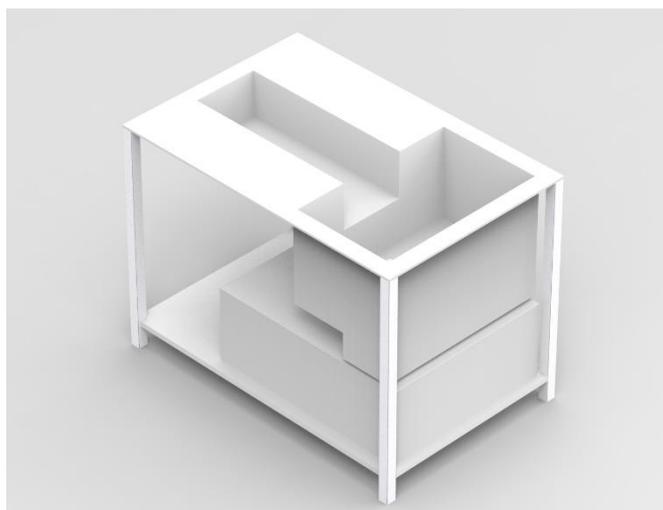


Figura 3-2. Depósitos del banco FL01.4

Ha de tenerse en cuenta que solamente se cuenta con la zona encima del depósito de 40 litros ya que el resto está ocupado por otro montaje. Por lo que se pueden estimar unas medidas para la base del montaje así como para las del cilindro y la tapa, las cuales se han diseñado en conjunto para analizar la relación en distancias.

Por lo que se imponen unas distancias con las que se van a modelar las piezas mencionadas.

Tabla 3-3. Medidas básicas de las piezas base

Pieza	Medidas en bruto
Base	325x200x15 mm
Cilindro	Ø(150ext-144int)x305 mm, 3mm grosor
Tapa del Cilindro	Ø205x10 mm

Estas piezas van a ser modificadas más adelante para satisfacer las necesidades para las que se han diseñado, por ello se han definido como medidas en bruto.

El primer cambio se aplica a la tapa, es una extensión con el diámetro interno del cilindro (144 mm) para evitar así que el agua salga por la parte superior, en la parte inferior se ha optado por un hendidura con el espesor del cilindro para encajar éste.

La salida del chorro se ha definido que va a ser de ocho milímetros por lo que se diseña una boquilla que se unirá a un tubo de 22 milímetros de diámetro estándar que se reutiliza del material que hay en el laboratorio. Por lo que la boquilla junto con el tubo definen por completo la salida del chorro.

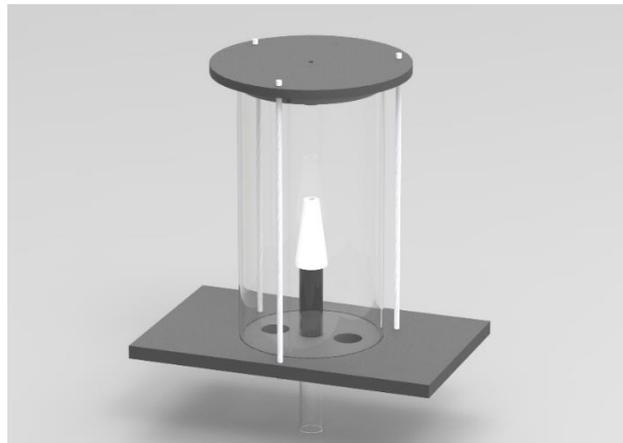


Figura 3-3. Base y boquilla

En el siguiente paso se han diseñado los cabezales con diferentes formas, son los que desviarán el chorro respecto a la dirección de entrada. Para ello se toman unos valores estándar definidos en la siguiente tabla y se diseña de modo que a la hora de imprimir no haya problemas con elementos en voladizo.

Tabla 3-4. Obstáculos de impacto de chorro

<p>Con ángulo de inflexión de 30°</p>	
<p>Con ángulo de inflexión de 90°</p>	

Con ángulo de inflexión de 120°	
Con ángulo de inflexión de 180°	

Una vez se han diseñado la base, la entrada de agua y los cabezales, es hora de diseñar el sistema que ayudara al alumno a calibrar la posición de reposo del sistema y posteriormente ayudarse de esta posición para ajustar el caudal, haciendo así que varíe la fuerza y poder llegar al punto de equilibrio para poder obtener experimentalmente la fuerza que ejerce el chorro y compararlo con el resultado teórico.

Se utiliza un sistema muy intuitivo, en el que por un lado se coloca alrededor de la varilla que sujeta el cabezal un muelle y encima de este un plato con una línea en la mitad, este plato servirá como apoyo de las pesas calibradas y será el que se moverá por el efecto de las fuerzas del sistema. Por otro lado se coloca en la zona más exterior de la tapa una varilla en la que se situara un medidor de nivel que podrá ajustarse a la altura deseada.

El esquema de lo que se pretende es el siguiente:

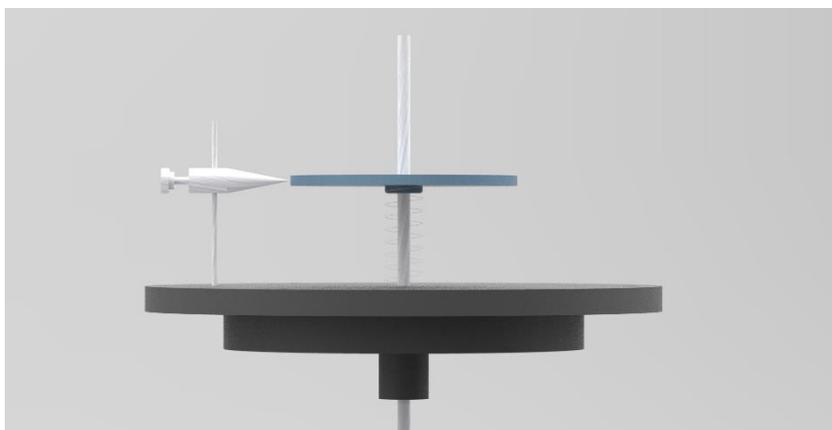


Figura 3-4: Sistema de nivelado

Toda la parte de diseño por Solid Edge queda así definido, para terminar con el diseño resta el sistema de sujeción o amarre al depósito de agua, lo cual también se ha modelado pero no diseñado. Solamente se han tomado diseños y perfiles de la empresa FUIDAL junto a las diferentes piezas que serán necesarias para el montaje.

Primero los perfiles de aluminio:

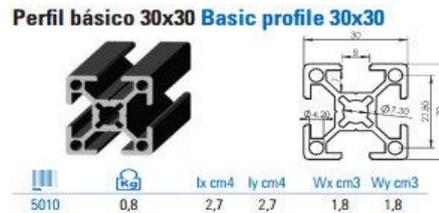


Figura 3-5: Perfil de sujeción de base

Como la sujeción de la base a los perfiles va a ser fija, y por el posicionamiento de la base se eligen unos patines que gracias a que el agujero roscado lo atraviesa puede fijarse al perfil. Los elegidos serán los de métrica 5.



Figura 3-6: Patines con canal de 8mm para el perfil

Por último se han elegido unos pies junto con unos patines para el apoyo sobre el depósito, como bien se ha definido anteriormente hay que situar el montaje en la parte encima del depósito de 40 litros y librando el montaje de golpe de ariete. Por lo que se opta por una disposición en perpendicular a la medida más larga del depósito, de ese modo se deja libre también el acceso al tapón de cierre.

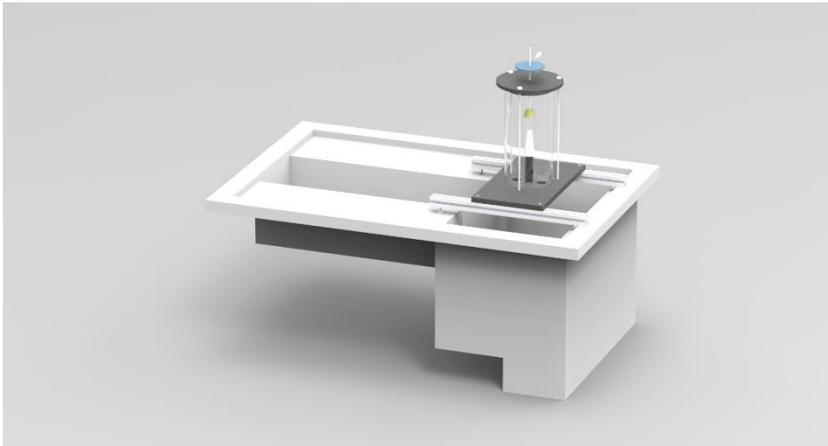


Figura 3-7: Disposición del montaje sobre el depósito

Lo que respecta al diseño mediante Solid Edge se da así por concluido.

4. Fase de Construcción

4.1 Impresión 3D

Durante el diseño del banco ha surgido la posibilidad de utilizar una impresora 3D de la Escuela de Ingeniería de Guipúzcoa, por lo que después de valorar la utilidad y calidad de los materiales utilizados se ha optado por llevar a cabo la construcción de varias piezas mediante la impresora.

La impresora en cuestión ha sido proporcionada por Victoriano Domínguez en el laboratorio de Electrónica Industrial.

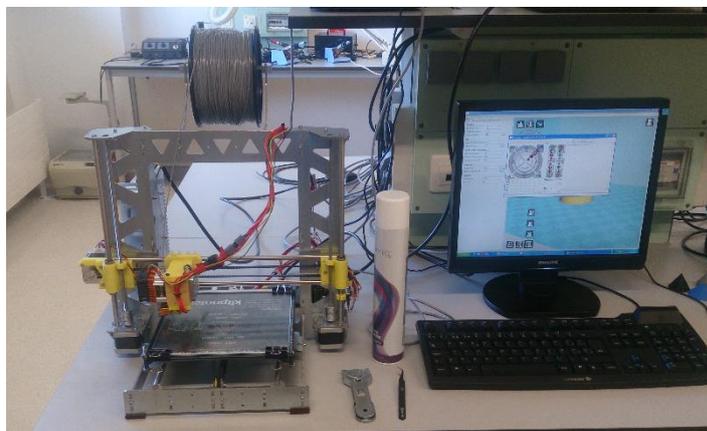


Figura 4-1: Impresora 3D

4.1.1 Programas de control de la impresora

El control de la impresora se hace mediante dos programas. El primero es **Pronterface**, este programa se usa principalmente para calibrar todo el sistema

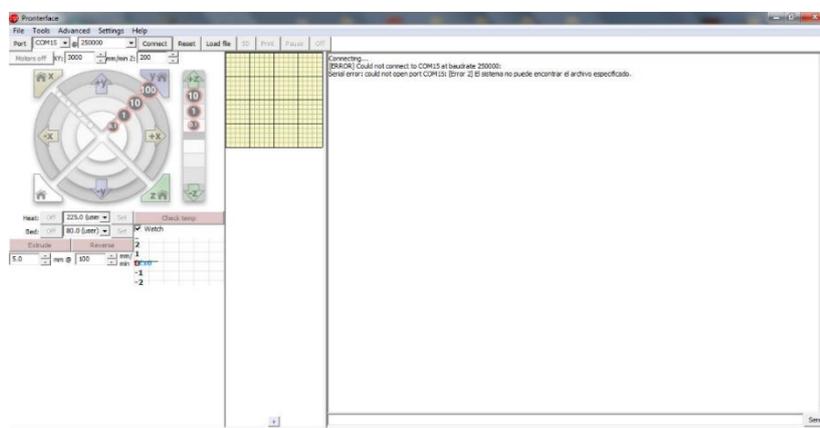


Figura 4-2: Interfaz del programa Pronterface

de movimiento de la impresora, se definen los límites de la superficie de impresión.

El otro programa utilizado es **Cura**, éste se encarga de recibir una pieza diseñada en 3D y en un formato específico, y convertirla en comandos G para la impresora, también se definen los parámetros de impresión. Este software ha sido desarrollado por la empresa Ultimaker, la cual se encarga de la fabricación de software y hardware para impresión 3D.

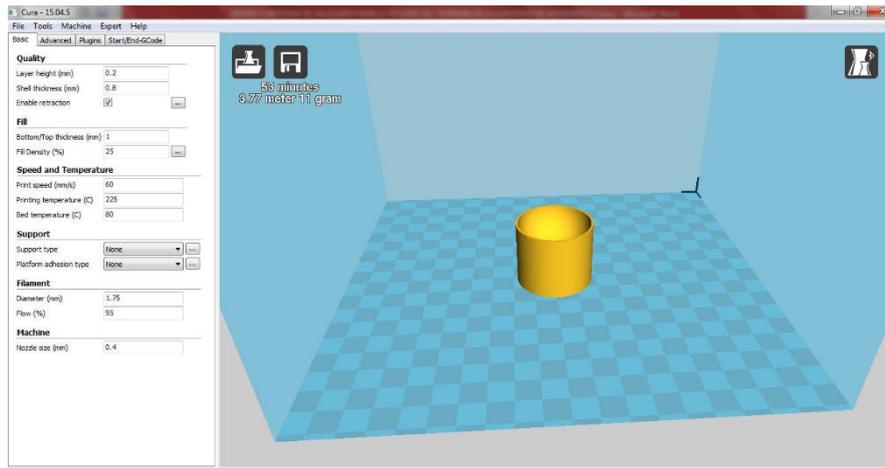


Figura 4-3: Interfaz del programa Cura

La impresora es controlada mediante una placa de la empresa Arduino, modelo Mega. Los ajustes en la parte izquierda de la figura muestran como primer bloque los parámetros de calidad, debido a las características del extrusor de la impresora se trabaja en un rango entre 0.2 y 0.4 mm de altura de capa. Básicamente la impresora imprime por niveles o capas, una vez ha terminado la primera pasa a la siguiente. Y la altura de capa es uno de los factores que más afecta en el acabado superficial de la pieza impresa.

El siguiente parámetro define el grosor de la cascara o pared. Las piezas casi nunca son macizas por lo que en el exterior se hace una capa sólida del grosor definido.

En el segundo bloque se define el anteriormente citado llenado de la pieza, lo primero el grosor de la base y tapa de la pieza modificable en el caso de que se quiera lijar y no comer completamente la base. El otro parámetro es el de densidad de llenado, casi nunca se hacen piezas macizas por lo que se establece un porcentaje de llenado y el programa automáticamente crea una estructura interna para cada porcentaje. Dependerá de la aplicación, para este caso se ha definido entre 20% y 25%.

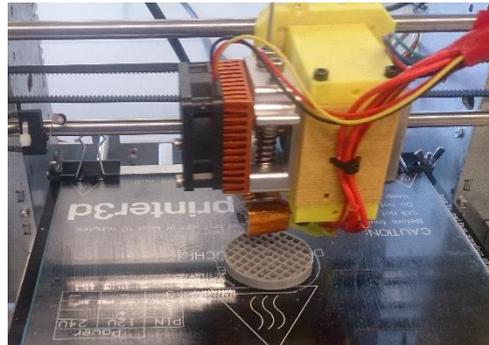


Figura 4-4: Relleno del 20% en pieza

El tercer bloque es el que se encarga de definir la velocidad de movimiento del extrusor, y las temperaturas. Ambas están directamente relacionadas con el tipo de plástico que se va a usar. Los más comunes son PLA y ABS. Como el PLA es biodegradable y en este sistema muchas de las piezas están en contacto con el agua este tipo de plástico es totalmente inviable. Por otra parte el ABS es más resistente y totalmente resistente al agua pero en su contra necesita una mayor temperatura para ser fundido. Por lo que se ha optado por utilizar plástico ABS, los valores de temperatura estándar para la impresión en 3D son de 225°C en el extrusor y 80°C para la cama caliente, se llama cama caliente a la placa situada debajo de la plancha de cristal y se utiliza para evitar que se creen tensiones cuando el plástico entra en contacto con el cristal y mantener la pieza a una temperatura.

El cuarto bloque no ha sido utilizado en este proyecto ya que se utiliza para hacer soportes, es decir cuando hay piezas con partes en voladizo, la impresora a través de una opción crea una malla de soporte para éstas zonas.

El quinto y sexto bloque son configuraciones avanzadas para el correcto funcionamiento de la impresora y no es necesario modificarlos.

4.1.2 Proceso de impresión

A la hora de imprimir hace falta tener algunos conceptos en mente.

- Para evitar largas esperas, es recomendable conectar el programa Pronterface en primer lugar, esto permite elevar la temperatura de la cama caliente y del extrusor y poder monitorizarlo. También ayuda a comprobar que las coordenadas 0,0,0 están bien definidas por si algún elemento ha dejado de funcionar correctamente y así detectarlo antes de tiempo.
- Una vez se ha calentado a la temperatura deseada y la pieza que se desea imprimir está cargada en Cura y bien posicionada, se desconecta Pronterface y se conecta Cura mediante la opción imprimir (Ctrl+P).
- Posicionar las piezas correctamente para evitar tener que hacer estructuras de soporte en la medida de lo posible.
- Si la pieza que se va a imprimir no va a sufrir grandes cargas, seleccionar valores bajos de llenado, evitar valores por encima del 40% ya que alarga mucho el proceso de impresión.

Una vez se han diseñado las piezas mediante Solid Edge, importar las que se van a fabricar mediante la impresora al formato *.stl* ya que es el necesario para que Cura pueda leerlo.

Antes de imprimir cualquier pieza con plástico ABS se recomienda utilizar un adherente en la superficie de cristal. En caso contrario el plástico se contrae al enfriarse y si no está bien adherido se crean deformaciones en la base de la pieza. En este caso se ha utilizado laca de pelo para cubrir la base. Este proceso se realiza para cada pieza.

Una vez la impresora ha concluido el proceso y el programa confirma que se ha acabado, lo que se hace es retirar la placa de cristal y dejarlo sobre una superficie a temperatura ambiente, esto enfría el cristal y si se deja el tiempo suficiente la pieza se despegará por sí sola. Para acelerar el proceso de despegado se utiliza una rasqueta para vitrocerámica, con el fin de no perjudicar la superficie del cristal.

4.1.3 Acabado superficial post-impresión

Existen varias alternativas para mejorar el acabado de la pieza, cada uno depende de la aplicación final del producto.

La primera opción es el lijado normal, se toma una lija de 2000 o mayor, ya que la cascara de plástico macizo no es muy gruesa y hay que tener cuidado de no agujerearla y llegar a la estructura interna. Este método es válido tanto para eliminar rebabas o limpiar la zona de una pieza donde se ha creado una estructura de soporte.

La segunda solución está orientada al acabado estético, en este caso se utiliza acetona pura, ya que disuelve el plástico. Uno de los métodos es hacer una pasta mezclando acetona con pequeños trozos de plástico, esta mezcla se puede usar como relleno de algún pequeño hueco o para alisar superficies. El otro método consiste en aprovechar los vapores de la acetona directamente sobre la superficie. Para esto se construye un envase sellado con la pieza en la base sobre un soporte para que no toque el fondo, y se colocan unas láminas de papel humedecido en acetona para que se evapore. Esto da lugar a que el plástico absorbe la acetona evaporada y lentamente se disuelve en proporciones muy pequeñas por lo que se consigue un acabado liso y brillante.

La tercera solución está más orientada a la necesidad de este proyecto. Se utiliza un esmalte comercial para plásticos. Se aplica una o dos capas, según la necesidad, para uniformizar la superficie y protegerla. Como en algunas de las piezas el agua estará impactando de forma continua se recomienda este tipo de acabado por la protección que ofrece.

En algunos casos se ha observado que el acabado de esmalte sobre una capa de pasta de acetona y plástico endurece la superficie y ayuda en la conservación de la calidad de la superficie de la pieza.

4.2 Construcción por mecanizado

Algunas de las piezas debido a su función en el banco se ha decidido que la construcción será en aluminio mecanizado. Por una parte se construirá el cabezal del medidor de nivel que se utiliza para comprobar si el plato está en la posición inicial, el que sea mecanizado en aluminio ayuda a que la punta sea más fina y la precisión de la medida sea un poco mayor. También se debe a que la impresora a la hora de imprimir piezas en punta no lo hace con la precisión necesaria, ya que la base en la que esta extruyendo el plástico aún está caliente y esto hace que la parte final de la punta no se moldee correctamente.

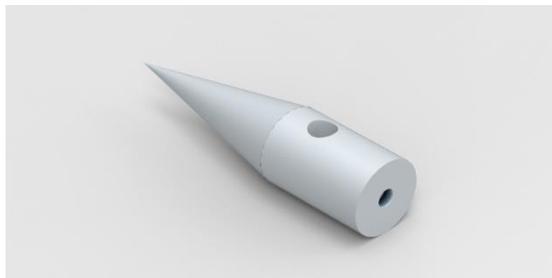


Figura 4-5: Cabezal del medidor de nivel.

Por otra parte, se construirán unos casquillos que mediante adhesivo se unirán a las obstáculos donde impacta el chorro. Se ha optado por añadir esta pieza de aluminio ya que la rosca en el plástico debilitaría su estructura y ayudaría en el desgaste de éste haciendo que quede inutilizable. Para la fabricación de éstos se tomara un tocho del diámetro exterior especificado en los planos y se le hará un agujero roscado en el interior.



Figura 4-6: Casquillo con corte en la mitad.

5. Montaje

En este apartado se describe el proceso de montaje y las dificultades que han surgido además de las causas que han provocado estas dificultades.

Como en gran parte se ha dependido de piezas compradas a diferentes empresas el montaje se ha realizado a medida que se disponía de estos materiales.

1. El soporte: Un montaje sencillo en el que se precisa de los siguiente componentes:

- Perfiles de aluminio de 30x30 mm
- Pies con base de acero de 30 mm
- Tapas de los perfiles
- Tuercas con M8 para los pies en el carril de 8 mm del perfil.
- Tuercas con M5 para la base en el carril de 8 mm del perfil.

Se muestra a continuación la disposición del soporte sobre el que se montara la base del equipo utilizando segmentos de barra roscada de métrica 5 y tuercas de mariposa para facilitar la manipulación.



Figura 5-1: Disposición de los soportes.

En la foto también se muestran los segmentos de barra roscada, estos segmentos miden 30 mm y son roscados en su longitud total.

2. La base: Una vez colocados los soportes se procede a ajustar la posición de las tuercas de los perfiles para que encaje la base. Y ésta se asegura utilizando arandelas, para no dañar el material de la base, y tuercas en mariposa. También se ha tenido en cuenta la posición de los agujeros donde se colocaran las varillas de sujeción de la tapa, es decir, para tener una mejor vista sobre lo que ocurre dentro del cilindro se ha posicionado la base de manera que no interfiera en esa vista.



Figura 5-2: Sujeción de la base a los soportes.

3. Varillas de sujeción de la tapa a la base: Con el fin de dar firmeza a la unión entre la base, el cilindro y la tapa, se utilizan tres varillas roscadas (métrica 5) con una longitud de 330 mm. Además de una

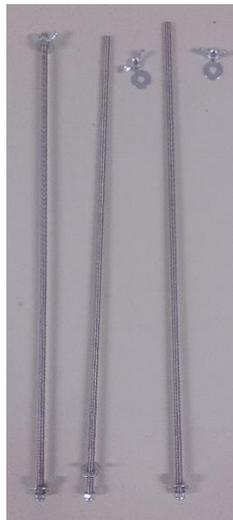


Figura 5-3: Elementos de sujeción de la tapa.

tuerca antiretorno, dos arandelas y una tuerca en mariposa para cada varilla.

Las tuercas antiretorno se colocaran en la parte inferior de la varilla bajo la base junto con una de las arandelas. Las mariposas en la parte superior, encima de la tapa ya que habrá que manipular varias veces la tapa durante la ejecución de la práctica.

4. Varilla del medidor de nivel: Para el medidor de nivel se ha utilizado una varilla de métrica 3 y 90 mm de longitud, que servirá como guía. Una vez sujeto a la tapa mediante dos tuercas se coloca el medidor y se ajusta la posición deseada mediante un tornillo con la siguiente disposición:

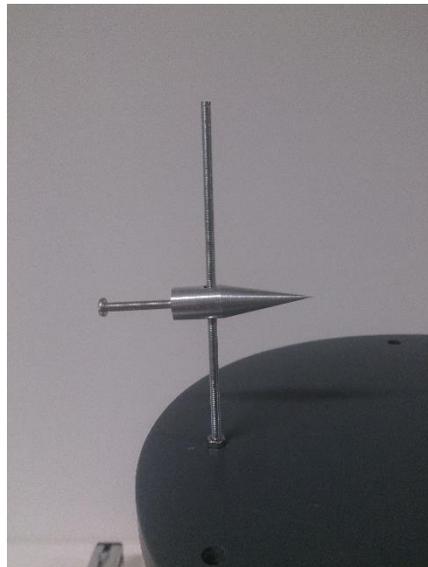


Figura 5-4: Medidor de nivel dispuesto sobre la tapa.

5. Ensamblaje de las últimas partes: Una vez se han cortado las varillas y dispuesto el medidor de nivel se ensambla todo el conjunto y solamente queda por añadir la varilla que sujetara el obstáculo y el plato portapesas.



Figura 5-5: Ensamblaje de las últimas partes.

6. Varilla de para obstáculos: La varilla utilizada en este elemento debe ser de métrica 5 para poder roscar los casquillos de los obstáculos y también roscar el plato portapesas. Bajo el plato se ha colocado el muelle que ira encima de la tapa, y en la parte inferior se rosca el obstáculo que se requiera.

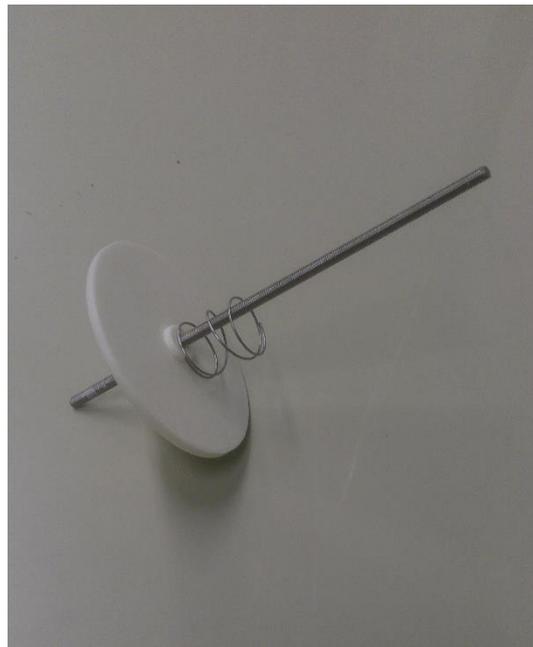


Figura 5-6: Varilla con plato portapesas y muelle.

Por último se muestra la disposición final a falta de los obstáculos:



Figura 5-7: Disposición final.

6. Pruebas y Resultados

Una vez se ha terminado con el montaje se ha procedido a comprobar que todo es correcto y hacer las pruebas pertinentes para comparar los resultados experimentales con los teóricos.

Primero se establece con qué pesos se va trabajar para cada uno de los obstáculos, se escogen pesos de 100g, 200g, 300g y 400g para los obstáculos de 90°, 120° y 180°. Para el obstáculo de 30° se utilizan pesos de 20g, 40g y 90g debido a que la fuerza que ejercerá el chorro sobre este obstáculo será considerablemente menor que sobre los otros obstáculos.

6.1 Comprobación del inyector con diferentes diámetros

Antes de proceder a la fabricación y posterior montaje de la boquilla o inyector, se han calculado los valores de caudales para pesos y diámetros de salida determinados.

Tabla 6-1. Diámetros y caudales para el obstáculo de 30°

Diámetro inyector (m)	Área salida inyector (m ²)	Densidad (kg/m ³)	Angulo de deflexión (°)	Masa (kg)	Velocidad esperada (m/s)	Caudal esperado (m ³ /s)	Caudal esperado (l/min)
0,007	3,8485E-05	1000	30	0,08	12,33	0,00047	28,47
0,007	3,8485E-05	1000	30	0,04	8,72	0,00034	20,13
0,007	3,8485E-05	1000	30	0,02	6,17	0,00024	14,24
0,006	2,8274E-05	1000	30	0,08	14,39	0,00041	24,41
0,006	2,8274E-05	1000	30	0,04	10,17	0,00029	17,26
0,006	2,8274E-05	1000	30	0,02	7,19	0,00020	12,20
0,005	1,9635E-05	1000	30	0,08	17,26	0,00034	20,34
0,005	1,9635E-05	1000	30	0,04	12,21	0,00024	14,38
0,005	1,9635E-05	1000	30	0,02	8,63	0,00017	10,17

Tabla 6-2. Diámetros y caudales para el obstáculo de 90°

Diámetro inyector (m)	Área salida inyector (m ²)	Densidad (kg/m ³)	Angulo de deflexión (°)	Masa (kg)	Velocidad esperada (m/s)	Caudal esperado (m ³ /s)	Caudal esperado (l/min)
0,007	3,8485E-05	1000	90	0,6	12,36	0,00048	28,54
0,007	3,8485E-05	1000	90	0,3	8,74	0,00034	20,18
0,007	3,8485E-05	1000	90	0,04	3,19	0,00012	7,37
0,006	2,8274E-05	1000	90	0,6	14,42	0,00041	24,46
0,006	2,8274E-05	1000	90	0,3	10,20	0,00029	17,30
0,006	2,8274E-05	1000	90	0,04	3,72	0,00011	6,32
0,005	1,9635E-05	1000	90	0,6	17,31	0,00034	20,39
0,005	1,9635E-05	1000	90	0,3	12,24	0,00024	14,42
0,005	1,9635E-05	1000	90	0,04	4,47	0,00009	5,26

Tabla 6-3. Diámetros y caudales para el obstáculo de 120°

Diámetro inyector (m)	Área salida inyector (m ²)	Densidad (kg/m ³)	Angulo de deflexión (°)	Masa (kg)	Velocidad esperada (m/s)	Caudal esperado (m ³ /s)	Caudal esperado (l/min)
0,007	3,8485E-05	1000	120	0,6	10,09	0,00039	23,30
0,007	3,8485E-05	1000	120	0,3	7,14	0,00027	16,48
0,007	3,8485E-05	1000	120	0,04	2,61	0,00010	6,02
0,006	2,8274E-05	1000	120	0,6	11,77	0,00033	19,98
0,006	2,8274E-05	1000	120	0,3	8,33	0,00024	14,12
0,006	2,8274E-05	1000	120	0,04	3,04	0,00009	5,16
0,005	1,9635E-05	1000	120	0,6	14,13	0,00028	16,65
0,005	1,9635E-05	1000	120	0,3	9,99	0,00020	11,77
0,005	1,9635E-05	1000	120	0,04	3,65	0,00007	4,30

Tabla 6-4. Diámetros y caudales para el obstáculo de 180°

Diámetro inyector (m)	Área salida inyector (m ²)	Densidad (kg/m ³)	Angulo de deflexión (°)	Masa (kg)	Velocidad esperada (m/s)	Caudal esperado (m ³ /s)	Caudal esperado (l/min)
0,007	3,8485E-05	1000	180	0,6	8,74	0,00034	20,18
0,007	3,8485E-05	1000	180	0,3	6,18	0,00024	14,27
0,007	3,8485E-05	1000	180	0,04	2,26	0,00009	5,21
0,006	2,8274E-05	1000	180	0,6	10,20	0,00029	17,30
0,006	2,8274E-05	1000	180	0,3	7,21	0,00020	12,23
0,006	2,8274E-05	1000	180	0,04	2,63	0,00007	4,47
0,005	1,9635E-05	1000	180	0,6	12,24	0,00024	14,42
0,005	1,9635E-05	1000	180	0,3	8,65	0,00017	10,19
0,005	1,9635E-05	1000	180	0,04	3,16	0,00006	3,72

Como se puede observar en las tablas, los valores de caudal no superan los 30l/min. La consecuencia de éste resultado es que se va a trabajar en un rango pequeño de caudales y con la bomba a bajas revoluciones. El banco por su parte incluye un sistema de bypass con el que regular el caudal será más preciso y no requiere de cambio de inyector.

6.2 Resultados teóricos con los pesos utilizados en las pruebas.

Como ya se ha explicado se ha optado por utilizar pesos de 100g, 200g, 300g y 400g para los obstáculos de 90°, 120° y 180°. Tomando el valor de diámetro del inyector elegido que ha sido de 8 mm se obtienen los siguientes resultados:

La velocidad se calcula a partir de la fórmula que se obtiene en el apartado teórico:

$$R_y = \rho \cdot A_0 \cdot v_0^2 \cdot [1 - \cos\theta]$$

Despejando el valor de la velocidad:

$$v_0 = \sqrt{\frac{R_y}{\rho \cdot A_0 \cdot [1 - \cos\theta]}}$$

Y por continuidad se obtiene el caudal:

$$Q = v_0 \cdot A_0$$

Tabla 6-5. Resultado teórico del caudal esperado

Masa (kg)	Ángulo de deflexión (grados)	Velocidad esperada (m/s)	Caudal esperado (m ³ /s)	Caudal esperado (l/min)
0,4	90	8,83096383	0,00044	26,63
0,3	90	7,64783901	0,00038	23,07
0,2	90	6,24443441	0,00031	18,83
0,1	90	4,41548191	0,00022	13,32
0,4	120	7,21045177	0,00036	21,75
0,3	120	6,24443441	0,00031	18,83
0,2	120	5,09855934	0,00026	15,38
0,1	120	3,60522589	0,00018	10,87
0,4	180	6,24443441	0,00031	18,83
0,3	180	5,40783883	0,00027	16,31
0,2	180	4,41548191	0,00022	13,32
0,1	180	3,1222172	0,00016	9,42

En el caso del obstáculo con ángulo de deflexión de 30° se utilizan pesos diferentes: 20g, 50g, 80g y 100g.

Tabla 6-6. Resultado teórico de caudal esperado para el obstáculo de 30°

Masa (kg)	Velocidad esperada (m/s)	Caudal esperado (m ³ /s)	Caudal esperado (l/min)
0,15	14,774	0,00074	44,56
0,1	12,063	0,00061	36,38
0,08	10,790	0,00054	32,54
0,05	8,530	0,00043	25,73

6.3 Pruebas con el equipo en funcionamiento

Se muestran a continuación en orden de ejecución los resultados obtenidos y algunas observaciones que se han tomado en el transcurso de dicha ejecución.

6.3.1 Obstáculo con ángulo de deflexión de 120°

Para cada caso diferente se han realizado tres mediciones para ver si existía alguna variación, y los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 6-7. Resultados experimentales con el obstáculo de 120°

Ángulo de deflexión (grados)	Masa (kg)	Tiempo de llenado (s)	Volumen de llenado (l)	Caudal (l/s)	Caudal (l/min)
120	0,4	21	8	0,381	22,85
		20			
		20			
	0,3	25	8	0,32	19,2
		25			
		25			
	0,2	32	8	0,25	15
		33			
		33			
	0,1	42	8	0,191	11,43
		43			
		43			

6.3.2 Obstáculo con ángulo de deflexión de 90°

Tabla 6-8. Resultados experimentales con el obstáculo de 90°

Ángulo de deflexión (grados)	Masa (kg)	Tiempo de llenado (s)	Volumen de llenado (l)	Caudal (l/s)	Caudal (l/min)
90	0,4	17	8	0,42	25,2631579
		16			
		17			
	0,3	19	8	0,33	20
		19			
		19			
	0,2	24	8	0,22	13,4579439
		24			
		24			
	0,1	37	8	0,17	10,29
		35			
		35			

6.3.3 Obstáculo con ángulo de deflexión de 180°

Tabla 6-9. Resultados experimentales con el obstáculo de 180°

Ángulo de deflexión (grados)	Masa (kg)	Tiempo de llenado (s)	Volumen de llenado (l)	Caudal (l/s)	Caudal (l/min)
180	0,4	24	8	0,34	20,28
		24			
		23			
	0,3	28	8	0,28	16,94
		29			
		28			
	0,2	37	8	0,21	12,74
		38			
		38			
	0,1	46	8	0,17	10,29
		47			
		47			

6.3.4 Obstáculo con ángulo de deflexión de 30°

Tabla 6-10. Resultados experimentales con el obstáculo de 30°

Ángulo de deflexión (grados)	Masa (kg)	Tiempo de llenado (s)	Volumen de llenado (l)	Caudal (l/s)	Caudal (l/min)
30	0,05	26	8	0,31	18,46
		26			
		26			
	0,08	21	8	0,38	22,86
		21			
		21			
	0,1	19	8	0,42	25,26
		19			
		19			
	0,15	15	8	0,53	32
		15			
		15			

6.4 Comparación entre resultados teóricos y experimentales

Para realizar la comparación entre los resultados, primero se obtendrá el error relativo para cada caso y posteriormente se realizarán unas gráficas que relacionan fuerza respecto de la velocidad de salida al cuadrado.

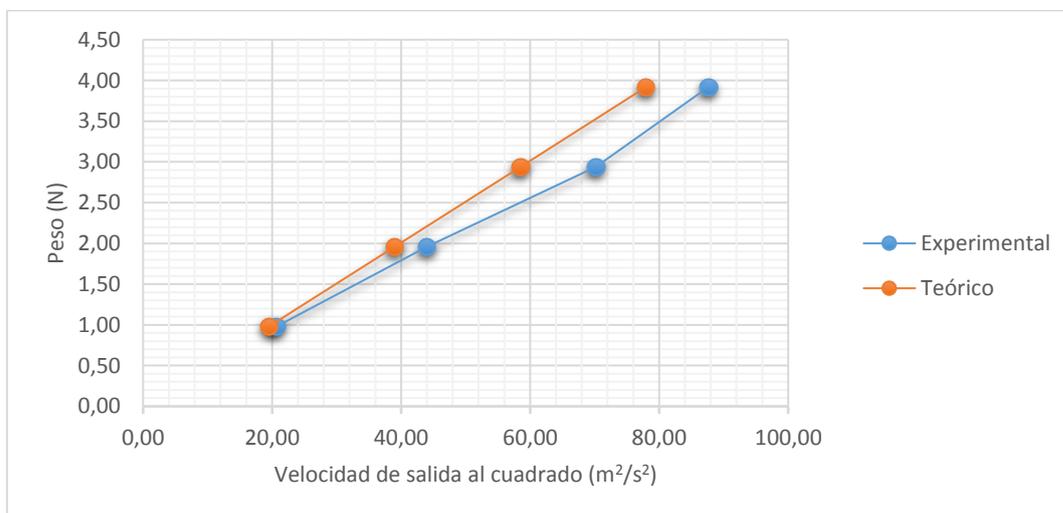
En la tabla que se muestra a continuación se pueden ver los resultados de fuerza experimental y teórica, y el error relativo obtenido. La fuerza experimental viene definida por la fórmula obtenida en el apartado 2.2. Y el error relativo se calcula como:

$$Error = \frac{|Resultado Teórico - Resultado Experimental|}{Resultado Teórico}$$

Tabla 6-11. Comparación mediante error relativo

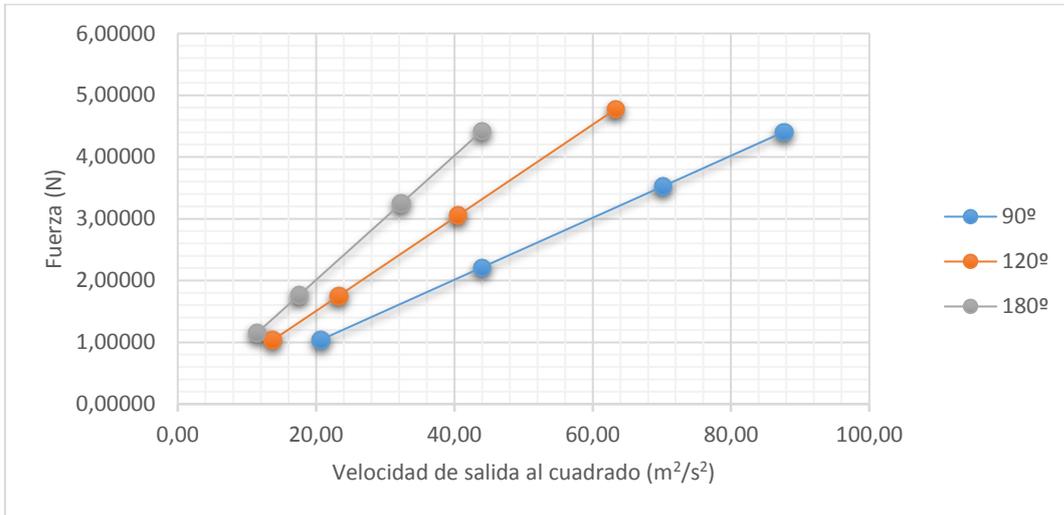
Ángulo de deflexión	Masa	Volumen	Tiempo	Fuerza	Fuerza Teórica	Error relativo
30	0,05	8	26	0,25234	0,49	49%
30	0,08	8	21	0,38681	0,784	51%
30	0,1	8	19	0,47253	0,98	52%
30	0,15	8	15	0,75814	1,47	48%
90	0,1	8	35	1,03938	0,98	6%
90	0,2	8	24	2,21049	1,96	13%
90	0,3	8	19	3,52698	2,94	20%
90	0,4	8	17	4,40567	3,92	12%
120	0,1	8	43	1,03291	0,98	5%
120	0,2	8	33	1,75377	1,96	11%
120	0,3	8	25	3,05577	2,94	4%
120	0,4	8	20	4,77465	3,92	22%
180	0,1	8	47	1,15277	0,98	18%
180	0,2	8	38	1,76349	1,96	10%
180	0,3	8	28	3,24806	2,94	10%
180	0,4	8	24	4,42097	3,92	13%

Otra forma de analizar los resultados es comparar la curva obtenida de peso en relación a la velocidad de salida al cuadrado, para ambos casos, experimental y teórico. Se ha realizado la gráfica para el obstáculo de 90°.



Gráfica 6-1: Peso respecto de la velocidad de salida al cuadrado para el obstáculo de 90°

Y por último se ha realizado una gráfica para ver la diferencia entre los resultados obtenidos para los obstáculos con ángulo de deflexión de 90°, 120° y 180°. En este caso se grafica la fuerza ejercida por el chorro respecto de la velocidad de salida al cuadrado.



Gráfica 6-2: Comparación de resultados para los tres obstáculos

7. Conclusiones

Este proyecto comenzó con el objetivo de implementar un nuevo banco de ensayo en el laboratorio de mecánica de fluidos y estudiar el entorno teórico en el que trabaja esta práctica, y ha terminado añadiendo conocimientos en varios de los ámbitos en los que se ha trabajado. El más importante, se puede decir que el método operativo de la gestión del montaje de este proyecto se podría asemejar al de la construcción de un prototipo, ya que trabaja los mismos aspectos de planificación, diseño, construcción y pruebas de funcionamiento.

Una parte muy importante del diseño y construcción de parte del material se ha basado en la utilización de la técnica de impresión en 3D. Esto ha servido como introducción a éste campo que actualmente está evolucionando rápidamente. Por lo que no solo se han tratado temas específicamente relacionados con la Mecánica de Fluidos si no que gracias a la necesidad de cierto material se ha podido expandir a otros campos.

8. Agradecimientos

Dar las gracias al departamento de Ingeniería Nuclear y Mecánica de Fluidos. Concretamente a Gorka Alberro, tutor del proyecto, por la ayuda y dedicación prestada durante la realización de todo el proyecto. Y a Julián Urdangarín, técnico de laboratorio, igualmente por la ayuda prestada.

Agradecer también Victoriano Domínguez del departamento de Tecnología Electrónica por la ayuda, el material y las enseñanzas en lo relacionado a la impresión 3D.

ANEXO I: Presupuesto

El presupuesto se ha realizado en base al coste establecido por la empresa que ha proporcionado cada material y sin tener en cuenta el precio de trabajo, únicamente se muestra el coste del material requerido para el montaje.

Cantidad	Concepto	Precio Unitario	Importe €
1	Obstáculo 30° (ABS) Impresión 3D	15	15,00
1	Obstáculo 90° (ABS) Impresión 3D	15	15,00
1	Obstáculo 120° (ABS) Impresión 3D	15	15,00
1	Obstáculo 180° (ABS) Impresión 3D	20	20,00
1	Plato Indicador (ABS) Impresión 3D	15	15,00
1	Inyector (ABS) Impresión 3D	35	35,00
1	Tubo de Metacrilato Ø150-144 mm	19,79	19,79
1	Tapa PVC compacto Gris	96,29	96,29
1	Base PVC compacto Gris	105	105,00
2	Perfil Aluminio 30x30 mm ranura 8 mm	4,93	9,86
4	Tuerca redonda bola R8 M.8	0,67	2,68
4	Tapa perfil 30x30 mm	0,52	2,08
4	Pie base de acero M8x30	2,94	11,76
4	Tuerca redonda bola R8 M.5	0,67	2,68
1	Varilla roscada 1m de M3	0,62	0,62
1	2 Abrazaderas de acero Ø 24-36 mm	1,23	1,23
1	Arandelas de Ø5 mm	1,61	1,61
1	Tuercas autobloqueantes M5	1,61	1,61
1	4 Muelles acero Ø27 mm	1,78	1,78
1	Tuercas mariposa M5	2,27	2,27
2	Varilla roscada de M5 mm	1,28	2,56
1	Esmalte blanco 125 ml	3,47	3,47
1	Pincel plano	1,45	1,45
	Total		381,74
	IVA (21%)		80,17
	TOTAL		461,91

ANEXO II: Guión de Prácticas

9. ANÁLISIS DE FUERZAS DE CHORROS SOBRE OBSTÁCULOS (Tema XX)

9.1 OBJETO DEL ENSAYO

Análisis de la fuerza que ejerce un chorro sobre diferentes obstáculos en concordancia con el teorema de la cantidad de movimiento de un flujo.

9.2 FUNDAMENTO TEÓRICO

Aplicación del Teorema de la Cantidad de Movimiento: se analizará la fuerza resultante del cambio de dirección de un flujo.

9.3 MATERIAL A UTILIZAR

- Instalación hidráulica provista de una bomba y una válvula para el control de caudal mediante una válvula.
- Diferentes obstáculos que actúan como superficies de impacto (ángulos de salida de 30°, 90°, 120° y 180°).
- Un cronómetro.
- Pesas calibradas y ranuradas de diferentes pesos.

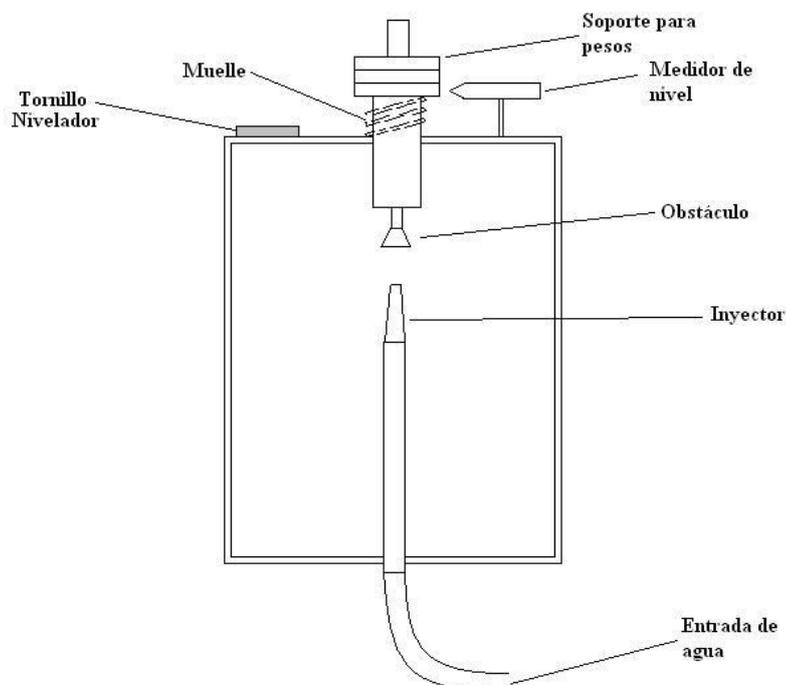


Figura 9-1. Esquema del dispositivo de impacto de chorros sobre obstáculos



Figura 9-2: Equipo en funcionamiento

9.4 MÉTODO OPERATORIO

1. Abrir la tapa superior del aparato y colocar uno de los obstáculos disponibles, identificándolo mediante su ángulo de deflexión (30°, 90°, 120°, 180°). Anotar el dato en la tabla de toma de datos (Tabla 1). Una vez hecho esto, volver a cerrar la tapa superior.
2. Ajustar la altura del medidor de nivel con el soporte de pesos, asegurándose de que se ha hecho bien, haciendo oscilar el soporte verticalmente, y observando que se sigue manteniendo en la posición en la que se había colocado el medidor de nivel.
3. Colocar un peso (en distintos ensayos se irán colocando pesos de 0.04kg, 0.3kg y 0.6kg para los obstáculos con salida a 90°, 120°, 180° y pesos de 0.02kg y 0.09kg para el obstáculo de 30°), encender la bomba (asegurándose antes de que la válvula de control esté cerrada) y abrir gradualmente la válvula, hasta que se logre el equilibrio estático (el medidor de nivel vuelve a estar alineado con el soporte).
4. Medir el caudal $Q=V/t$. El volumen (litros) se medirá a través del tanque volumétrico (cerrando el tapón), y el tiempo mediante el cronómetro.

5. Repetir este procedimiento para los distintos pesos, y cambiando el obstáculo (hasta completarlos todos). Cuando se vaya a apagar la bomba, para cambiar el obstáculo, o para terminar el ensayo, de debe cerrar primero la válvula.

9.5 MEDIAS EXPERIMENTALES

La fuerza ejercida por el chorro sobre el obstáculo se obtiene teóricamente desarrollando la ecuación de cantidad de movimiento y equivale a:

$$R = \rho \cdot A_0 \cdot U_0^2 \cdot (1 - \cos\theta)$$

Donde:

- R= fuerza producida por el chorro
- ρ = densidad del fluido de trabajo
- A_0 = Área de salida del inyector
- U_0 =Velocidad de salida del chorro
- θ = Angulo de deflexión (30°,90°,120° o 180°)

Datos: Diámetro de salida del inyector $d=8$ mm

Esta fuerza producida por el chorro estará en equilibrio con el peso colocado (W), por lo que por simple equilibrio de fuerzas verticales $W=R$.

- Para los obstáculos de 90°, 120° y 180°, se medirá el caudal con pesos de 0.04kg, 0.3kg y 0.6kg.
- Para el obstáculo de 30° se medirá el caudal con pesos de 0.02kg y 0.09kg. Esto se debe a que, como se comprobará, la fuerza ejercida por el chorro es considerablemente más pequeña.

9.6 TRABAJO DE GABINETE

Se deberá calcular el caudal volumétrico teórico mediante la siguiente tabla, y con la ayuda de una hoja de cálculo, con los datos que se disponen antes de la realización de la práctica.

Tabla 9-1. Cálculos teóricos del caudal volumétrico esperado para el obstáculo de 90° y los pesos de 40g, 300g y 600g

Masa aplicada (kg)	Tipo de obstáculo (grados)	Caudal Volumétrico esperado Q (m ³ /s)
0.04	90	
0.3	90	
0.6	90	

Trazar la gráfica teórica del peso en función de la velocidad de salida del inyector al cuadrado

ANEXO III: Planos