



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO, FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN TUBO DE VENTURI PARA LA REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS DOCENTES

Alumno: Sergio Castillo Maya

Tutor: Prof. D. Mario Miró Barnés

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Noviembre, 2024



Índice

Índice de contenido	3
1. Introducción	6
2. Objetivos	7
3. Fundamentos.....	8
3.1. Antecedentes	9
3.2. Anteproyecto.....	11
3.3. Normativa.....	12
4. Metodología.....	13
4.1. Introducción teórica.....	13
4.1.1. Coeficiente de pérdidas.....	14
4.1.2. Coeficiente de Descarga.....	15
4.2. Diseño Asistido por Ordenador (CAD).....	17
4.2.1. Autodesk Inventor	17
4.2.2. Venturi Circular	19
4.2.3. Venturi Rectangular	22
4.2.4. Bastidor.....	24
4.2.4.1. Soportes del bastidor.....	25
4.2.4.2. Escuadras del bastidor	26
4.2.5. Colector inferior.....	28
4.2.6. Colector superior.....	29
4.2.7. Conjunto final	30
4.2.7.1. Tubos de medición	30
4.2.7.2. Soportes Venturi.....	30
4.2.7.3. Fontanería.....	32
4.3. Dinámica de fluidos computacional (CFD).....	35
4.3.1. Ansys Workbench	35
4.3.2. Procedimiento	36
4.4. Proceso de fabricación.....	39
4.4.1. Descripción de equipos.....	40
4.4.1.1. Centro de Mecanizado	40
4.4.1.2. Sierra de Cinta	40
4.4.1.3. Grabadora láser	41
4.4.1.4. Herramientas.....	41
4.4.2. Venturi	42
4.4.2.1. Mordaza Auxiliar.....	47



4.4.2.2.	Soporte para bastidor	47
4.4.3.	Bastidor.....	48
4.4.3.1.	Taco de soportes.....	49
4.4.4.	Colector inferior.....	49
4.4.5.	Colector superior.....	50
4.4.6.	Otros elementos.....	51
4.5.	Programación.....	52
4.6.	Procedimiento de ensayos	53
4.7.	Ensayos experimentales	56
4.7.1.	Venturi Rectangular	56
4.7.2.	Venturi Circular	57
4.7.2.1.	Cavitación	57
4.7.3.	Manómetro digital.....	58
5.	Cálculos.....	61
5.1.	Cálculos experimentales de presión.....	61
5.2.	Cálculos experimentales del Coeficiente de descarga y pérdidas	62
6.	Resultados	63
6.1.	Resultados experimentales	63
6.1.1.	Venturi Rectangular	63
6.1.2.	Venturi Circular	67
6.1.3.	Coeficiente de descarga y pérdidas	73
6.1.3.1.	Venturi rectangular	73
6.1.3.2.	Venturi circular	74
6.2.	Resultados de Ansys Fluent.....	75
6.2.1.	Venturi Rectangular	75
6.2.2.	Venturi Circular	77
6.3.	Discusión de resultados	80
7.	Trabajo futuro	81
8.	Conclusiones	82
9.	Bibliografía	83
10.	Planos	84



Índice de contenido

Ilustración 1. Zonas del tubo de Venturi	6
Ilustración 2. Sistema de Venturi	7
Ilustración 3. Bloques TFG	8
Ilustración 4. Conservación de la masa	9
Ilustración 5. Conservación de la energía	9
Ilustración 6. Presión diferencial	10
Ilustración 7. Modelo de instalación de Venturi	11
Ilustración 8. Tocho de metacrilato	11
Ilustración 9. Volumen de control de una garganta	13
Ilustración 10. Puntos para la obtención de K	14
Ilustración 11. Puntos para la obtención de Cd	15
Ilustración 12. Pantalla de inicio Autodesk Inventor	17
Ilustración 13. Esquema PBS	17
Ilustración 14. Interfaz Autodesk Inventor	18
Ilustración 15. Extrusión inicial	19
Ilustración 16. Diseño final	19
Ilustración 17. Diseño final	20
Ilustración 18. Acople Circular	20
Ilustración 19. Solevación	21
Ilustración 20. Interfaz módulo ensamblaje Autodesk Inventor	21
Ilustración 21. Ensamblaje final Venturi circular	22
Ilustración 22. Desarrollo Venturi circular	22
Ilustración 23. Diseño final	23
Ilustración 24. Acople rectangular	23
Ilustración 25. Ensamblaje final Venturi rectangular	24
Ilustración 26. Planta del perfil	24
Ilustración 27. Planta del perfil con boceto en Autodesk Inventor	25
Ilustración 28. Diseño final bastidor	25
Ilustración 29. Desarrollo soporte	26
Ilustración 30. Desarrollo escuadra	26
Ilustración 31. Entorno escuadra	27
Ilustración 32. Menú vista Autodesk Inventor	27
Ilustración 33. Centro de gravedad bastidor	27
Ilustración 34. Conjunto final bastidor	28
Ilustración 35. Diseño colector inferior	28
Ilustración 36. Ensamblaje colector inferior	29
Ilustración 37. Diseño colector superior	29
Ilustración 38. Conjunto colector superior	30
Ilustración 39. Entorno tubos de medición	30
Ilustración 40. Diseño soporte Venturi	31
Ilustración 41. Entorno del soporte Venturi	31
Ilustración 42. Entorno del soporte de Venturi II	31
Ilustración 43. Tubos neumáticos	32
Ilustración 44. Entorno adaptadores a manguera de entrada	32



Ilustración 45. Entorno adaptadores a manguera de salida	33
Ilustración 46. Ensamblaje final	34
Ilustración 47. Interfaz Ansys Workbench	35
Ilustración 48. Boceto Venturi	36
Ilustración 49. Diseño Venturi circular	36
Ilustración 50. Malla Venturi rectangular	36
Ilustración 51. Malla Venturi circular	37
Ilustración 52. Pantalla Ansys Fluent	37
Ilustración 53. Volumen de control Venturi rectangular	37
Ilustración 54. Método de solución	39
Ilustración 55. Centro de mecanizado	40
Ilustración 56. Sierra de cinta	41
Ilustración 57. Grabadora láser	41
Ilustración 58. Roscamachos	42
Ilustración 59. Fresas del laboratorio	42
Ilustración 60. Polimetacrilato de Metilo	42
Ilustración 61. Tocho de metacrilato	43
Ilustración 62. Ejes Centro de mecanizado	43
Ilustración 63. Movimiento de corte	44
Ilustración 64. Movimiento de avance	44
Ilustración 65. Fresado Venturi	45
Ilustración 66. Fresa de punta esférica	45
Ilustración 67. Taladrado Venturi	45
Ilustración 68. Roscado manual	46
Ilustración 69. Venturi fabricados	46
Ilustración 70. Proceso de fabricación de acople	47
Ilustración 71. Mordaza auxiliar	47
Ilustración 72. Soporte bastidor	48
Ilustración 73. Perfil de aluminio ranura en T	48
Ilustración 74. Taco para soportes	49
Ilustración 75. Fabricación colector inferior	50
Ilustración 76. Roscado colector inferior	50
Ilustración 77. Fabricación colector superior	51
Ilustración 78. Colectores fabricados	51
Ilustración 79. KPI del proceso de fabricación	52
Ilustración 80. Banco hidráulico	53
Ilustración 81. Conexión de entrada Venturi	53
Ilustración 82. Conexión salida Venturi	54
Ilustración 83. Bomba centrífuga	54
Ilustración 84. Interruptores bomba centrífuga	54
Ilustración 85. Rotámetro	55
Ilustración 86. Sistema	55
Ilustración 87. Tabla de toma datos	56
Ilustración 88. Punto de toma de datos	56
Ilustración 89. Presiones del ensayo	57
Ilustración 90. Cavitación	58
Ilustración 91. Diagrama de fases del agua	58
Ilustración 92. Manómetro digital	59
Ilustración 93. Tomas manómetro digital	59



Ilustración 94.Acoples para manómetro	60
Ilustración 95.Tubo de Pitot.....	61
Ilustración 96.Distribución velocidades Venturi rectangular	66
Ilustración 97.Distribución de presiones estáticas Venturi rectangular	66
Ilustración 98.Distribución de presiones dinámica Venturi rectangular	66
Ilustración 99.Distribución de presiones Venturi rectangular	67
Ilustración 100.Distribución de presiones totales Venturi rectangular	67
Ilustración 101.Distribucion de velocidades Venturi circular	71
Ilustración 102.Distribución de presiones estáticas Venturi circular	71
Ilustración 103.Distribución de presiones dinámicas Venturi circular	71
Ilustración 104.Distribución de presiones Venturi circular	72
Ilustración 105.Distribución de presiones totales Venturi circular	72
Ilustración 106.Diagrama de velocidades Venturi rectangular	75
Ilustración 107.Diagrama de presiones estáticas Venturi rectangular	75
Ilustración 108.Diagrama de Presiones dinámicas Venturi rectangular	75
Ilustración 109.Diagrama de presiones Venturi rectangular	75
Ilustración 110.Curva de velocidad Venturi circular	76
Ilustración 111.Curva de presión estática Venturi rectangular	76
Ilustración 112.Curva de presión dinámica Venturi rectangular	76
Ilustración 113.Curva de presión total Venturi rectangular	77
Ilustración 114.Diagrama de velocidades Venturi Circular	77
Ilustración 115.Diagrama de presiones estáticas Venturi Circular	77
Ilustración 116.Diagrama de presiones dinámicas Venturi circular	78
Ilustración 117.Diagrama de presiones totales Venturi circular	78
Ilustración 118.Curva de velocidad Venturi circular	78
Ilustración 119.Curva presión estática Venturi Circular	79
Ilustración 120.Curva presión dinámica Venturi circular	79
Ilustración 121.Curva presión total Venturi circular	80

1. Introducción

La Mecánica de fluidos se sitúa en el centro de numerosos campos de ciencia e ingeniería, sirviendo de arco entre ambas disciplinas. Los fluidos aparecen en una gran parte de procesos naturales y prácticamente, en todas las aplicaciones tecnológicas, ya sea para el transporte de cualquier líquido o gas a través de una instalación, la carga aerodinámica de un vehículo de competición, refrigeración de elementos mecánicos y electrónicos, etc.

Existen también aplicaciones en ramas como la medicina, como puede ser medir el flujo de aire en los pulmones o el caudal de sangre que bombea el corazón a nuestras venas; la meteorología, predecir el tiempo por medio de la atmósfera y los fluidos que contiene, en resumen, son muchas las aplicaciones donde aparece la mecánica de fluidos, la cual ha sido objeto de estudio intenso durante los últimos tres siglos.

La base de la mecánica de fluidos fue la experimentación, no fue hasta la época de la Ilustración, que abarca los siglos XVII y XVIII en Europa, en la que empiezan a emerger los primeros conceptos y teorías físicas de dichos experimentos. En 1738 Daniel Bernoulli estableció las leyes aplicables a fluidos no viscosos utilizando el principio de conservación de la energía mecánica, con la llegada del cálculo diferencial, Jean le Rond D'Alembert expuso el principio de presión interna de un fluido, campo de velocidades y derivadas parciales aplicada a los fluidos, Leonhard Euler completó luego el análisis de D'Alembert de la presión interna y las ecuaciones de dinámica de fluidos incompresibles, finalmente, Henri Navier y luego George Gabriel Stokes consiguieron dar explicación a paradojas de físicos anteriores con sus ecuaciones, las ecuaciones de Navier-Stokes, que cambiaran la historia de la mecánica de fluidos.

El análisis teórico del movimiento del fluido se basa en principios de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía, este trabajo fin de grado se centra en las ecuaciones de conservación de la masa y conservación de la energía mediante el tubo de Venturi.

El tubo de Venturi, creado por el físico italiano Giovanni Battista Venturi en el 1797, consiste en un tubo con una convergencia de su sección transversal, en la que el fluido aumenta su velocidad y disminuye la presión de forma progresiva, hasta llegar a la llamada garganta, en la que la sección es mínima, donde la presión alcanza los valores mínimos y la velocidad máximos, finalmente la sección transversal sufre un cambio de manera divergente, en la que la velocidad disminuye y la presión aumenta. El tubo de Venturi sirve, además de para otras aplicaciones, para la medición del gasto del fluido, caudal, que circula por el sistema.

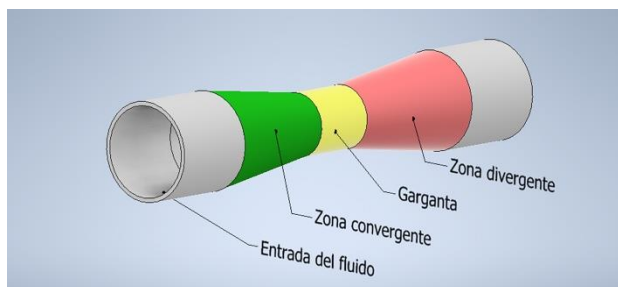


Ilustración 1. Zonas del tubo de Venturi

2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado consiste en llevar a cabo el diseño y posterior fabricación de un dispositivo de medición de caudal por presiones diferenciales tipo Venturi. Una vez finalizado el trabajo, el medidor quedará disponible en los laboratorios del a EPS de Linares para su utilización en prácticas docentes. Durante la búsqueda de este objetivo se respetarán y cumplirán las normas de aplicación a todo el proceso de diseño y fabricación.

También se plantean objetivos personales, tales como aplicar los conocimientos obtenidos durante estos años de aprendizaje pasando de una idea a algo que puedan tocar mis manos, en otras palabras, convertir los estudios de ingeniería adquiridos en algo tangible e incrementar aún más el conocimiento profundizando en un único tema. Todo lo dicho supone dar un salto en el ámbito académico, cerrando una etapa con lo que creo que puede ser el mejor Trabajo Fin de Grado para un estudiante de ingeniería, esto es, la combinación de teoría, práctica y experimentación.



Ilustración 2. Sistema de Venturi

3. Fundamentos

Como todo proyecto de Ingeniería, se precisa de un estudio previo, análisis y valoración de propuestas, planificación y validación antes de comenzar con las tareas, por lo que se van a plasmar a continuación todos los detalles a tener en cuenta, como el anteproyecto y las bases del mismo.

La herramienta de diseño será Autodesk Inventor, es un software que pertenece a la rama CAD (Computer Aided Design o Diseño Asistido por Ordenador), con dicha herramienta podremos modelar todas y cada una de las partes del conjunto del tubo de Venturi, tanto en 3D como en 2D. Además, se podrá simular la parte de la fabricación con otro software de la familia Autodesk, llamado Fusion 360, una herramienta vanguardista que está revolucionando la ingeniería, tanto a nivel industrial como particular, debido a su relativa sencillez de uso y sus altas prestaciones.

Para la etapa de fabricación, se usarán las herramientas disponibles en el laboratorio-taller de máquinas-herramientas de la Escuela Politécnica Superior de Linares, el cual cuenta principalmente con un CNC (Computer Numerical Control o Control Numérico por Ordenador).

La simulación computacional, que inicialmente no constaba entre los objetivos de este TFG, a pesar de lo cual se ha introducido en él para enriquecerlo aún más, estará abordada por el software llamado ANSYS FLUENT, que entre otras cosas se utiliza para modelar el flujo de fluidos, o también llamado CFD (Computational Fluid Dynamics).



Ilustración 3. Bloques TFG

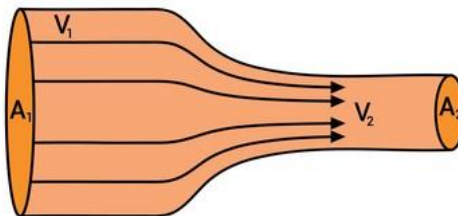
3.1. Antecedentes

La administración y control del flujo de fluidos ha sido fundamental en el desarrollo de distintas disciplinas, desde la agricultura y la gestión del agua hasta la ingeniería industrial y la medicina moderna. A medida que las civilizaciones avanzaban, también lo hacía la complejidad de sus necesidades, demandando una administración del flujo cada vez más precisa y eficiente.

El tubo de Venturi se inventó principalmente para estudiar y medir el flujo de líquidos en conductos cerrados y entender cómo cambia la presión y velocidad de un fluido en movimiento al pasar por una sección más estrecha.

Los fundamentos teóricos del tubo de Venturi son:

- Ecuaciones de conservación:



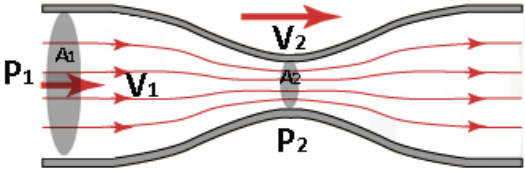
$$A_1 V_1 = V_2 A_2$$

Ilustración 4. Conservación de la masa

- Ecuación de Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \cancel{\rho g h_1} = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \cancel{\rho g h_2}$$

Presión Energía Cinética Energía Potencial



$A_1 > A_2$
 $P_1 > P_2$
 $V_1 < V_2$

Ilustración 5. Conservación de la energía

- Principio de presión diferencial:

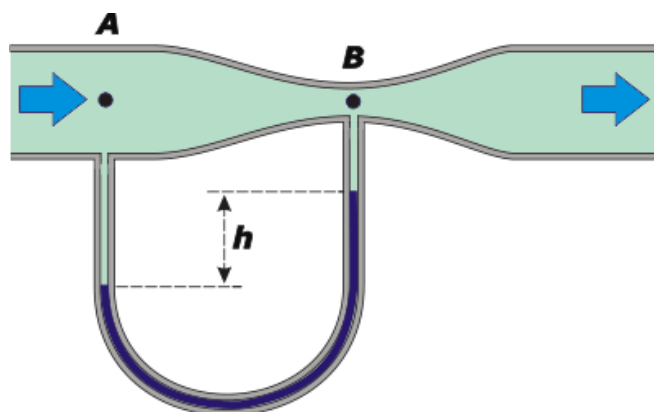


Ilustración 6. Presión diferencial

La planificación del proyecto va a ser plasmada en un KPI (Key Performance Indicator o indicador clave de rendimiento) en un archivo Excel, el cual contendrá todas las fases del proyecto dividido por horas y tarea a realizar, esta parte del proyecto fundamental para llevar un orden exhaustivo del mismo, así como la norma vigente para la realización del proyecto.

El seguimiento del proyecto va a ser controlado por el Tutor del Trabajo de Fin de Grado, el cual va a ser el encargado de aprobar y valorar las propuestas del alumno.

Todo el conjunto va a ser diseñado en la herramienta CAD, por lo que cada pieza y conjunto va a contar con su plano acotado en 2D según normativa.

El conformado y ensamblaje del conjunto va a ser supervisado por el Titular del laboratorio de fabricación de la Escuela Superior de Linares y tutor del Trabajo fin de Grado.

Los ensayos realizados al Tubo de Venturi van a seguir unos pasos para el correcto funcionamiento del mismo, cerciorando una correcta praxis para que cualquier miembro de la Escuela pueda usar el equipo cuando lo precise.

El coste económico de la fabricación será cubierto por el Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera de la Universidad de Jaén. En todo momento, como en cualquier proyecto de ingeniería, se buscará minimizar el gasto de material, tiempo y resto de recursos necesarios para su ejecución; sin que esto menoscabe la utilidad y funcionalidad del trabajo.

3.2. Anteproyecto

Pese a que el proyecto parta de cero, van a ser varios los tubos que van a servir de referencia, el que más, un Tubo de Venturi que se encuentra en el laboratorio de fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Linares.



Ilustración 7. Modelo de instalación de Venturi

Para la etapa de diseño se va a tener en cuenta lógicamente la etapa de fabricación, puesto que las herramientas usadas para la fabricación tienen ciertas limitaciones, así como para la posterior fase experimental.

Como punto de partida contaremos con 4 cuatro perfiles iguales de metacrilato facilitados por la Escuela Politécnica Superior de Jaén., En torno a estos perfiles va a girar el resto del diseño del equipo, por lo que son los que van a restringir todo el TFG. En la siguiente figura se observa el material bruto para una parte de los tubos de Venturi:



Ilustración 8. Tocho de metacrilato

Una primera restricción apareció a la hora de conformar dichos perfiles, puesto que el CNC tiene una altura máxima de corte, por lo que el husillo no podría entrar, y de hacerlo podría acarrear problemas a la máquina e incluso a la integridad del operario, por lo que se partió de la idea de hacer el Venturi por mitades, de esta forma el corte de la pieza no suponía riesgo por ningún lado.

Al tener cuatro perfiles surgió la idea de crear dos Venturi, uno de sección circular y otro de sección rectangular, la cual siguió adelante y el proyecto cuenta con dos Venturi de distinta sección.

3.3. Normativa

La normativa utilizada en este Trabajo Fin de Grado es en gran parte la impuesta por la escuela, entre ellas:

- UNE-ISO 690:2013. Para la citación de bibliografía y referencias a revistas.
- UNE-EN ISO 5457:2000/A1:2010. Para la acotación de planos, tamaños de escala, planos, vistas etc.

Además, alguna normativa como puede ser:

- ISO 16792:2021. Para el diseño asistido por ordenador.
- ISO 5167-1:2022. Para la medición de caudal por diferencia de presiones.
- ISO 5167-4:2022. Este capítulo incluye el tubo de Venturi para la medición de caudales.

4. Metodología

4.1. Introducción teórica

Teóricamente, el tubo de Venturi se caracteriza principalmente por dos parámetros. Dado que hay pérdidas de carga, ya sea por rozamiento, calor disipado, etc.... a lo largo del volumen de control, existe un Coeficiente (K), que tiene en cuenta dichas pérdidas, por otro lado, existirá otro coeficiente que relacione la diferencia entre el Caudal ideal y el real, llamado Coeficiente de descarga (Cd).

Estos coeficientes nacen en parte en relación a la ecuación de conservación de la energía o principio de Bernoulli entre dos puntos, la cual se expresa de la siguiente forma:

$$P_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 = CTE \quad (1)$$

En la que el primer término es la presión, el segundo es la energía potencial y el tercero la cinética.

Existe una continuidad entre los puntos uno y dos, los cuales también se pueden ver reflejados en la ecuación de Continuidad de Conservación de la masa, la cual pertenece a las leyes de conservación del movimiento de los fluidos, dice así:

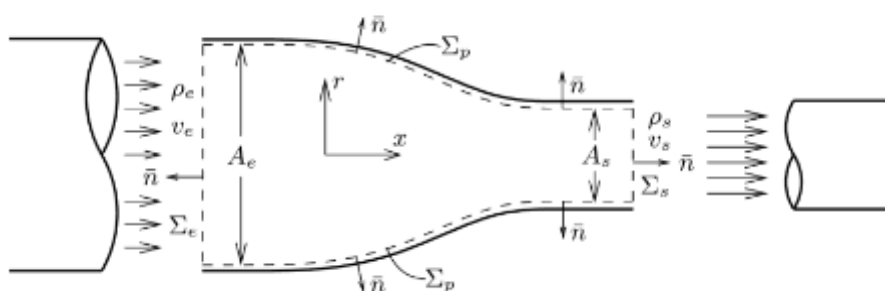


Ilustración 9. Volumen de control de una garganta

$$\frac{d}{dt} \left[\int_{V_c(t)} \rho \, dv \right] = \int_{\Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_p} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) \, d\sigma \quad (2)$$

De dónde se puede deducir que el primer término es cero ya que nos encontramos ante un caso de flujo estacionario, en el que volumen de control es constante y la velocidad en la pared es cero por la condición de adherencia, queda lo siguiente:

$$\frac{d}{dt} \left[\int_{v_c(t)} \rho \, dv \right] = \int_{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_p} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) \, d\sigma \quad (3)$$

$$\int_{\varepsilon_1} \rho_1 (\vec{v}_1 \cdot \vec{n}) \, d\sigma = \int_{\varepsilon_2} \rho_2 (\vec{v}_2 \cdot \vec{n}) \, d\sigma \quad (4)$$

Quedando finalmente:

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 \quad (5)$$

$$G_1 = G_2 \quad (6)$$

Puesto que las densidades en ambos puntos son las mismas, la ecuación se podría resumir en:

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad (7)$$

Quiere decir, que el caudal en el punto uno va a ser el mismo que en el punto dos.

4.1.1. Coeficiente de pérdidas

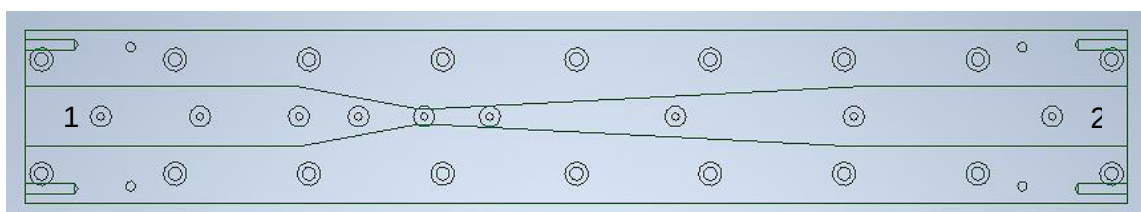


Ilustración 10. Puntos para la obtención de K

Entre estos dos puntos de misma sección de medición del sistema estudiado (y para agilizar la demostración), existe una pérdida de carga, que, traducido en la ecuación de conservación de la energía o ecuación de Bernoulli, queda tal que así:

$$P_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \Delta P_{1-2} \quad (8)$$

$$K = \frac{\Delta P_{1-2}}{\frac{1}{2} \rho v_2^2} \quad (9)$$

$$P_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \cdot (1 + K) \quad (10)$$

Considerando alturas y velocidades iguales, el Coeficiente de Pérdidas, K, es igual a:

$$K = \frac{P_1 - P_2}{\frac{1}{2} \rho v_2^2} \quad (Pa) \quad (11)$$

4.1.2. Coeficiente de Descarga

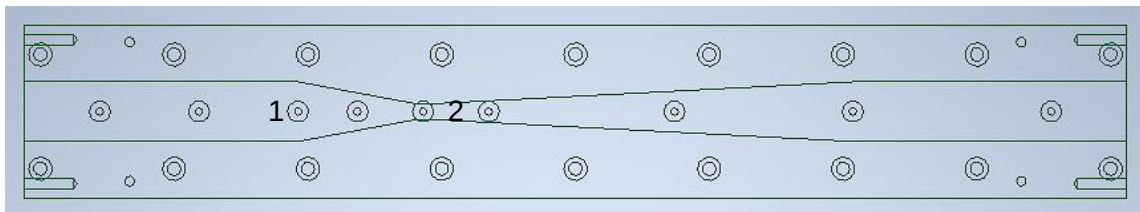


Ilustración 11. Puntos para la obtención de Cd

Para este caso es más conveniente usar los dos puntos marcados, como se puede ver a continuación:

$$P_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (12)$$

Para el estado ideal de Bernoulli, sin pérdidas y conforme a la ecuación de conservación de la masa:

$$Q_1 = Q_2 \quad (13)$$

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad (14)$$

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} \quad (15)$$

$$v_2 = \frac{Q}{A_2} \quad (16)$$

Aplicando esto a la ecuación de Bernoulli, queda:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho\left(\frac{Q}{A_1}\right)^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho\left(\frac{Q}{A_2}\right)^2 \quad (17)$$

Simplificando:

$$Q = \frac{\sqrt{2 \cdot (P_1 - P_2)}}{\sqrt{\rho \cdot \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}\right)}} \quad (18)$$

Por lo que, para un estado real, hay que añadir el Coeficiente de descarga, C_d , a la relación:

$$Q = C_d \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot (P_1 - P_2)}}{\sqrt{\rho \cdot \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}\right)}} \quad (19)$$

Finalmente:

$$C_d = Q \cdot \frac{\sqrt{\rho \cdot \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}\right)}}{\sqrt{2 \cdot (P_1 - P_2)}} \quad (20)$$

Ambos coeficientes, K y C_d , se determinan de manera experimental y no son valores fijos, ya que varían en función del número de Reynolds. La caracterización del Venturi consistirá en obtener experimentalmente las curvas correspondientes.

4.2. Diseño Asistido por Ordenador (CAD)

El diseño asistido por ordenador (CAD), se hará íntegramente en el programa Autodesk Inventor versión 2024, cuyos diseños se utilizarán por Fusion360 para simular los procesos de fabricación.



Ilustración 12. Pantalla de inicio Autodesk Inventor

4.2.1. Autodesk Inventor

Como se indica anteriormente, el programa CAD usado para la realización del sistema es Inventor, propio de la empresa Autodesk, una compañía estadounidense que lleva en el mercado más de 40 años.

El programa trabaja con un sistema EDP (Estructura de Descomposición del Producto) en forma de árbol, dado que la parte de diseño puede ser la más compleja de toda, necesita una organización que esté a la altura, para ello, el proyecto debe estar organizado tanto dentro, como se menciona con este sistema EDP, como fuera, en el lugar de almacenamiento del proyecto.

Para ello, se hablará de “Padre” o “Aguas arriba” a los elementos integradores de otros e “Hijo” o “Aguas abajo” a los elementos dependientes de estos elementos de referencia.

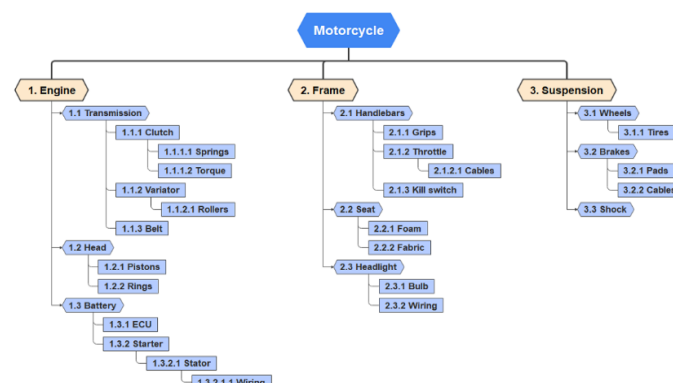


Ilustración 13. Esquema PBS

Si se colocase la vista desde el elemento final, aguas abajo se vería:

- El plano del conjunto final.
- Las carpetas con elementos auxiliares de unión, fontanería... entre otros.
- Los subconjuntos insertados como un único sólido.

Por lo que, si quisiera hacer una consulta en un nivel más abajo, en cualquiera de los llamados subconjuntos, nos encontraríamos en mismo orden, así hasta llegar a la operación más sencilla del programa, un simple boceto.

Toda pieza diseñada incluirá un plano anexo con las medidas para su posterior fabricación, por lo que se tendrá en cuenta a la hora del diseño la fabricación de las mismas.

Los elementos auxiliares, ya sean de stock o comprados a proveedores se ha decidido no realizar plano puesto que no precisa de una fabricación, de esta manera ahorraremos tiempo de diseño, el cual también es un factor importante en la elaboración de un proyecto. Estos elementos serán descargados desde la misma biblioteca de contenido de programa, con su referencia significativa o, por el contrario, de una serie de páginas webs con todo tipo de elementos descargables para su uso en Inventor.

La idea de esta etapa de diseño es mantener el orden y la organización desde el principio para llegar al objetivo de manera precisa y que cada parte del conjunto final sea accesible en todo momento.

Partiendo de la base, el programa se basa en una combinación de operaciones de boceto en 2D sobre cualquier plano, ya sea a partir de los ejes de coordenadas o uno personalizado por el usuario y una lista extensa de operaciones 3D de extrusión de material, como la propiamente dicha, revolución, barrido...

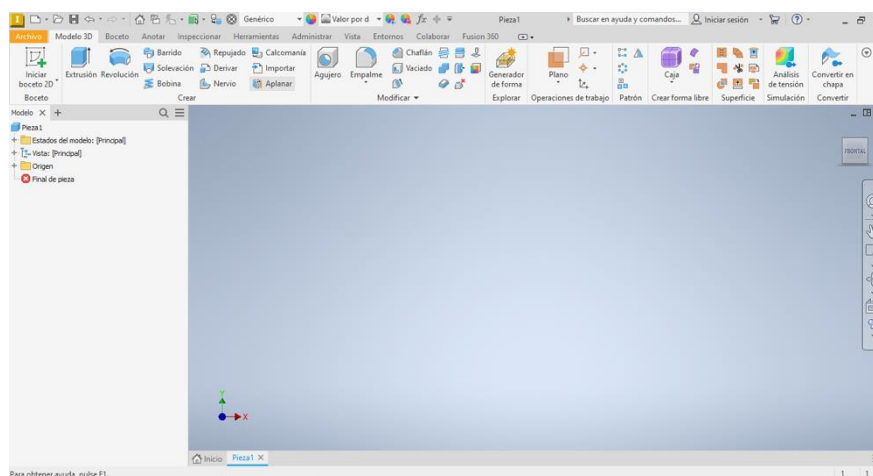


Ilustración 14. Interfaz Autodesk Inventor

La zona sombreada de azul es la zona de trabajo, en la que, con el cubo situado en la parte superior derecha de dicha zona, podremos rotar a través de las distintas vistas de

espacio para crear nuestros bocetos, en la parte izquierda, el árbol de operaciones, que irá creciendo en función a las operaciones que se vayan haciendo, todas ellas tendrán un identificador único.

Para empezar con el trabajo, se partirá de las piezas clave del mismo, que son los tubos de Venturi. Por tanto, lo primero será efectuar el diseño de los Venturi y a partir de los mismos se irán desarrollando las demás piezas del sistema.

4.2.2. Venturi Circular

Todo empieza con dos listones de metacrilato en bruto, de 445x70x20 mm, cada uno, el radio de la sección de entrada del fluido será de 12 mm, y éste se estrechará hasta 3 mm en la sección crítica.

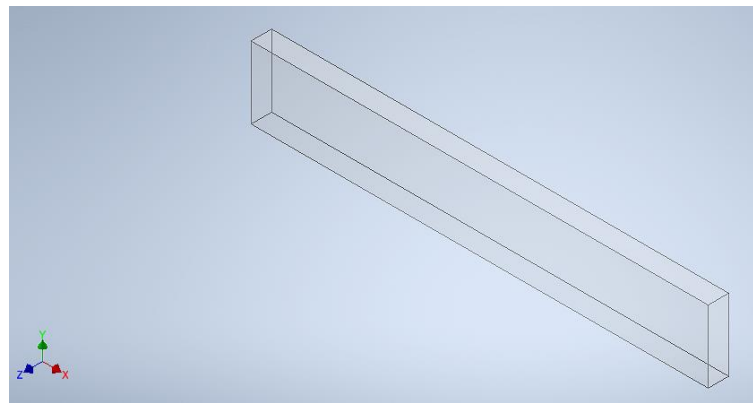


Ilustración 15. Extrusión inicial

Uno de los listones (A), es el que va a llevar el conformado de media sección por la que circulará el fluido, en esta parte se practicarán los huecos de las juntas tóricas, tanto las longitudinales como las transversales (para los acoples), también se mecanizarán los taladros para los pasadores de un diámetro de 3 mm y los taladros para tornillería M5 con profundidad de 30 mm.

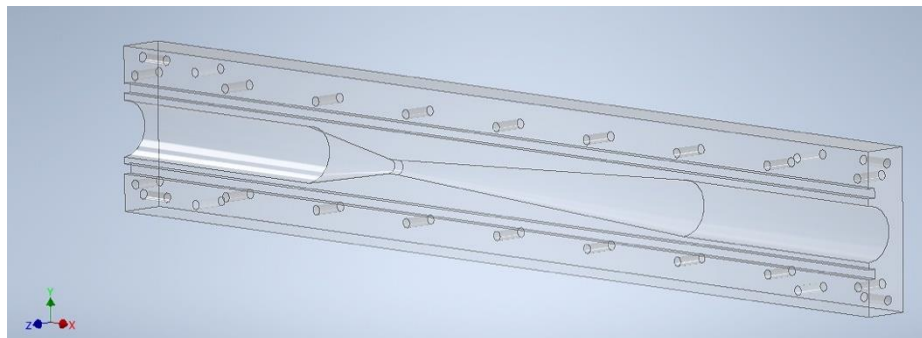


Ilustración 16. Diseño final

En la otra cara (B), además de la otra media sección interna por la que irá el fluido y los agujeros M5 para la tornillería y los pasadores, llevará nueve taladros para anexas los racores de medida de presión.

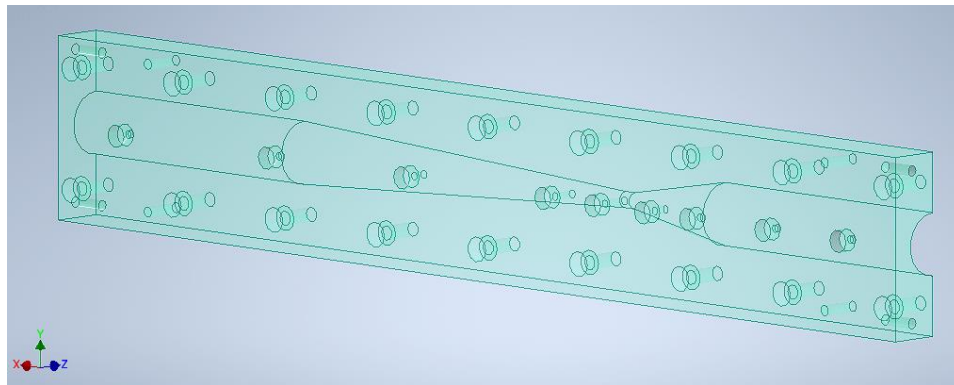


Ilustración 17. Diseño final

El siguiente paso es diseñar el acople. Para el diseño de éste, hay que tener en cuenta que el tubo intermedio entre el acople de la manguera y el mencionado acople es de radio externo 20 mm y radio interno 16 mm, por lo que se debe hacer un acople que pase de 12 mm de radio a 16.

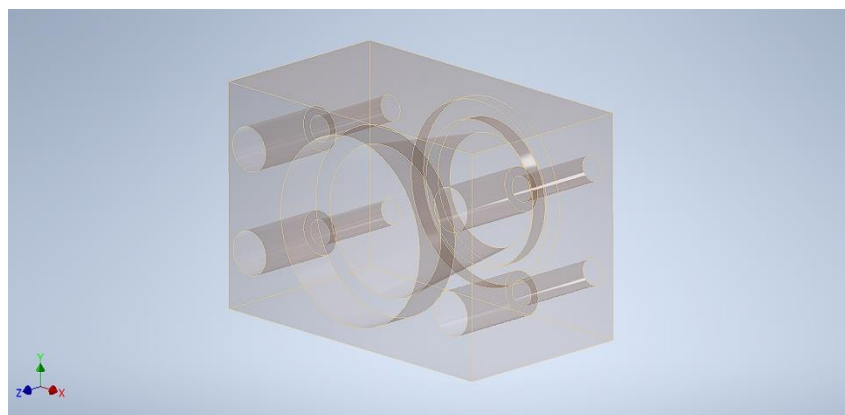


Ilustración 18. Acople Circular

La operación más característica de este elemento ha sido la elevación, como bien explica el propio programa, es una operación de extrusión o recorte de material en la que crea una forma de transición entre dos bocetos, para el caso del acople circular, la secciones no varían en cuanto a forma, por lo que la operación puede considerarse bastante limpia. Los agujeros para la tornillería también son M5.

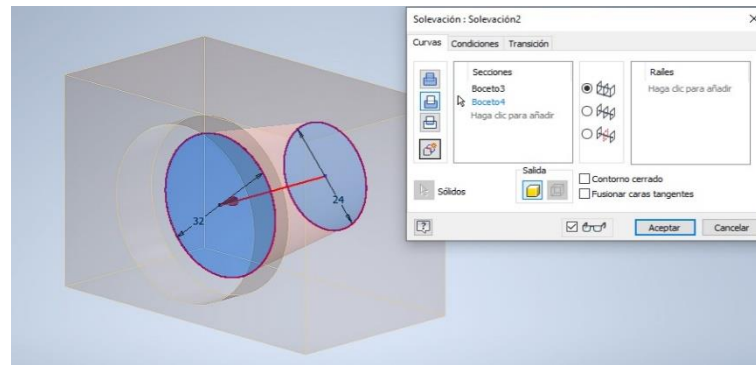


Ilustración 19. Solevación

Una vez diseñadas las piezas, es el momento de ensamblar todo, para ello, con el módulo de ensamblaje de Inventor, se unirá todo en concordancia con las restricciones disponibles.

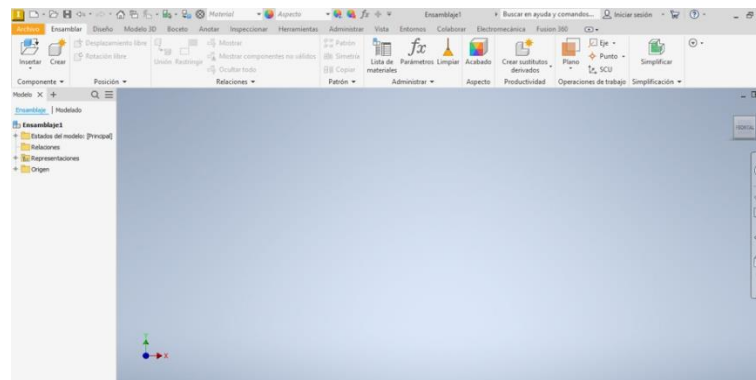


Ilustración 20. Interfaz módulo ensamblaje Autodesk Inventor

Las restricciones más usadas serán la de coincidencia, la cual restringe una superficie con otra ya sea a concordancia o a discordancia, esta permite por ejemplo simular el pegado o la soldadura de las piezas. Otra bastante utilizada es nivelación, tiene la misma función que la anterior, pero en este caso en vez de unir dos superficies, las distancia en función de la longitud que se requiera, existen otras restricciones como la de ángulo o tangencia, que pueden ser útiles para la cinemática del ensamblaje.

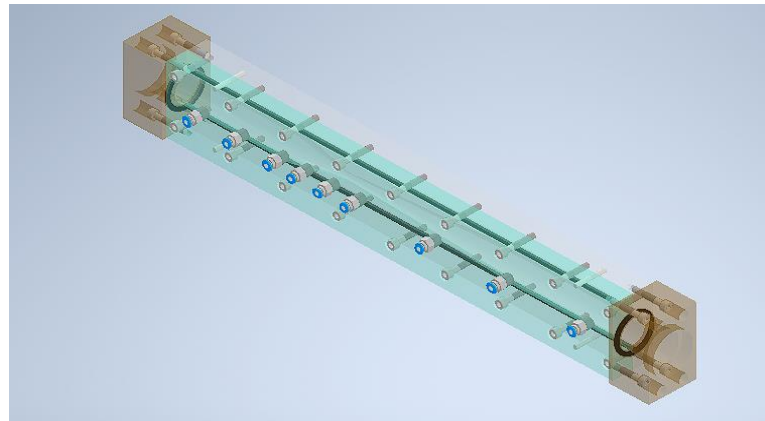


Ilustración 21. Ensamblaje final Venturi circular

El conjunto quedaría de esta forma, de este modo, todos los componentes quedan bloqueados con las restricciones aportadas y ahora el conjunto se mueve como si fuese un único sólido, otra función bastante útil es la de presentación, en ella se puede crear una representación de cómo iría nuestro conjunto en una futura fabricación y unión en la realidad, esta herramienta te permite crear vistas explosionadas a modo de despiece del conjunto.

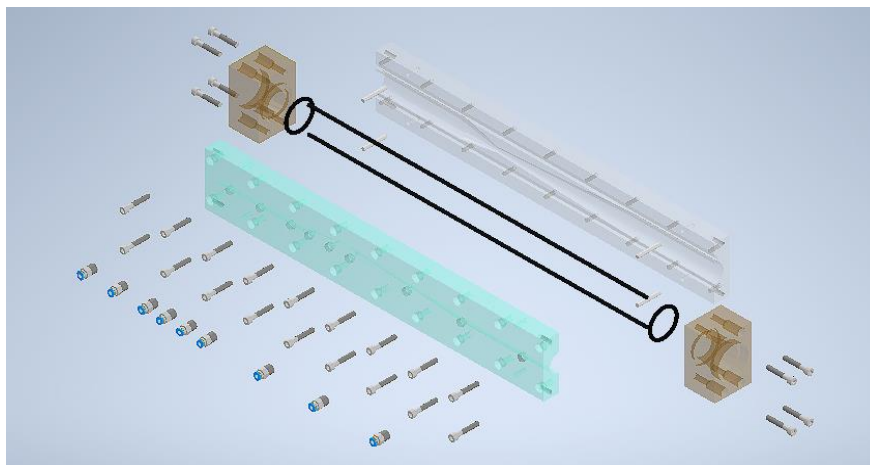


Ilustración 22. Desarrollo Venturi circular

4.2.3. Venturi Rectangular

El proceso es bastante similar al del Venturi circular para las caras, se parte de las mismas dimensiones de listones, la única variación, evidentemente, es la sección.

La sección de entrada del fluido será de 8 mm de base y 24 mm de altura, por lo que cada listón tendrá una profundidad de 4 mm, la altura se reducirá hasta los 6 mm, que será la sección crítica.

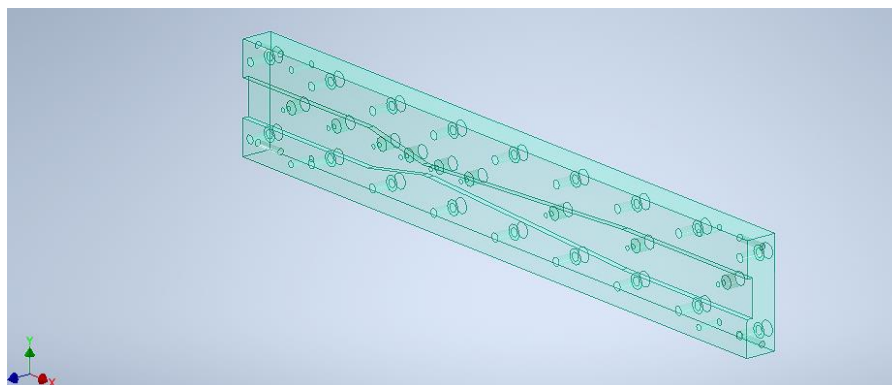


Ilustración 23. Diseño final

Para el acople de este Venturi la cosa se estremece, hay que pasar de una sección circular de 16 mm de radio, como la anterior, a una sección rectangular citada anteriormente, para ello se probará la misma operación anterior, la solevación, pensando en la futura fabricación, es imposible adaptar una sección circular a una rectangular con esquinas vivas debido al radio propio de la herramienta de corte, por lo que, en vez de una sección rectangular, se va a optar por una ranura, en la que los lados de menor cota sean semicircunferencias y trate de simular la curvatura de la circunferencia inicial, de esta manera se conseguirá que el programa no reproduzca superficies extrañas a lo largo de su creación.

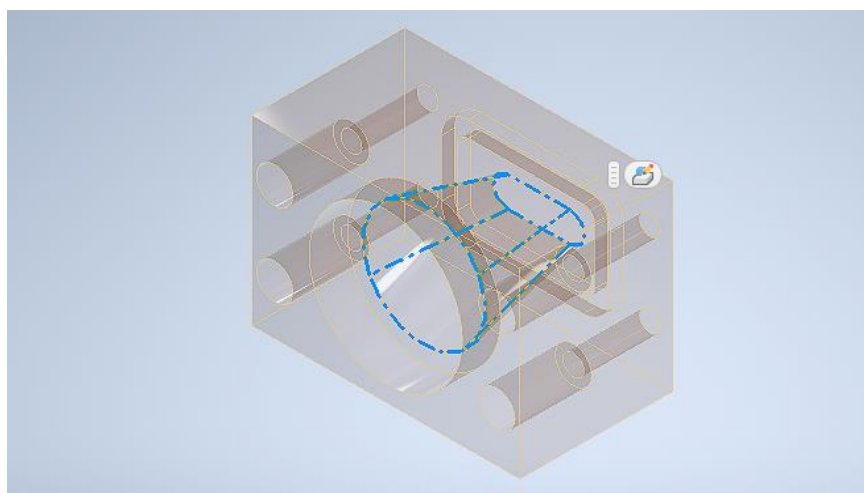


Ilustración 24. Acople rectangular

El ensamble de este Venturi es bastante similar al comentado previamente, el diseño en esta disposición permite desarmar ambos Venturi de manera sencilla para realizarle cambios sin tener que editar otras partes del sistema.

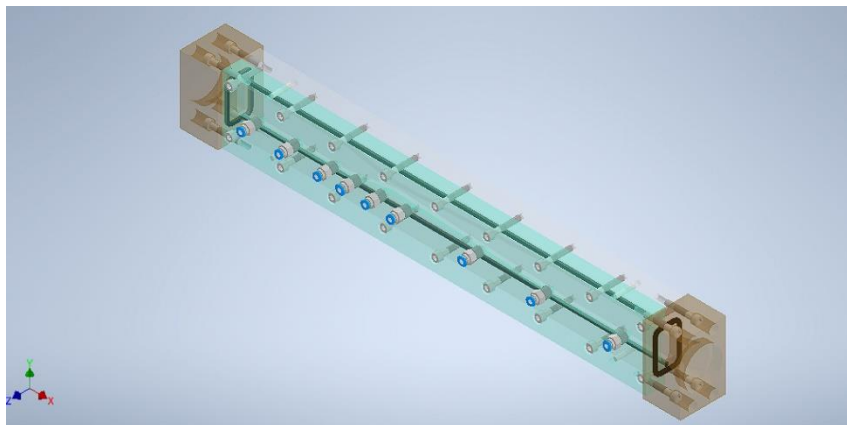


Ilustración 25. Ensamblaje final Venturi rectangular

4.2.4. Bastidor

Para el bastidor se busca un diseño ergonómico, en el que se usen los menos elementos posibles; resistente, que pueda soportar todo el sistema y ligero, puesto que no debe ser un elemento pesado para el desplazamiento y manipulación dentro del laboratorio. Para el bastidor se cuenta ya con unos perfiles en el taller, en concreto son unos perfiles de aluminio ranurados en T de 35x35 mm, dicho perfil no se encuentra con exactitud en ninguna biblioteca de contenido, tanto en local como en línea, por lo que se va a aplicar un método de diseño 3D, a pequeña escala, denominado, ingeniería inversa, es un proceso cuyo objetivo es obtener información o un diseño a partir de un producto u objeto.

En este caso, se tomó una fotografía de lo que sería el corte del perfil, ésta se llevó a Inventor sobre un plano, antes de realizar el boceto, el marco del perfil de la imagen se escaló para que fuese de las medidas necesarias, tras ello, con la opción de polilínea, se fue trazando el plano a extruir.



Ilustración 26. Planta del perfil

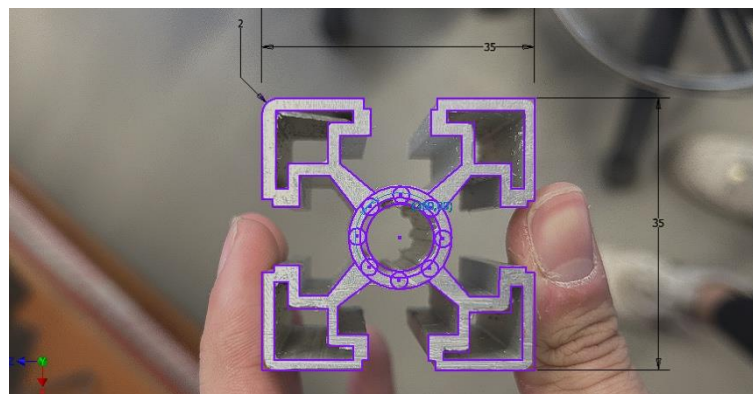


Ilustración 27. Planta del perfil con boceto en Autodesk Inventor

Este boceto es compartido por todas las piezas de perfiles dentro del conjunto del bastidor, por lo que podría considerarse una plantilla de todos éstos.

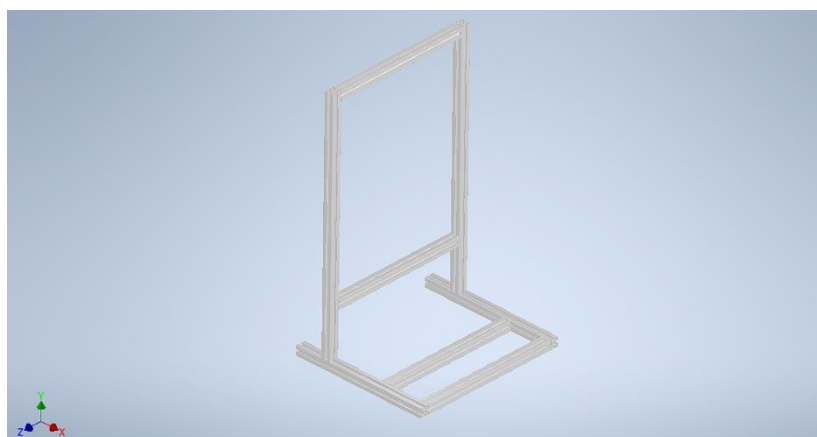


Ilustración 28. Diseño final bastidor

Esto podría ser una idea prematura de lo que va a ser el bastidor, como puede verse existen dos tipos de longitudes, los perfiles longitudinales a los ejes X y Z son de 500 mm cada uno, mientras que los del eje Y son de 900 mm de longitud cada uno para que el contrachapado que se le coloque al bastidor pueda soportar el peso de lo que será nuestro panel de medidas de presión y no pandeé, a ello habrá que añadirle soportes y escuadras de unión para garantizar la rigidez del conjunto.

4.2.4.1. Soportes del bastidor

Para el diseño de los soportes se busca un mecanismo sencillo que permita nivelar el bastidor una vez que éste se sitúe sobre la mesa de ensayos.

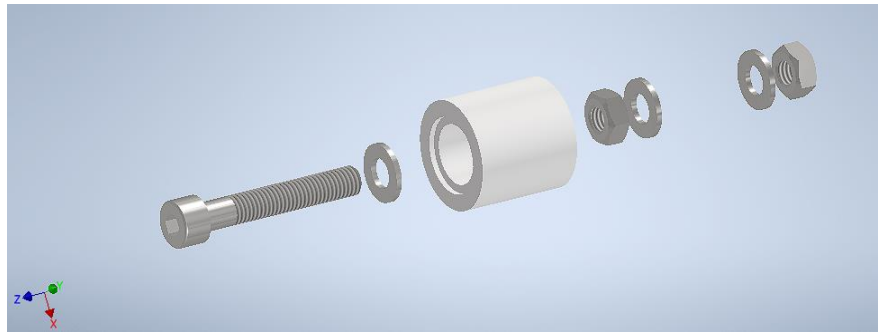


Ilustración 29.Desarrollo soporte

El mecanismo es sencillo, el cilindro de blanco a modo de taco, será el elemento que esté en contacto con la superficie en la que se posicione el sistema, habrá un tornillo que pasará por su interior en la que una arandela haga de tope, tras el paso, una tuerca con arandela irá roscada entre el taco y el perfil, por último, otra arandela con tuerca irá en el interior de la ranura a modo de tope con el perfil.

4.2.4.2. Escuadras del bastidor

Pese a que las escuadras también son elementos que se encuentran en el laboratorio, tampoco se encuentran en ninguna biblioteca de contenido, por lo que se ha decidido diseñarlas, para el diseño, se tomará de referencia la escuadra tipo del taller y se hará una réplica a escala para los perfiles.

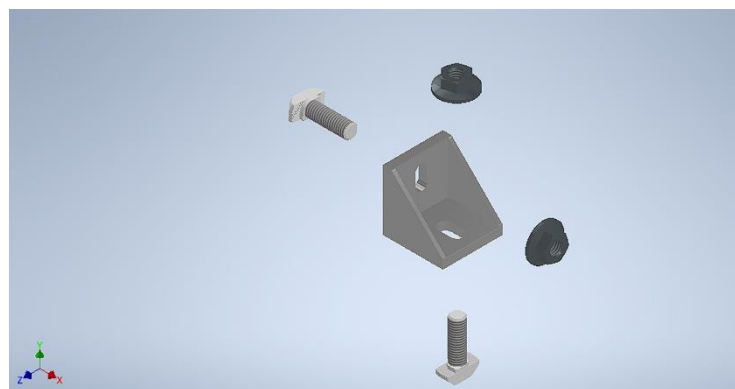


Ilustración 30.Desarrollo escuadra

El sistema consiste en una escuadra (elemento principal), la cual permitirá anexar los perfiles en ángulos 90 grados, para ello, utilizaremos tornillos específicos para estos perfiles con cabeza de martillo, Estos tornillos fijan la escuadra al bastidor con tuercas que tienen un ala con forma de arandela.

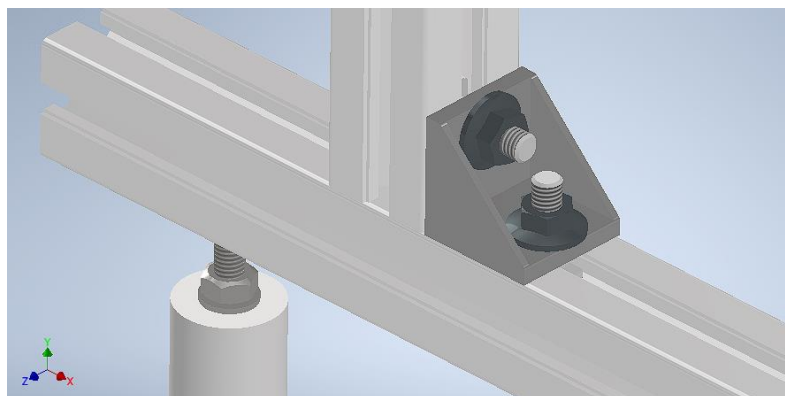


Ilustración 31. Entorno escuadra

El bastidor es el elemento del sistema en el que todos los componentes van a ir insertados, por lo que precisa de una estructura firme que sea capaz de albergar todos ellos. Los elementos de mayor peso, que son los dos Venturi, tendrán una distancia desde su centro de gravedad al plano XZ (Planta) menor que otros como puede ser el colector inferior, esto implica que el centro de gravedad del sistema baje en cuanto a cota Y, haciéndolo más estable.

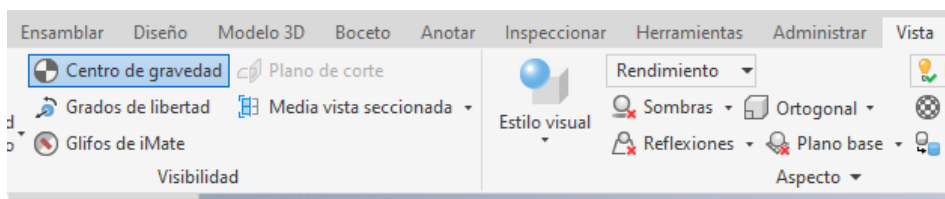


Ilustración 32. Menú vista Autodesk Inventor

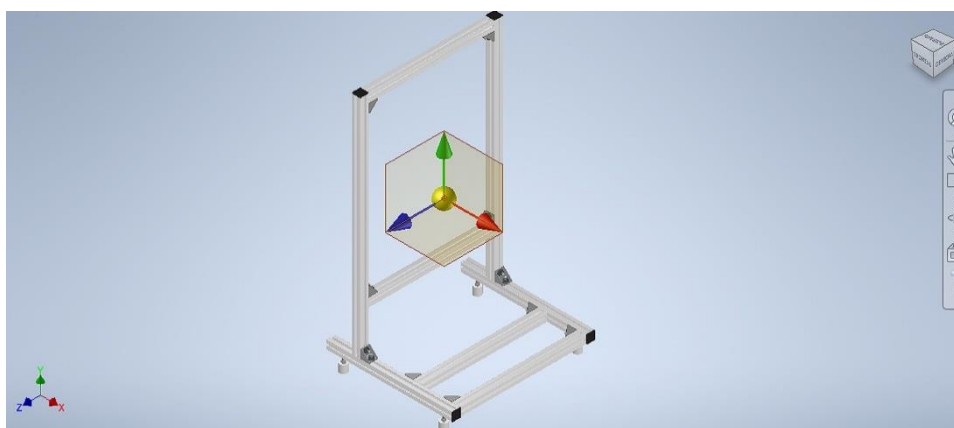


Ilustración 33. Centro de gravedad bastidor

El contrachapado se ha incluido en este elemento, por lo que, el conjunto final del bastidor resulta de la siguiente forma:



Ilustración 34. Conjunto final bastidor

4.2.5. Colector inferior

El colector inferior no es más que un elemento de sujeción y transición para los tubos de medición de presión en el mencionado contrachapado, en concreto, el colector estará dividido en dos fases, por lo que cada colector irá destinado para cada Venturi, el diseño es sencillo, el objetivo es diseñar un prisma rectangular el cual cuente con nueve taladros pasantes por los que pase el fluido.

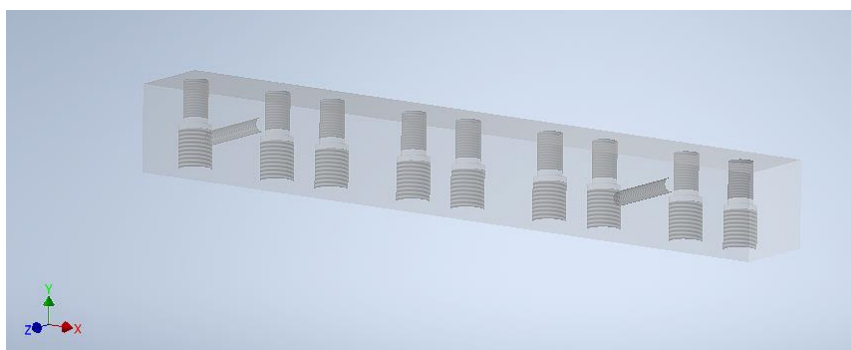


Ilustración 35. Diseño colector inferior

Unido a esto, irán los racores para tuberías de 6 mm de diámetro en la parte inferior, para las conexiones con los Venturi, y racores de 10 mm de diámetro en la parte superior para los tubos de medición de presión. Todos los racores son elementos de bibliotecas de contenido.

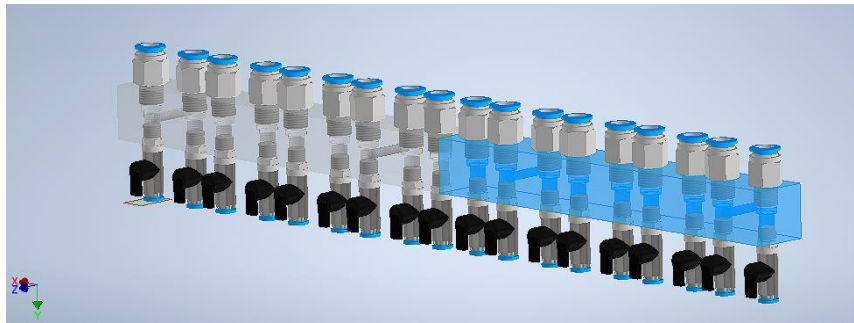


Ilustración 36. Ensamblaje colector inferior

4.2.6. Colector superior

Para el colector superior el proceso es similar. Hay que destacar que se trata de una pieza clave para el correcto funcionamiento del equipo. El objetivo del colector es diseñarlo para una doble función: por un lado, permitirá purgar todo el circuito sacando el aire presente en el sistema. Por otra parte, servirá para conseguir equilibrio en todos los tubos piezométricos al comienzo del ensayo.

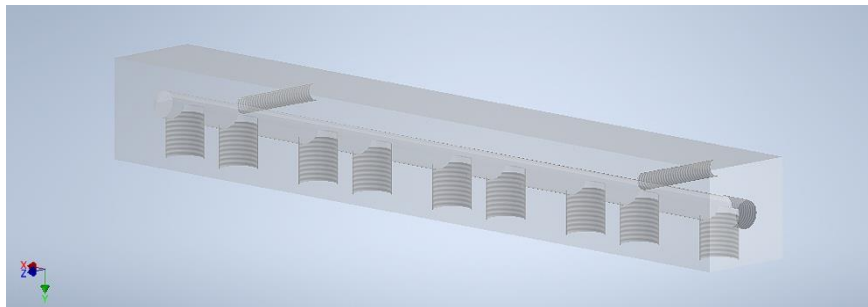


Ilustración 37. Diseño colector superior

El diseño del colector superior se realizará teniendo en cuenta las operaciones de mecanizado necesarias para su fabricación. Por ejemplo, se sabe que realizar un taladrado de tanta longitud, como la del conducto comunicante de todos los tubos de medición, puede resultar difícil de ejecutar, pero la broca del CNC cuenta con una longitud suficiente para realizar el taladrado. Se ha optado por este diseño pese a ser arriesgado (posible atranque de viruta durante el taladrado profundo) por el simple motivo de evitar uniones entre piezas, de este modo no hay que preocuparse por estanqueidad en el colector, dado que es un único sólido.

En la parte inferior del colector se encontrarían los racores de 10 mm de diámetro y en el extremo perforado, otro racor con grifo para regular la salida del fluido.

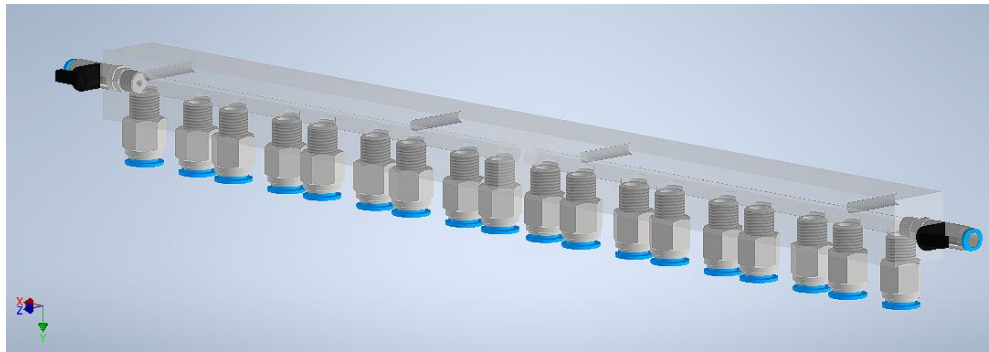


Ilustración 38. Conjunto colector superior

4.2.7. Conjunto final

4.2.7.1. Tubos de medición

Para los tubos de medición, se prevé que la cota máxima de presión dada sea de unos 0,9 m.c.a, por lo que los tubos no pueden ser menores de 1100 mm cada uno, su diámetro exterior es de 10 mm como ya se ha comentado y 6 mm de diámetro interior, irán fijos a los colectores que a su vez están atornillados en el contrachapado. Detrás de los piezométricos y pegados al tablero, se colocarán las reglas de medición para medir la presión en m.c.a.

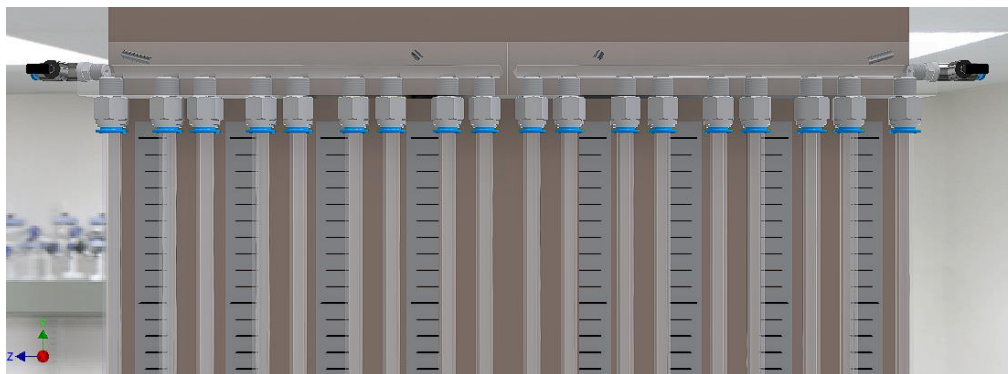


Ilustración 39. Entorno tubos de medición

4.2.7.2. Soportes Venturi

Dado que el sistema va a incluir ambos Venturi simultáneamente, se diseñarán dos tipos de soportes para los dos Venturi, el objetivo es diseñar un primer soporte que fije el Venturi al bastidor y otro que fije de igual manera, pero con una cota más alta para poder canalizar todo en el futuro. El soporte consiste en un ortoedro, el cual tiene un agujero pasante, por el que va a ir insertado un tornillo que fije el soporte al bastidor y luego dos agujeros en uno de los alzados para la fijación del Venturi al propio anclaje.

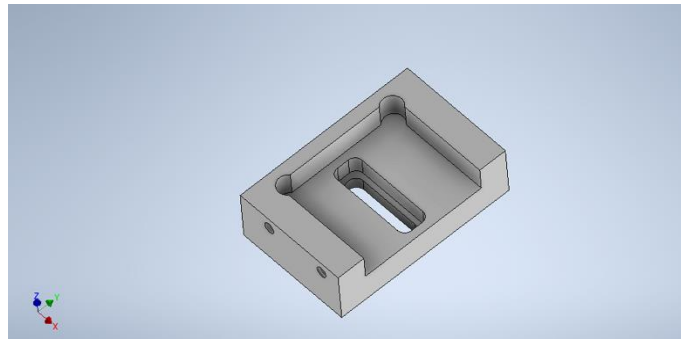


Ilustración 40. Diseño soporte Venturi

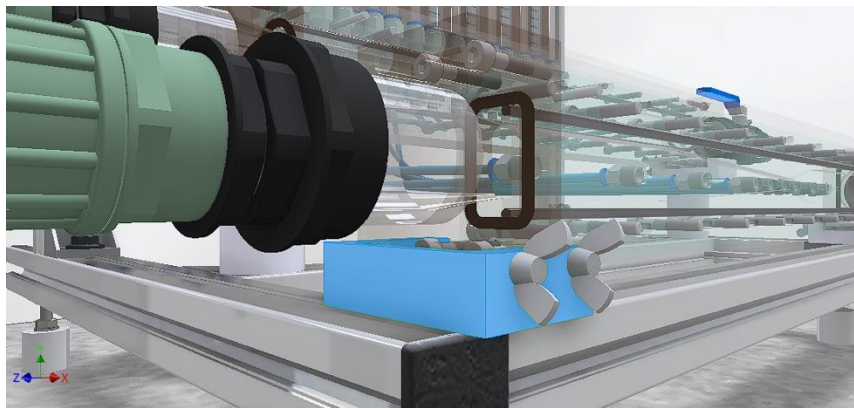


Ilustración 41. Entorno del soporte Venturi

El anclaje del segundo Venturi es el mismo, a diferencia de que éste cuenta con un taco para elevar su cota., Este taco irá anclado al soporte y al bastidor con el mismo procedimiento anterior.

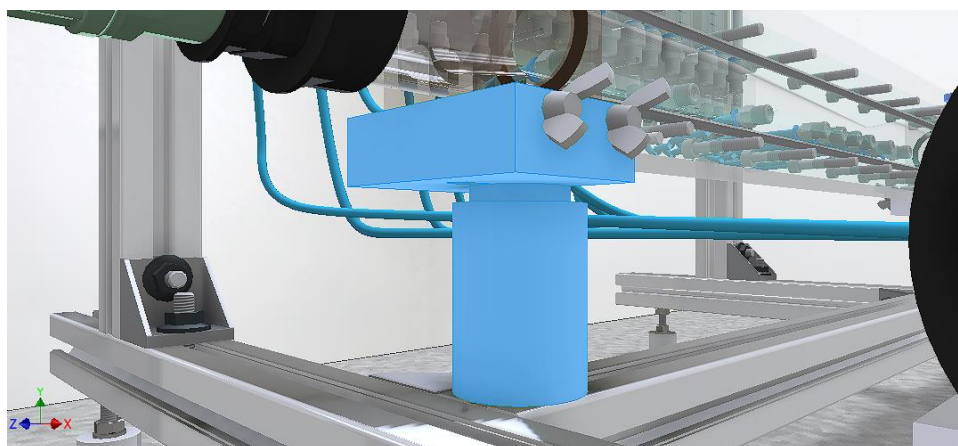


Ilustración 42. Entorno del soporte de Venturi II

4.2.7.3. Fontanería

Las conexiones entre las tomas de presión de los Venturi y el colector inferior son los únicos elementos que contienen un boceto 3D., El objetivo de diseño de estas conexiones es simular de manera más natural, la (posible) organización en la etapa de fabricación., La operación de diseño en Inventor es barrido, esta operación requiere un boceto cerrado, el cual será la superficie extruida y un esqueleto, el cual es la línea/s que va/n a definir el recorrido de extrusión de esta operación.

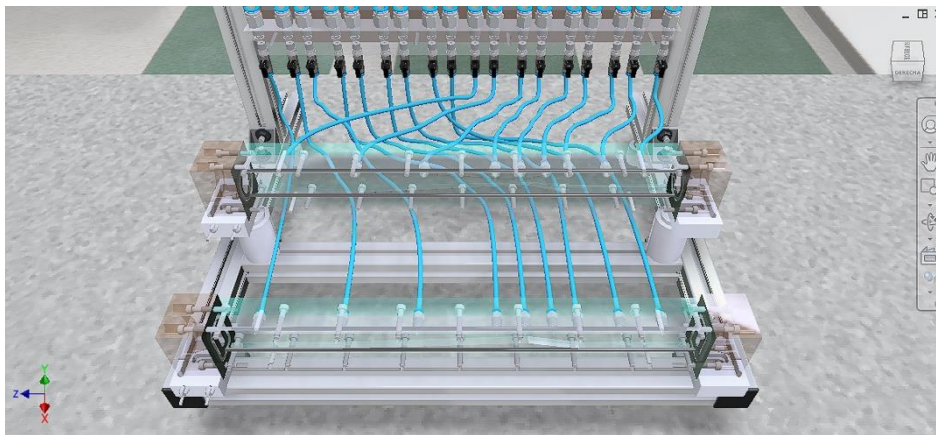


Ilustración 43. Tubos neumáticos

Toda la fontanería de acople de entrada para la manguera tras el rotámetro está tomada de una librería, el objetivo es pasar del radio externo de 20 mm del cilindro anexo al acople del Venturi a dicha manguera, por lo que se precisa de una serie de adaptadores hasta llegar al deseado.

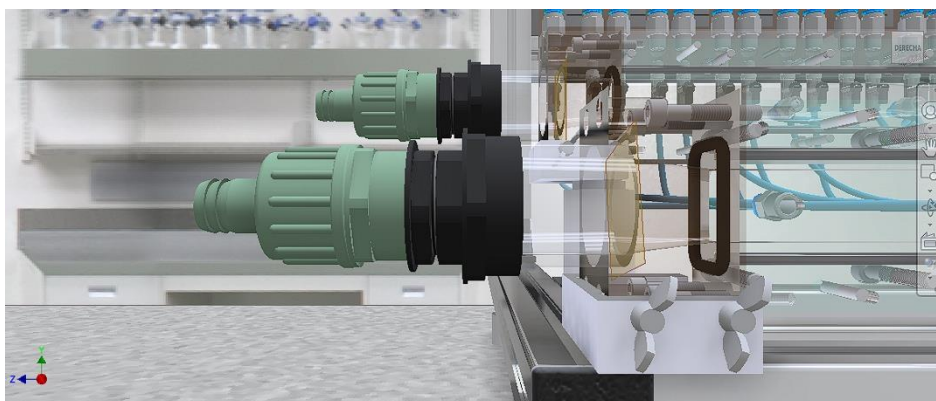


Ilustración 44. Entorno adaptadores a manguera de entrada

Para la fontanería de la salida, la combinación de elementos auxiliares es la misma, a diferencia de una llave de paso en mitad de los adaptadores, la función de esta llave será explicada en los procedimientos de ensayos.

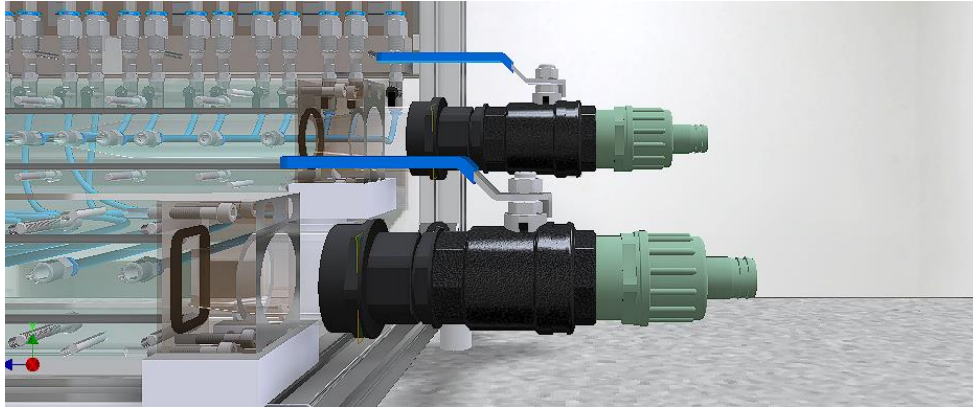


Ilustración 45. Entorno adaptadores a manguera de salida

Para el ensamblaje final se ha usado el módulo de entornos dentro de Inventor, en él, te permite añadirle unas situaciones (entornos) en los que podría encajar el conjunto, en este caso, se ha usado uno en el que se vería el sistema en un laboratorio.

Este es el resultado final de la etapa de diseño:



Ilustración 46. Ensamblaje final

4.3. Dinámica de fluidos computacional (CFD)

Esta rama de la mecánica de fluidos utiliza el análisis numérico y las estructuras de datos para analizar y resolver problemas que implican flujos de fluidos.

Como se ha comentado anteriormente, este punto no se contemplaba en los objetivos principales, pero se ha añadido con el fin de obtener otro punto de vista a la hora de deliberar si el ensayo experimental es válido o no.

Recordar aquí que el estudio computacional es un añadido al TFG que no forma parte de los objetivos del mismo. Debe servir para añadir valor a tu trabajo particular y hacérselo saber a los miembros del tribunal.

4.3.1. Ansys Workbench

El programa que se usará para el análisis computacional será Ansys Workbench, este programa permite empezar desde cero un proyecto, desde su diseño, pasando por el mallado del sólido, hasta llegar a los resultados de las iteraciones.

El módulo Ansys Fluent es una parte de este software, Workbench incluye una infinidad de contenido, multiplicando exponencialmente su uso con respecto solo al módulo de Fluent, el cual nos permite realizar lo comentado anteriormente.

En la zona de trabajo del programa, se irán añadiendo los distintos módulos que se precisen, podría decirse que siguen un sistema PBS (mencionado anteriormente) en el que los módulos dependen unos de otros, ya que, una malla no puede calcularse si antes no se ha creado el sólido y así sucesivamente.

El programa no permite unir dos módulos si no tienen concordancia entre ellos, por lo que sirve de ayuda en el proceso.

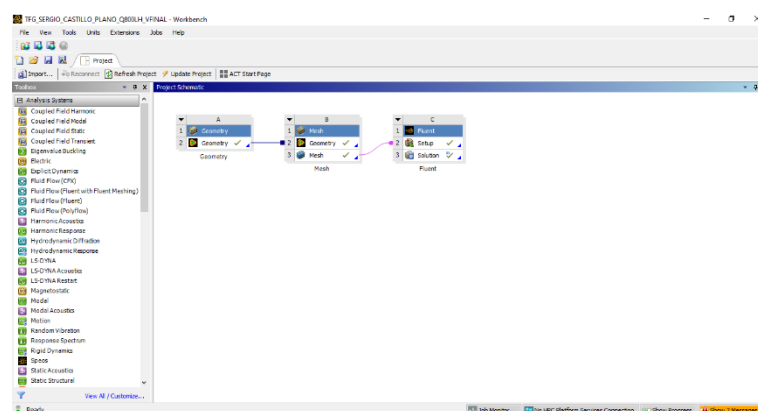


Ilustración 47. Interfaz Ansys Workbench

4.3.2. Procedimiento

Lo primero de todo es generar el sólido al que se le va a realizar el estudio, en este caso, el sólido será el fluido a través de los Venturi, el módulo de diseño 3D del programa es sencillo, cuenta con las operaciones básicas de boceto y extrusión.

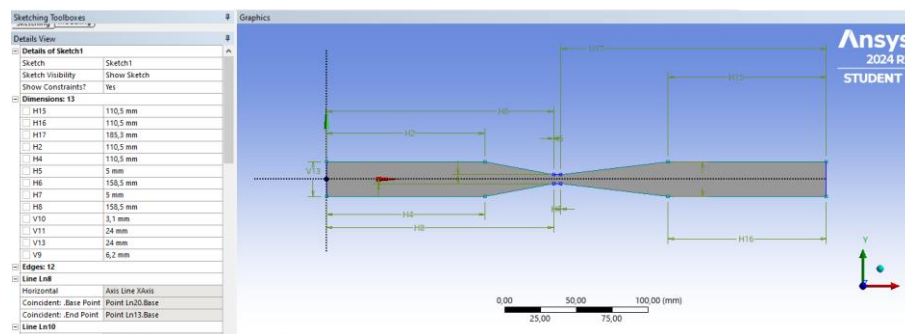


Ilustración 48. Boceto Venturi

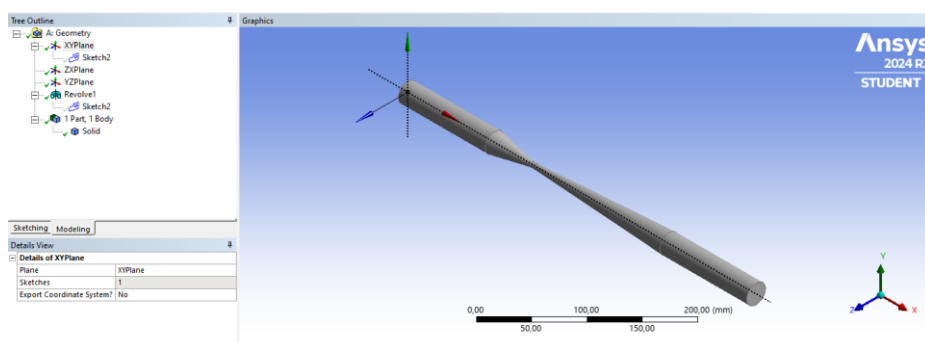


Ilustración 49. Diseño Venturi circular

Para el mallado se deben tener en cuenta tres factores, el tipo de mallado, en este caso es Fluent y CFD, lados de cada celda, cuatro en este caso y tamaño de celda, del orden de 1 mm^2 .

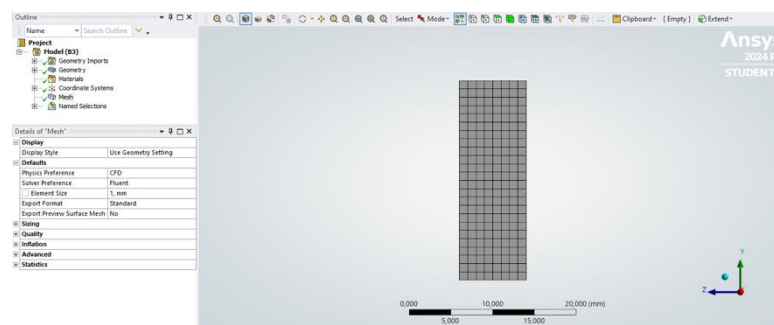


Ilustración 50. Malla Venturi rectangular

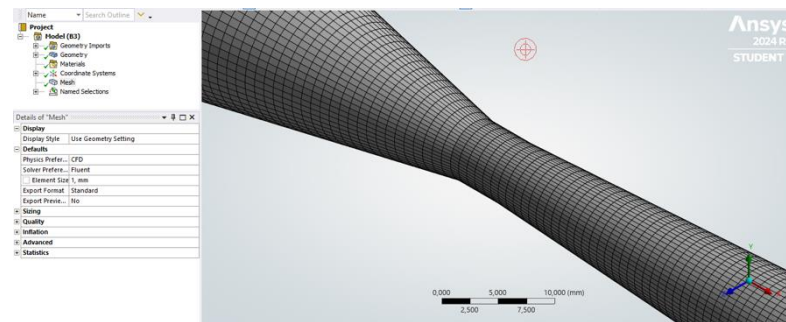


Ilustración 51. Malla Venturi circular

Finalmente, el módulo de Fluent es dónde más operaciones se van realizar:

- Hay que tener en cuenta que nuestro sistema es estacionario, la magnitud de la velocidad es la absoluta y está basado en un sistema de presión.
- El modelo de viscosidad del fluido es el siguiente:

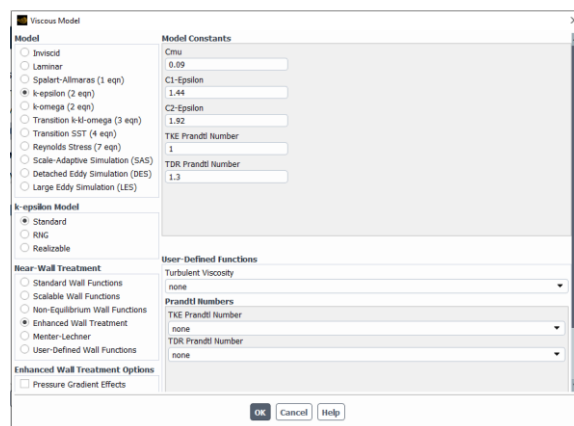


Ilustración 52. Pantalla Ansys Fluent

- El fluido evidentemente será agua en estado líquido, con una densidad de 998,2 kg/m³ y una viscosidad de 0,001003 kg/(m·s).
- Para el programa, el sólido consta de tres partes:

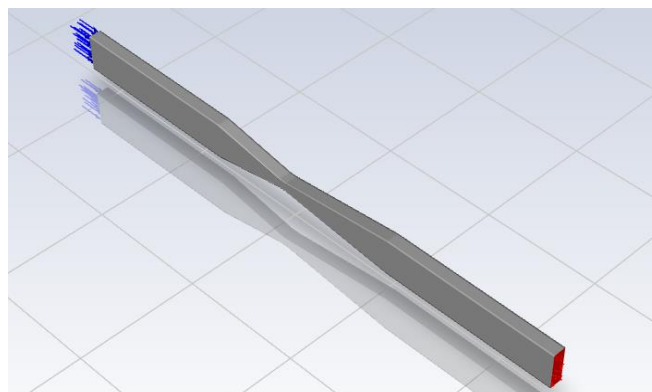


Ilustración 53. Volumen de control Venturi rectangular

- La zona gris, es la pared de nuestros Venturi, en ella, la velocidad es cero, así se ha establecido inicialmente.
- La zona posterior, marcado con flechas azules, es la zona por la que entra el fluido, el programa necesita mínimo o la presión o la velocidad de entrada para realizar las iteraciones, en este caso, un dato que se puede conocer es el de la velocidad, dado que se sabe el caudal que entra al Venturi puesto que es algo que se regula con la válvula de bola situada en el caudalímetro y el área que penetra dicho caudal:

$$Q = v \cdot A; v = \frac{Q}{A} \quad (19)$$

Para esta iteración, un caudal intermedio que sabemos que va a ser medido también de manera experimental es el de 800 l/h, o en el sistema internacional:

$$Q = \frac{0,8 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} = 0,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (20)$$

La sección varía en cada caso:

- Para el caso plano:

$$A_p = b \cdot h = 24 \cdot 8 = 192 \text{ mm}^2 \quad (21)$$

$$v_p = \frac{0,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{192 \text{ mm}^2} = 1,157 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (22)$$

- Para el caso circular:

$$A_c = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 6^2 = 113,1 \text{ mm}^2 \quad (23)$$

$$v_c = \frac{0,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{113,1 \text{ mm}^2} = 0,491 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (24)$$

- Finalmente, en la zona de color rojo, la salida, hay que indicar que existe continuidad en el volumen de control, es decir, que toda la velocidad que entra por la zona azul sale por la zona roja.
- El método de resolución es el siguiente:

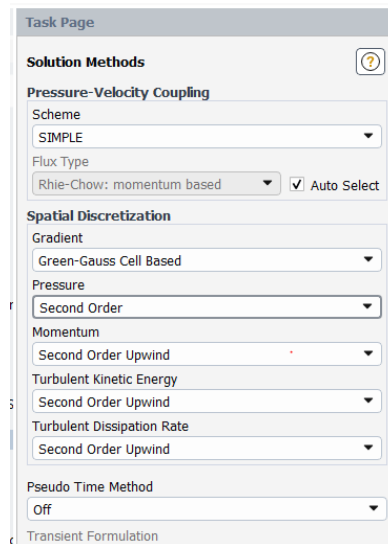


Ilustración 54. Método de solución

- Finalmente, se elige el número de iteraciones, para que nuestras incógnitas converjan correctamente, se impondrá mínimo unas 1000 iteraciones.
- Para el proceso tras iteración, el objetivo es conseguir los diagramas de velocidad y presión dinámica y estática del fluido, puesto que son los objetivos principales de la iteración.
- El propio software cuenta con un módulo que recopila toda la información a del proyecto y crea un reporte a modo de resumen, ambos reportes serán mencionados en próximos puntos como resultados y anexos.

4.4. Proceso de fabricación

La fase de fabricación se va a desarrollar íntegramente en el laboratorio de fabricación, dicho laboratorio cuenta con una amplia gama de maquinaria y herramientas para llevar a cabo el proceso.

Los procesos de fabricación, así como su coste, van a ir incluidos en una hoja Excel de procesos.

4.4.1. Descripción de equipos

A continuación, se describirán todas las herramientas y maquinaria que se van a utilizar.

4.4.1.1. Centro de Mecanizado

El laboratorio cuenta con un Centro de Mecanizado Vertical Lagun L650, éste cuenta con una superficie de trabajo de 800x460 mm, entre otras características destacan:

- Control numérico.
- Volante electrónico portátil.
- Velocidades de hasta 8000 rpm.
- Almacén para albergar hasta 16 herramientas.
- Amarrado automático de la herramienta.
- Curso longitudinal X: 650 mm.
- Curso transversal Y: 510 mm.
- Curso vertical Z: 610mm.



Ilustración 55. Centro de mecanizado

4.4.1.2. Sierra de Cinta

La sierra de cinta es una Sierra de Cinta S 275 NV de Optimum. Esta sierra es exclusiva para corte de metales, cuenta con una de sierra bimetálica de alta calidad, construida en hierro fundido de alta resistencia, la velocidad de corte varia de 20 a 90 rpm, dispositivo de refrigeración, el cual ayudará a controlar el calor durante la operación, posee un filtro EMC, el cual evita perturbaciones electromagnéticas, así como vibraciones y cortes silenciosos.



Ilustración 56. Sierra de cinta

4.4.1.3. Grabadora láser

La grabadora láser del laboratorio es un Grabadora Láser Compacta 40 W modelo K40 de la marca Omtech, el área de trabajo es de 300x200 mm, la velocidad máxima de grabado es de 300 mm/s, el láser es de CO₂ y potencia de 40 W, posee un cabezal ajustable con asistencia neumática, con posibilidad de corte de madera de hasta 3 mm.



Ilustración 57. Grabadora láser

4.4.1.4. Herramientas

Dentro de las herramientas manuales destaca el giramachos, el cual ha sido utilizado para la gran mayoría de roscados de precisión.



Ilustración 58. Roscamachos

El laboratorio cuenta con numerosas fresas, brocas y material de corte, por lo que su orden es indispensable para poder encontrar todo rápidamente.



Ilustración 59. Fresas del laboratorio

4.4.2. Venturi

El material principal que se va a usar para los Venturi va a ser Polimetacrilato de Metilo o comúnmente conocido como Metacrilato, es un polímero de la familia de los termoplásticos, el cual es considerado el más transparente de los plásticos, a su vez, destaca por su resistencia al impacto, a la corrosión, es buen aislante térmico y eléctrico, pero lo más importante, es conformable.

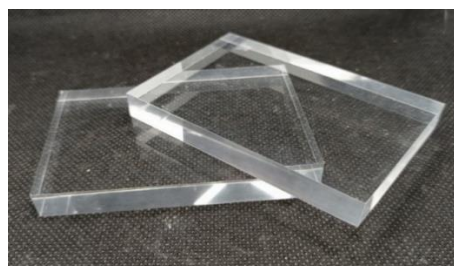


Ilustración 60. Polimetacrilato de Metilo

Cada conjunto de tubo de Venturi contará con:

- Cara A (x1)
- Cara B (x1)
- Acople para la toma de agua (x2)
- Junta tórica del acople (x2)
- Junta tórica para las caras (x2)
- Acople a bastidor (x2)
- Pasador para fijar las caras (x4)
- Tornillería cabeza hexagonal tipo Allen M5x20 (x4)
- Tornillería cabeza hexagonal tipo Allen M5x30 (x26)
- Racores de toma rápida D6 a 1/8 (x9)

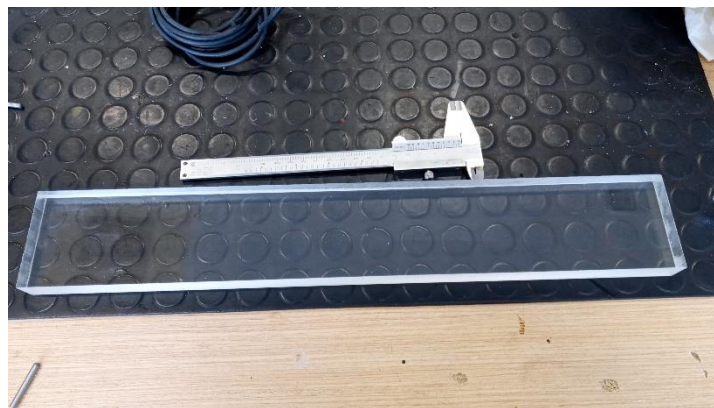


Ilustración 61. Tocho de metacrilato

Dado que la herramienta de la máquina CNC podría causar un desastre si se opera con la dimensión mayor en dirección a Z, se opta por hacer los Venturi en dos mitades



Ilustración 62. Ejes Centro de mecanizado

Para que esto no ocurra, se posiciona la mayor dimensión sobre el eje X, pero para ello, hay que fabricar una mordaza auxiliar, puesto que, con una sola, las revoluciones del CNC, junto con el conformado en el extremo más lejos de la mordaza, podría causar vibraciones y una pérdida de calidad en el corte.

Para la cavidad interna y las juntas tóricas de los Venturi se va a utilizar una fresa de distinta forma y tamaño. En el fresado, el movimiento de corte es rotativo y el avance lineal, ambos movimientos ejecutados por la herramienta (dirección Z), mientras que la mesa de la máquina, en la que se sitúa la pieza a conformar por medio de mordazas, se realizan los movimientos en los ejes X e Y.

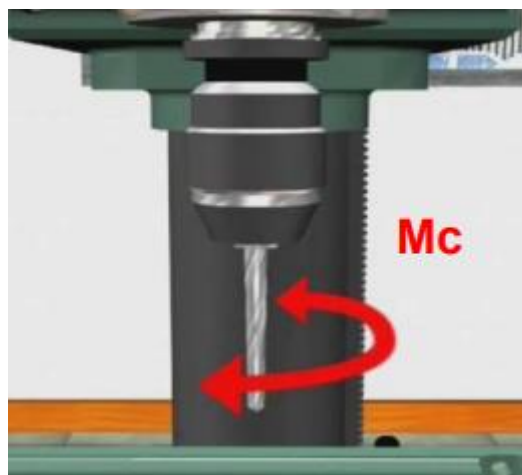


Ilustración 63. Movimiento de corte

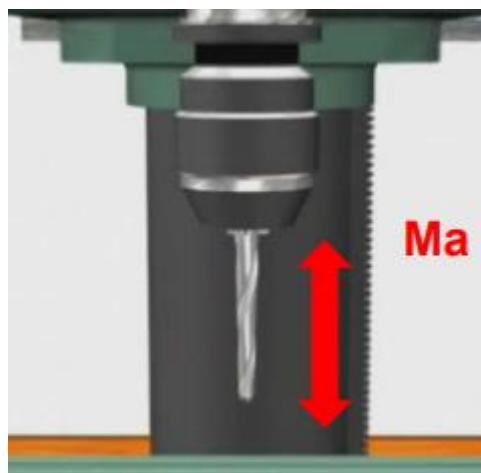


Ilustración 64. Movimiento de avance

Para el Venturi de superficie rectangular la operación principal será el planeado, dicha operación es la más habitual dentro del fresado, en la que se pueden utilizar una amplia gama de herramientas, para este Venturi se utiliza una fresa de punta plana.



Ilustración 65.Fresado Venturi

Para el fresado del Venturi circular, se usa una fresa de punta esférica, permitiendo así esa curvatura para la sección objetiva.



Ilustración 66.Fresa de punta esférica

La primera operación para la tornillería y racores es el taladrado, operación que también se realiza en el CNC, los movimientos son similares a los del fresado, en este caso, la herramienta será una broca.



Ilustración 67.Taladrado Venturi

Tras todo el proceso de mecanizado en el CNC, con las caras de los Venturi bien ancladas en el tornillo de banco del laboratorio, se realiza la operación de roscado con el macho de la medida correspondiente. Estas roscas servirán para conectar los racores para los tubos de 6 mm.



Ilustración 68. Roscado manual

Con todas las operaciones de mecanizado, las caras de los Venturi quedarían de la siguiente manera:



Ilustración 69. Venturi fabricados

Para los acoples, el proceso de mecanizado es mismo, para los agujeros se usará la operación de taladrado, mientras que, para la cavidad de la elevación fresado, al que se le va a realizar una operación extra de perfilado para el acabado superficial de la pieza.

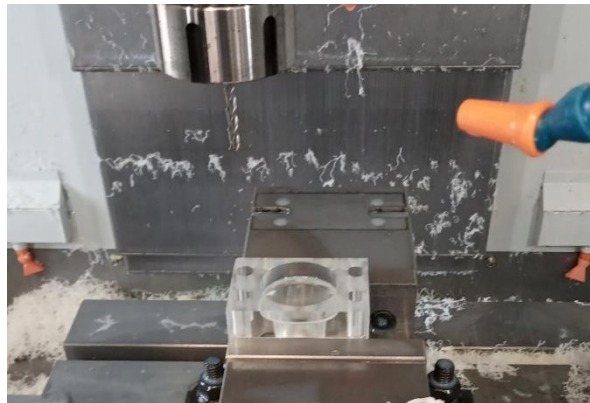


Ilustración 70. Proceso de fabricación de acople

4.4.2.1. Mordaza Auxiliar

Esta mordaza, de elaboración propia, cuenta en la parte inferior con unos railes para el anclaje al CNC, en la parte superior pueden verse las pizas de sujeción de la pieza, tras su fabricación, esta mordaza auxiliar puede dar paso a nuevos diseños y conformados en el CNC del laboratorio.



Ilustración 71..Mordaza auxiliar

4.4.2.2. Soporte para bastidor

El soporte que fijará el Venturi al bastidor será de PVC, o cloruro de polivinilo, es uno de los más utilizados dentro de la familia de los termoplásticos, es un material barato y mecanizable.

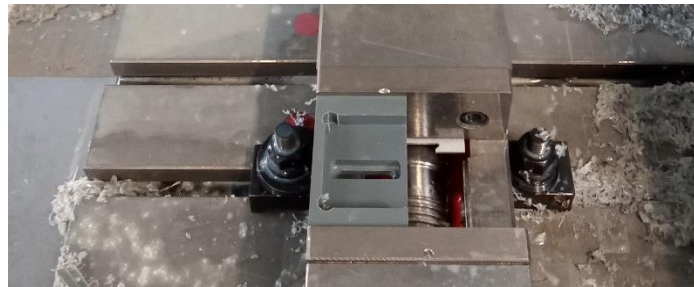


Ilustración 72. Soporte bastidor

Las operaciones a realizar en este elemento son, fresado en escuadra, perfilado y taladrado.

4.4.3. Bastidor

Para el bastidor principalmente se va a usar un perfil de aluminio de 35x35 mm, de ranura en T, el aluminio cuenta con una gran resistencia al impacto y una baja densidad, por lo que puede hacer manejable el sistema entero.



Ilustración 73. Perfil de aluminio ranura en T

La lista de materiales del bastidor es la siguiente:

- Perfil de aluminio Ranura en T 35x35x900 (x2)
- Perfil de aluminio Ranura en T 35x35x500 (x6)
- Escuadras de unión (x10)
- Tapones Perfil (x4)
- Juego Tornillo Cabeza Martillo, Tuerca y arandela (x20 cada uno)
- Soportes bastidor (x4)

Para el corte de perfiles de aluminio se ha usado la sierra de cinta se basa en la rotación de dos poleas que hacen avanzar la cinta a través de la pieza de trabajo, los cortes de estos tipos de maquinaria suelen ser bastante precisos y limpios.

4.4.3.1. Taco de soportes

El taco de los soportes está mecanizado sobre el plato de tres garras del torno del laboratorio, pero en el Centro de mecanizado.



Ilustración 74. Taco para soportes

4.4.4. Colector inferior

El colector inferior está hecho de metacrilato, como los Venturi y acoples, como se comenta en la fase de diseño en Inventor, el colector se ha decidido dividir en dos piezas iguales, para cada uno de los Venturi, a continuación, el despiece del conjunto:

- Colector Venturi Metacrilato (x2)
- Racores de toma rápida D6 a 1/8 con grifo (x18)
- Racores de toma rápida D10 a 1/8 (x18)

La única operación que tienen estos colectores es el taladrado de dos agujeros pasantes para la fijación al bastidor y contrachapado y nueve agujeros de 15 mm de profundidad para los nueve racores de 6 mm de diámetro con grifo en la parte inferior y otros nueve agujeros de 15 mm de profundidad concéntricos a los anteriores de diámetro 10 mm en la parte superior para los medidores de presión.



Ilustración 75. Fabricación colector inferior

En este caso, la rosca se ha realizado en el propio CNC con la broca roscada, puesto que la profundidad de la rosca es mayor que en los Venturi.



Ilustración 76. Roscado colector inferior

4.4.5. Colector superior

Al igual que el colector inferior, se ha dividido en dos, en este caso, cada colector va a tener de nuevo dos taladros pasantes para la fijación al bastidor y contrachapado, así como nueve taladros para los racores de 10 mm de diámetro, en este caso profundidad 10 mm, puesto que, para el interior, se va a realizar un taladro de 200 mm de profundidad, de 9 mm de diámetro, en el que va a ir roscado un racor con grifo para la purga, dicho taladro es una operación bastante crítica, dada la profundidad del mismo.



Ilustración 77. Fabricación colector superior

La imagen muestra el taladrado del conducto, la pieza debe estar anclada con firmeza puesto que, de no ser así, el movimiento circular de la broca podría causar vibración, originando desfase en la operación o incluso en el peor de los casos, una rotura de la broca, pieza o incluso el centro de mecanizado.



Ilustración 78. Colectores fabricados

4.4.6. Otros elementos

Una vez definidos los elementos fundamentales del sistema existen otros tales como:

- La bomba, encargada de impulsar el fluido, en nuestro caso agua a temperatura ambiente.
- Rotámetro, para medir el caudal que está ofreciendo nuestra bomba.
- Llaves de paso, para regular el caudal que va a entrar en nuestro sistema y asegurar el llenado de nuestros Venturi.
- Mangueras para unir todos los componentes de fontanería.
- Adaptadores necesarios para adaptar la manguera a los Venturi.
- Tuberías neumáticas para las conexiones entre los Venturi y los medidores de presión.

- Los tubos para los medidores de presión.
- Reglas milimétricas de hasta un metro para poder medir en MCA (metros columna de agua) la presión. Para el corte de las reglas se usará la grabadora láser, dado que las reglas van a ir cubiertas por metacrilato, dicha maquina será capaz de cortar las piezas de metacrilato.

4.5. Programación

A continuación, se muestra un resumen de lo que ha sido todo el proceso de fabricación:

VENTURIS PLANO Y CIRCULAR												
Comienzo:		19/02/2024										
PRECIO HORA:		26,55										
		TAREAS	TERMINADO	PENDIENTE	EN PROCESO	ESTADO	COSTE	TMO				
MORDAZA SUPLEMENTARIA		12	12	0	0		€382,76					
VENTURI PLANO Y CIRCULAR		26	26	0	0		€1.126,09					
BASTIDOR		9	9	0	0		€475,69					
TORNILLERIA		2	2	0	0		€5,82					
TOTAL		49	49	0	0		€1.990,36	83,7 H				
FECHA	MORDAZA SUPLEMENTARIA	TIEMPO	OPERACIÓN	IMAGEN	ESTADO	OBSERVAC.	UDS.PIEZA	CARACT.	COSTE	TMO	CEMO	C MATERIAL
	DISEÑO MORDAZA SUPLEMENTARIA	300	DISEÑO		Terminado					14,4 H	€382,76	€0,00
19-feb-2024	MORDAZA 2_A	120	MECANIZADO		Terminado			4				
	ROSCAS EN PIEZA ALTURA_85	90	MECANIZADO		Terminado			2				
	MORDAZA 2_B	60	MECANIZADO		Terminado			1				
	MORDAZA 2_B BIS	60	MECANIZADO		Terminado			1				
	MORDAZA 2_C	60	MECANIZADO		Terminado			1				
20-feb-2024	MORDAZA 2_D	120	MECANIZADO		Terminado			4				
	ESPÁRRAGO M12	10	COMERCIAL		Terminado			1				
	HEXAGONO LLAVE MORDAZA	45	MECANIZADO		Terminado			1				
	TUERCA T PARA ESCUADRA		MECANIZADO		Terminado			10				
21-mar-2024	POSICIONADOR EN ESCUADRA		MECANIZADO		Terminado			2				
	PLETINA RANURADA BRIDA ESCUADRA		MECANIZADO		Terminado							
FECHA	VENTURI PLANO Y CIRCULAR	TIEMPO	OPERACIÓN	IMAGEN	ESTADO	OBSERVAC.	UDS.PIEZA	CARACT.	COSTE	TEIMO	CEIMO	C MATERIAL
	DISEÑO VENTURI PLANO	240	DISEÑO		Terminado					51,3 H	€858,45	€267,64
	DISEÑO VENTURI CIRCULAR	240	DISEÑO		Terminado							
	CORTE MATERIAL PARA LOS DOS VENTURIS	120	CORTE AGUA		Terminado							
1-Abr-2024	LIMPIEZA CARAS TRAS CORTE	80	MECANIZADO		Terminado			4				
	DISEÑO ACOPLAMIENTO VENTURI PLANO A TUBOS	120	MECANIZADO		Terminado			2				
	DISEÑO ACOPLAMIENTO VENTURI CIRCULAR A TUBOS	120	MECANIZADO		Terminado			2				
1-Abr-2024	MECANIZADO VENTURI PLANO A	210	MECANIZADO		Terminado			1				
1-Abr-2024	MECANIZADO VENTURI PLANO B	210	MECANIZADO		Terminado			1				
3-Abr-2024	MECANIZADO VENTURI CIRCULAR A	180	MECANIZADO		Terminado			1				
3-Abr-2024	MECANIZADO VENTURI CIRCULAR B	180	MECANIZADO		Terminado			1				
4-Abr-2024	MECANIZADO ACOPLAM VENTURI PLANO A TUBOS	120	MECANIZADO		Terminado			2				
4-Abr-2024	MECANIZADO ACOPLAM VENTURI CIRCULAR A TUBOS	120	MECANIZADO		Terminado			2				
	FUJAS 4 mm		COMERCIAL		Terminado			4	0,88 €			
	CORDÓN TORICO		COMERCIAL		Terminado			2 D4	7,71 €			
	TORNILLOS, TUERCAS, ARANDELAS M---		COMERCIAL		Terminado			4	8,21 €			
	TUERCAS UNION PVC		COMERCIAL		Terminado			4	9,20 €			
	CONECTORES RAPIDOS D6 ROSCA 1/8		COMERCIAL		Terminado			18	22,55 €			
	GRIFOS MACHO 1/8 A TUBO D6		COMERCIAL		Terminado			20 7	100,81 €			
	CONECTORES RAPIDOS D10 ROSCA 1/4 TUBOS PIEZO		COMERCIAL		Terminado			36	65,77 €			
	BRIDAS ANCLAJE VENTURIS		COMERCIAL		Terminado				2,51 €			
	COMPRA MATERIAL COLECTORES (metacrilato 30x30-1m)		COMERCIAL		Terminado	Transparente		1 1 METRO	50,00 €			
	DISEÑO COLECTOR INFERIOR	120	DISEÑO		Terminado							
	DISEÑO COLECTOR SUPERIOR	120	DISEÑO		Terminado							
16-Abr-2024	MECANIZADO COLECTOR INFERIOR	360	MECANIZADO		Terminado							
16-Abr-2024	MECANIZADO COLECTOR SUPERIOR	360	MECANIZADO		Terminado							
	CORTE Y PEGADO DE TUBOS A VENTURIS	120			Terminado							
FECHA	BASTIDOR	TIEMPO	OPERACIÓN	IMAGEN	ESTADO	OBSERVAC.	UDS.PIEZA	CARACT.	COSTE	TEIMO	CEIMO	C MATERIAL
	PERFIL ALUMINIO 35x35x900		CORTE		Terminado		2			17,9 H	€475,69	€0,00
	PERFIL ALUMINIO 35x35x500		CORTE		Terminado		7					
	DISEÑO PIEZAS ANCLAJE VENTURIS A BASTIDOR	70	DISEÑO		Terminado		2					
	MECANIZADO PIEZAS ANCLAJE A BASTIDOR	180	MECANIZADO		Terminado							
	DISEÑO PATAS	45	DISEÑO		Terminado							
	MECANIZADO PATAS	60	MECANIZADO		Terminado		4					
	PANEL DE SOPORTE	120	CORTE+PINTURA		Terminado		1					
	MONTAJE BASTIDOR, PANEL, COLECTORES, VENTURIS	360	MONTAJE		Terminado							
	REGLAS MEDICION, TUBOS D6, TUBOS D10	240	MONTAJE		Terminado							
FECHA	TORNILLERIA	TIEMPO	OPERACIÓN	IMAGEN	ESTADO	OBSERVAC.	UDS.PIEZA	CARACT.	COSTE	TEIMO	CEIMO	C MATERIAL
	VENTURI PLANO M5x30				Terminado		26	INOXIDABLE	2,91 €	0,0 H	€0,00	€5,82
	VENTURI CIRCULAR M5x30				Terminado		26	INOXIDABLE	2,91 €			

Ilustración 79.KPI del proceso de fabricación

4.6. Procedimiento de ensayos

Una vez ensamblado el sistema, es el momento de someterlo a ensayos, que es uno de los principales objetivos de este trabajo.

El conjunto se situará sobre un banco hidráulico de ensayos dotado con una bomba centrífuga, que servirá de depósito de descarga del fluido, y permitirá la recirculación del agua.

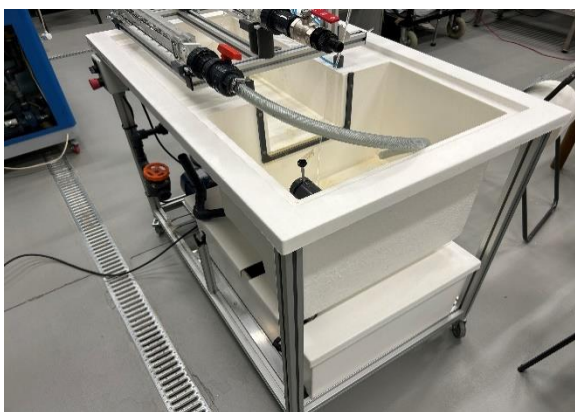


Ilustración 80. Banco hidráulico

El primer paso es elegir cuál de los dos Venturi se va a medir, para ello, se deberá conectar el rotámetro a la toma derecha del elegido con la manguera convencional de 23 mm de diámetro, por lo que el sentido del fluido será de izquierda a derecha.



Ilustración 81. Conexión de entrada Venturi

El segundo paso es comprobar que tenemos la llave de la válvula de bola de salida del Venturi cerrada, los grifos de los racores abiertos, tanto los de la entrada de los tubos de medición, como el de purga del colector superior.

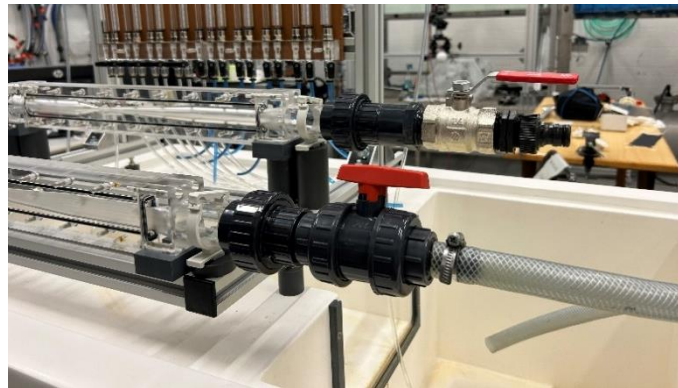


Ilustración 82. Conexión salida Venturi

El tercer paso es comprobar que la llave del rotámetro está cerrada para evitar que, cuando el sistema se ponga en marcha, se produzca el conocido golpe de ariete en la bomba. Una vez conectada la bomba a la red eléctrica, se debe realizar un marcha-paro con el fin de comprobar una posible fuga u otro golpe de ariete.



Ilustración 83. Bomba centrífuga

El cuarto paso es poner en marcha la bomba, el Venturi comenzará a llenarse abriendo poco a poco la llave de paso del rotámetro permitiendo al fluido entrar en el Venturi, el objetivo de llenar el sistema es obtener flujo estacionario, por lo que, una vez lleno, puede abrirse la llave de salida para mantener el fluido en movimiento.



Ilustración 84. Interruptores bomba centrífuga

El quinto paso es tomar las medidas de presión en los tubos de medición de izquierda a derecha para diferentes caudales, abriendo y cerrando la válvula del rotámetro para variar el caudal de entrada al Venturi. Los caudales entre los que se puede trabajar son 400 l/h y 1900 l/h; el rotámetro cuenta con una precisión de 50 l/h, las medidas se realizarán cada 100 aumentos de unidades de caudal, y se realizará tres veces para cada caudal, por lo que una vez terminados los ensayos experimentales se tendrán tres medidas de presión para un mismo caudal, con el objetivo de obtener valor medio.

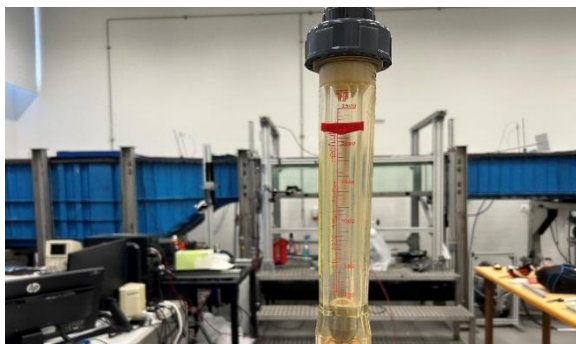


Ilustración 85. Rotámetro

El sexto paso es el mantenimiento del sistema, una vez terminadas las mediciones, se debe parar la bomba, tras ello, se abrirán todas las válvulas para que se vacíe por completo, se requerirá de un cubilete auxiliar para la desconexión de la manguera de la toma derecha, puesto que ésta puede soltar un poco de agua.

Por último, se volcará con mucho cuidado el tubo hacia el depósito de la mesa para retirar toda el agua posible, siempre con la ayuda del personal autorizado, si fuese posible. Hay una toma de presión de aire comprimido en el laboratorio, la cual puede ayudar a la limpieza excepcional a la limpieza del sistema. Todas estas medidas de prevención pueden ayudar a que el sistema tenga un mayor ciclo de vida y pueda mantener las características del primer día, al tratar con agua corremos el riesgo de filtraciones por las pequeñas fugas que presente el sistema y oxidación de los componentes metálicos.

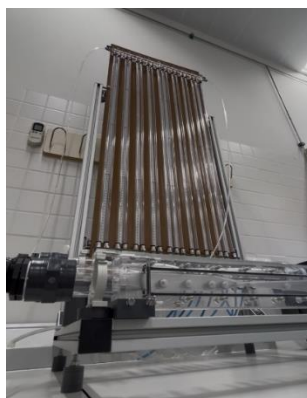


Ilustración 86. Sistema

Para la recogida de datos se usará una plantilla como la siguiente:

Q=		l/h								
Toma	p estática (mm H ₂ O)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (mm)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1										0,0305
2										0,0705
3										0,1105
4										0,1345
5										0,161
6										0,1875
7										0,2625
8										0,3345
9										0,4145

Ilustración 87. Tabla de toma datos

- La primera columna son las tomas que tiene el Venturi para medir la presión.
- La segunda recoge el dato obtenido experimentalmente de los medidores de presión.
- Las columnas con los títulos en azul son cálculos posteriores para adecuar el dato experimental.
- La última columna es la distancia a la que se encuentran las tomas, para su posterior graficación.

4.7. Ensayos experimentales

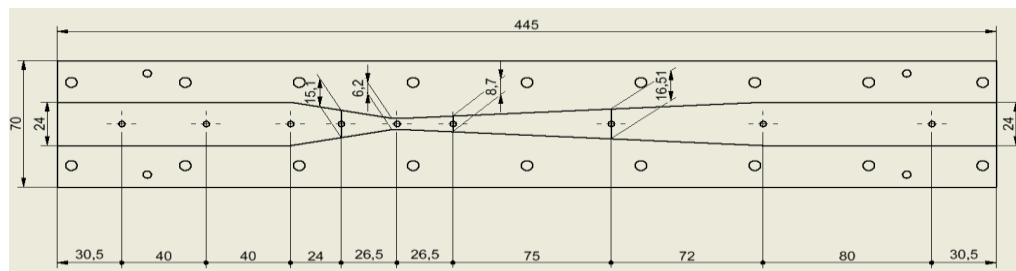


Ilustración 88. Punto de toma de datos

4.7.1. Venturi Rectangular

Con el sistema en marcha, los primeros ensayos son para comprobar que todo funciona correctamente, y efectivamente, se cumple el objetivo, se puede ver en los medidores de presión como la toma de presión número 5, correspondiente a la sección más estrecha (garganta), pierde presión al elevar su velocidad hasta la máxima que puede llegar el fluido en el sistema.

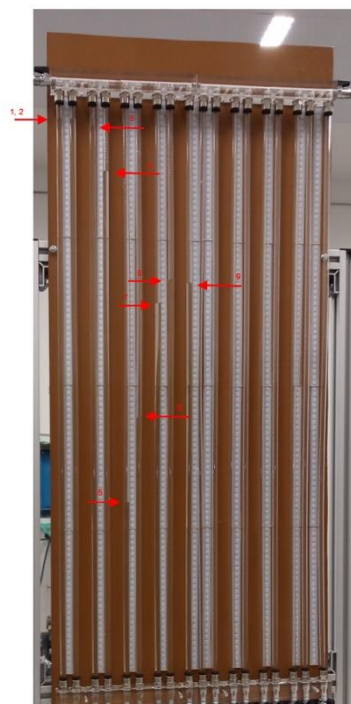


Ilustración 89. Presiones del ensayo

A medida que el caudal iba subiendo, se encontró el problema de que los tubos piezométricos no disponen de altura suficiente para realizar medidas a caudales superiores. Se podría trabajar para caudales pequeños pero el objetivo principal es que el sistema sea capaz de medir todos los caudales disponibles que ofrece la bomba, ya que, a caudales demasiados bajos, la presión en la sección crítica no alcanzaría el mínimo de presión para ser medida.

4.7.2. Venturi Circular

Para el Venturi circular los problemas en los ensayos experimentales se multiplican, tenemos el mismo problema que para el Venturi rectangular, los medidores de presión no son capaces de medir la presión mínima en la sección crítica para caudales bajos (caudales a los que no se va a trabajar desde un principio), así como para elevados caudales, poder medir la presión de entrada al sistema, a esto se le suma, que, cuando el caudal excede los 1000 l/h, surge un fenómeno llamado cavitación en la región de la garganta.

4.7.2.1. Cavitación

Es un fenómeno que ocurre cuando el fluido en su interior experimenta una caída significativa de presión por debajo de la presión de vapor del líquido. Como resultado, el líquido se evapora y se forman burbujas de vapor.

El proceso de cavitación comienza cuando el fluido se mueve a gran velocidad o pasa por zonas de alta restricción (como una válvula o un estrechamiento en la tubería), lo que

provoca una caída en la presión. Si la presión local del fluido desciende por debajo de la presión de vapor del mismo, se forman burbujas de vapor. Estas burbujas son transportadas por el flujo y, al llegar a una zona de mayor presión, colapsan violentamente.



Ilustración 90. Cavitación

El proceso termodinámico que ocurre es un isotérmico, dado que la temperatura a la que ocurre este cambio de fase se mantiene constante, únicamente varía la presión, que es la que desciende, originando un cambio de fase del fluido a gas momentáneamente.

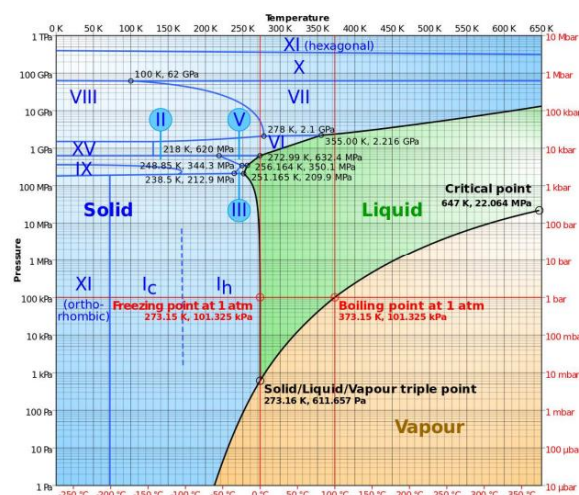


Ilustración 91. Diagrama de fases del agua

4.7.3. Manómetro digital

Como se ha comentado, los tubos piezométricos ofrecen un rango de trabajo escaso, es decir, no permiten trabajar con cualquier caudal de los ofrecidos por la bomba del banco hidráulico, ya que la altura de presión supera el rango de medida de los tubos (aproximadamente 1 m.c.a). Para superar este problema y poder realizar medidas para

cualquier caudal, se optó por utilizar un manómetro diferencial digital, en concreto el modelo PCE-910 de la marca PCE Components, que garantiza la más alta precisión y fiabilidad en un breve tiempo de respuesta. Permite medir la presión en diferentes unidades, para el caso de las presiones de los Venturi, en m.c.a, tiene un rango de $\pm 20,40$ m.c.a y una resolución de 0,5 m.c.a. El uso de estos manómetros hace que el sistema precise ciertas modificaciones, esto se debe a que el manómetro utiliza tubos de 4 mm de diámetro.



Ilustración 92. Manómetro digital

El manómetro tiene dos entradas, con las que se puede medir la diferencia de presión de dos puntos, la entrada de la izquierda es la presión de referencia, es decir, si no se mide sobre ningún punto, la referencia es la presión atmosférica. Para el caso de los Venturi, la presión de referencia será la presión de la toma 1.



Ilustración 93. Tomas manómetro digital

Para dichas entradas es necesario fabricar unos adaptadores, como puede verse en la imagen anterior, estos manómetros tienen unas tomas especiales para traducir la presión digitalmente y son incompatibles con los ya instalado.



Ilustración 94. Acoples para manómetro

El objetivo de diseñar estos cubos de metacrilato es adaptar el diámetro de los tubos neumáticos de diámetro 6 mm a 4 mm, que es el diámetro de las conexiones del manómetro.

Para medir la presión con el manómetro hay que seguir una serie de pasos:

- Con el Venturi lleno de agua, purgar las tuberías que van a ir conectadas al manómetro, para ello, con la ayuda de un barreño se sumergirá el extremo del tubo con el fin de llenarlo al completo para no tener burbujas de aire que puedan falsear la medición.
- Asentar el manómetro sobre una superficie estable, así como tratar en la medida de lo posible mantener los tubos neumáticos lo más estáticos posibles, esto favorecerá una medición más precisa.
- Esperar unos segundos desde que se ajusta el caudal para que el manómetro devuelva un valor fijo.

A partir de 1600 l/h, el manómetro no se mantiene estable, por lo que el caudal máximo a medir será éste.

5. Cálculos

5.1. Cálculos experimentales de presión

Como se ha comentado anteriormente, los cálculos experimentales se van a realizar en la misma hoja de Excel de toma de datos. Haciendo referencia a dicha tabla, el proceso es el siguiente:

- El dato obtenido experimentalmente es el de presión estática, dado que es la presión que tiene el fluido el reposo.
- Para obtener el dato en Pascales, la conversión es la siguiente:

$$p_{est} (Pa) = \frac{p (mmH_2O)}{1000 \text{ mm} \cdot g \cdot \rho} \quad (25)$$

- El incremento de presión se realiza con respecto a la primera toma, por lo tanto, es una simple diferencia entre el valor tomado y el inicial.
- Para el cálculo de la velocidad, la usada en las ecuaciones (22) y (24).
- La presión estática, la cual se mide en dirección al fluido, no es posible medirla en los Venturi, pero con los datos de la velocidad, que no deja de ser un dato experimental puesto que depende del caudal, y la densidad del fluido, puede llegarse a la presión dinámica de la siguiente forma:

$$p_{din} (Pa) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (26)$$

- Al igual que el incremento de presión estática, el incremento de presión dinámica se mide con respecto al punto de entrada.
- La presión total o presión de estancamiento, es la presión sumatoria de ambas presiones, esta presión se mide a menudo utilizando un dispositivo llamado tubo de Pitot, que consiste en un tubo orientado hacia el flujo del fluido. El tubo de Pitot tiene una abertura orientada hacia arriba para medir la presión de estancamiento o total y una o más aberturas adicionales orientadas perpendicularmente al flujo para medir la presión estática. Al restar la presión estática de la presión total, se puede determinar la presión dinámica.

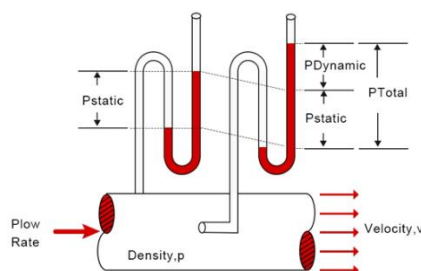


Ilustración 95. Tubo de Pitot

5.2. Cálculos experimentales del Coeficiente de descarga y pérdidas

Para el cálculo del Coeficiente de descarga son necesarios los caudales ideal y real, el caudal real es básicamente el caudal de entrada medido en el rotámetro.

Para el caudal ideal usaremos la ecuación (18):

$$Q_{ideal} = \frac{\sqrt{2 \cdot (P_1 - P_2)}}{\sqrt{\rho \cdot \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right)}}$$

Concretamente, el punto 1 es el punto de entrada, mientras que el punto 2 es el punto de la garganta o punto crítico, en el que la presión es mínima, para obtener la diferencia de presiones ($P_1 - P_2$) más precisa, se debe realizar el ensayo mínimo tres veces con el fin de obtener un valor medio y preciso.

Para el cálculo del coeficiente de descarga, C_d :

$$C_d = \frac{Q_{real}}{Q_{ideal}}$$

El coeficiente de descarga total será la media de todos aquellos para cada caudal.

Para el cálculo de pérdidas en este caso se tomarán las presiones en la entrada y en la salida de los Venturi, en concreto se seguirá la ecuación (11).

$$K = \frac{P_1 - P_2}{\frac{1}{2} \rho g}$$

En este caso, la diferencia de presión será medida en mm, por lo que el coeficiente pérdidas saldrá expresado en Pa.

6. Resultados

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos en todos los apartados previos. Los resultados se presentan de forma estructurada, apoyados en gráficos con el fin de demostrar el objetivo principal por el que se ha llevado a cabo este Trabajo Fin de Grado, diseñar, fabricar y caracterizar un tubo de Venturi para su uso.

Al igual que el resto de capítulos, éste contará con dos tipos de resultados, que a su vez son dos caminos por los que llegar al objetivo.

6.1. Resultados experimentales

6.1.1. Venturi Rectangular

Q=	400 l/h		Manómetro digital							
Toma	p estática (mm)	p estática (Pa)	Δp estat (mm)	Δp estat (Pa)	v (m/s)	p dinámica (mm)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	210	2060	0	0	0,58	17,07	167	2228	167	0,0305
2	190	1864	-20	-196	0,58	17,07	167	2031	-29	0,0705
3	210	2060	0	0	0,58	17,07	167	2228	167	0,1105
4	145	1422	-65	-638	0,92	43,12	423	1845	-215	0,1345
5	-160	-1570	-370	-3630	2,24	255,77	2509	940	-1121	0,161
6	-110	-1079	-320	-3139	1,60	129,90	1274	195	-1865	0,1875
7	40	392	-170	-1668	0,84	36,11	354	747	-1313	0,2625
8	50	491	-160	-1570	0,58	17,07	167	658	-1402	0,3345
9	50	491	-160	-1570	0,58	17,07	167	658	-1402	0,4145

Tabla 1.Resultados Venturi rectangular a 400 l/h

Q=	500 l/h		Manómetro digital							
Toma	p estática (mm)	p estática (Pa)	Δp estat (mm)	Δp estat (Pa)	v (m/s)	p dinámica (mm)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	280	2747	0	0	0,72	26,67	262	3008	262	0,0305
2	270	2649	-10	-98	0,72	26,67	262	2910	164	0,0705
3	265	2600	-15	-147	0,72	26,67	262	2861	114	0,1105
4	200	1962	-80	-785	1,15	67,38	661	2623	-124	0,1345
5	-255	-2502	-535	-5248	2,80	399,64	3921	1419	-1328	0,161
6	-140	-1373	-420	-4120	2,00	202,96	1991	618	-2129	0,1875
7	30	294	-250	-2453	1,05	56,43	554	848	-1899	0,2625
8	70	687	-210	-2060	0,72	26,67	262	948	-1798	0,3345
9	70	687	-210	-2060	0,72	26,67	262	948	-1798	0,4145

Tabla 2.Resultados Venturi rectangular a 500 l/h

Q=	600 l/h		Manómetro digital							
Toma	p estática (mm)	p estática (Pa)	Δp estat (mm)	Δp estat (Pa)	v (m/s)	p dinámica (mm)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	390	3826	0	0	1	38	377	4203	377	0,0305
2	370	3630	-20	-196	1	38	377	4006	181	0,0705
3	370	3630	-20	-196	1	38	377	4006	181	0,1105
4	280	2747	-110	-1079	1	97	952	3699	-127	0,1345
5	-325	-3188	-715	-7014	3	575	5646	2457	-1369	0,1610
6	-185	-1815	-575	-5641	2	292	2867	1052	-2774	0,1875
7	65	638	-325	-3188	1	81	797	1435	-2391	0,2625
8	100	981	-290	-2845	1	38	377	1358	-2468	0,3345
9	100	981	-290	-2845	1	38	377	1358	-2468	0,4145

Tabla 3.Resultados Venturi rectangular a 600 l/h

Q=	700 l/h		Manómetro digital							
Toma	p estática (mm)	p estática (Pa)	Δp estat (mm)	Δp estat (Pa)	v (m/s)	p dinámica (mm)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	490	4807	0	0	1,01	52,27	513	5320	513	0,0305
2	465	4562	-25	-245	1,01	52,27	513	5074	268	0,0705
3	470	4611	-20	-196	1,01	52,27	513	5124	317	0,1105
4	345	3384	-145	-1422	1,61	132,06	1295	4680	-127	0,1345
5	-430	-4218	-920	-9025	3,92	783,30	7684	3466	-1341	0,161
6	-235	-2305	-725	-7112	2,79	397,81	3902	1597	-3210	0,1875
7	90	883	-400	-3924	1,47	110,60	1085	1968	-2839	0,2625
8	130	1275	-360	-3532	1,01	52,27	513	1788	-3019	0,3345
9	125	1226	-365	-3581	1,01	52,27	513	1739	-3068	0,4145

Tabla 4.Resultados Venturi rectangular a 700 l/h

Q=	800 l/h		Manómetro digital							
Toma	p estática (mm)	p estática (Pa)	Δp estat (mm)	Δp estat (Pa)	v (m/s)	p dinámica (mm)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	635	6229	0	0	1,16	68,28	670	6899	670	0,0305
2	590	5788	-45	-441	1,16	68,28	670	6458	228	0,0705
3	610	5984	-25	-245	1,16	68,28	670	6654	425	0,1105
4	435	4267	-200	-1962	1,84	172,48	1692	5959	-270	0,1345
5	-590	-5788	-1225	-12017	4,48	1023,09	10036	4249	-1981	0,161
6	-305	-2992	-940	-9221	3,19	519,59	5097	2105	-4124	0,1875
7	115	1128	-520	-5101	1,68	144,45	1417	2545	-3684	0,2625
8	180	1766	-455	-4464	1,16	68,28	670	2436	-3794	0,3345
9	175	1717	-460	-4513	1,16	68,28	670	2387	-3843	0,4145

Tabla 5.Resultados Venturi rectangular a 800 l/h

Q=	900 l/h		Manómetro digital							
Toma	p estática (mm)	p estática (Pa)	Δp estat (mm)	Δp estat (Pa)	v (m/s)	p dinámica (mm)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	795	7799	0	0	1,30	86,41	848	8647	848	0,0305
2	735	7210	-60	-589	1,30	86,41	848	8058	259	0,0705
3	770	7554	-25	-245	1,30	86,41	848	8401	602	0,1105
4	545	5346	-250	-2453	2,07	218,30	2141	7488	-311	0,1345
5	-765	-7505	-1560	-15304	5,04	1294,84	12702	5198	-2601	0,161
6	-375	-3679	-1170	-11478	3,59	657,60	6451	2772	-5027	0,1875
7	150	1472	-645	-6327	1,89	182,82	1794	3265	-4534	0,2625
8	230	2256	-565	-5543	1,30	86,41	848	3104	-4695	0,3345
9	220	2158	-575	-5641	1,30	86,41	848	3006	-4793	0,4145

Tabla 6.Resultados Venturi rectangular a 900 l/h

Q=	1000 l/h		Manómetro digital							
Toma	p estática (mm)	p estática (Pa)	Δp estat (mm)	Δp estat (Pa)	v (m/s)	p dinámica (mm)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	945	9270	0	0	1,45	106,68	1047	10317	1047	0,0305
2	890	8731	-55	-540	1,45	106,68	1047	9777	507	0,0705
3	915	8976	-30	-294	1,45	106,68	1047	10023	752	0,1105
4	650	6377	-295	-2894	2,30	269,50	2644	9020	-250	0,1345
5	-925	-9074	-1870	-18345	5,60	1598,57	15682	6608	-2663	0,161
6	-455	-4464	-1400	-13734	3,99	811,85	7964	3501	-5770	0,1875
7	175	1717	-770	-7554	2,10	225,71	2214	3931	-5339	0,2625
8	265	2600	-680	-6671	1,45	106,68	1047	3646	-5624	0,3345
9	265	2600	-680	-6671	1,45	106,68	1047	3646	-5624	0,4145

Tabla 7.Resultados Venturi rectangular a 1000 l/h

Q=	1100 l/h		Manómetro digital							
Toma	p estática (mm)	p estática (Pa)	Δp estat (mm)	Δp estat (Pa)	v (m/s)	p dinámica (mm)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	1115	10938	0	0	1,59	129,09	1266	12204	1266	0,0305
2	1025	10055	-90	-883	1,59	129,09	1266	11322	383	0,0705
3	1085	10644	-30	-294	1,59	129,09	1266	11910	972	0,1105
4	775	7603	-340	-3335	2,53	326,10	3199	10802	-136	0,1345
5	-1135	-11134	-2250	-22073	6,16	1934,27	18975	7841	-3097	0,161
6	-535	-5248	-1650	-16187	4,39	982,34	9637	4388	-6550	0,1875
7	205	2011	-910	-8927	2,31	273,11	2679	4690	-6248	0,2625
8	320	3139	-795	-7799	1,59	129,09	1266	4406	-6533	0,3345
9	310	3041	-805	-7897	1,59	129,09	1266	4307	-6631	0,4145

Tabla 8.Resultados Venturi rectangular a 1100 l/h

Q=	1200 l/h	Manómetro digital								
Toma	p estática (mm)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (mm)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	1225	12017	0	0	1,74	153,62	1507	13524	1507	0,0305
2	1135	11134	-90	-883	1,74	153,62	1507	12641	624	0,0705
3	1185	11625	-40	-392	1,74	153,62	1507	13132	1115	0,1105
4	845	8289	-380	-3728	2,76	388,08	3807	12097	79	0,1345
5	-1235	-12115	-2460	-24133	6,72	2301,95	22582	10467	-1551	0,161
6	-560	-5494	-1785	-17511	4,79	1169,07	11469	5975	-6042	0,1875
7	225	2207	-1000	-9810	2,53	325,02	3188	5396	-6622	0,2625
8	350	3434	-875	-8584	1,74	153,62	1507	4941	-7077	0,3345
9	340	3335	-885	-8682	1,74	153,62	1507	4842	-7175	0,4145

Tabla 9.Resultados Venturi rectangular a 1200 l/h

Q=	1300 l/h	Manómetro digital								
Toma	p estática (mm)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (mm)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	1425	13979	0	0	1,88	180,29	1769	15748	1769	0,0305
2	1335	13096	-90	-883	1,88	180,29	1769	14865	886	0,0705
3	1385	13587	-40	-392	1,88	180,29	1769	15356	1376	0,1105
4	1000	9810	-425	-4169	2,99	455,46	4468	14278	299	0,1345
5	-1485	-14568	-2910	-28547	7,28	2701,59	26503	11935	-2045	0,161
6	-655	-6426	-2080	-20405	5,19	1372,03	13460	7034	-6945	0,1875
7	275	2698	-1150	-11282	2,74	381,45	3742	6440	-7539	0,2625
8	420	4120	-1005	-9859	1,88	180,29	1769	5889	-8090	0,3345
9	410	4022	-1015	-9957	1,88	180,29	1769	5791	-8188	0,4145

Tabla 10.Resultados Venturi rectangular a 1300 l/h

Q=	1400 l/h	Manómetro digital								
Toma	p estática (mm)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (mm)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	1600	15696	0	0	2,03	209,10	2051	17747	2051	0,0305
2	1500	14715	-100	-981	2,03	209,10	2051	16766	1070	0,0705
3	1560	15304	-40	-392	2,03	209,10	2051	17355	1659	0,1105
4	1125	11036	-475	-4660	3,22	528,22	5182	16218	522	0,1345
5	-1695	-16628	-3295	-32324	7,84	3133,20	30737	14109	-1587	0,161
6	-755	-7407	-2355	-23103	5,59	1591,23	15610	8203	-7493	0,1875
7	300	2943	-1300	-12753	2,95	442,39	4340	7283	-8413	0,2625
8	475	4660	-1125	-11036	2,03	209,10	2051	6711	-8985	0,3345
9	470	4611	-1130	-11085	2,03	209,10	2051	6662	-9034	0,4145

Tabla 11.Resultados Venturi rectangular a 1400 l/h

Q=	1500 l/h	Manómetro digital								
Toma	p estática (mm)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (mm)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	1825	17903	0	0	2,17	240,04	2355	20258	2355	0,0305
2	1715	16824	-110	-1079	2,17	240,04	2355	19179	1276	0,0705
3	1775	17413	-50	-491	2,17	240,04	2355	19768	1864	0,1105
4	1275	12508	-550	-5396	3,45	606,38	5949	18456	553	0,1345
5	-1955	-19179	-3780	-37082	8,40	3596,79	35285	16106	-1797	0,161
6	-845	-8289	-2670	-26193	5,99	1826,67	17920	9630	-8273	0,1875
7	340	3335	-1485	-14568	3,16	507,84	4982	8317	-9586	0,2625
8	550	5396	-1275	-12508	2,17	240,04	2355	7750	-10153	0,3345
9	535	5248	-1290	-12655	2,17	240,04	2355	7603	-10300	0,4145

Tabla 12.Resultados Venturi rectangular a 1500 l/h

Q=	1600 l/h	Manómetro digital								
Toma	p estática (mm)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (mm)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	2035	19963	0	0	2,31	273,11	2679	22643	2679	0,0305
2	1915	18786	-120	-1177	2,31	273,11	2679	21465	1502	0,0705
3	1975	19375	-60	-589	2,31	273,11	2679	22054	2091	0,1105
4	1425	13979	-610	-5984	3,68	689,93	6768	20747	784	0,1345
5	-2210	-21680	-4245	-41643	8,96	4092,35	40146	18466	-1498	0,161
6	-1000	-9810	-3035	-29773	6,39	2078,34	20389	10579	-9385	0,1875
7	385	3777	-1650	-16187	3,37	577,81	5668	9445	-10518	0,2625
8	600	5886	-1435	-14077	2,31	273,11	2679	8565	-11398	0,3345
9	585	5739	-1450	-14225	2,31	273,11	2679	8418	-11545	0,4145

Tabla 13.Resultados Venturi rectangular a 1600 l/h

Pese a la toma de datos tan amplia, sólo se han graficado algunas tomas con el objetivo de no sobrecargar con demasiadas curvas las siguientes gráficas:

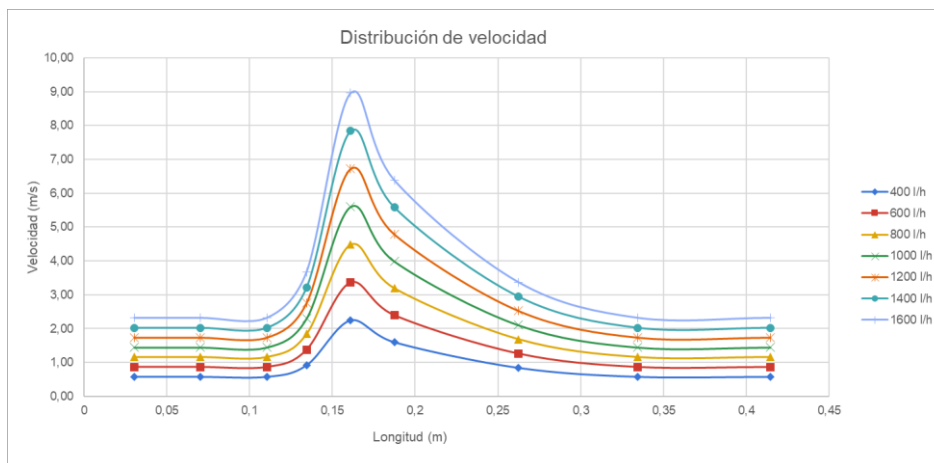


Ilustración 96. Distribución velocidades Venturi rectangular

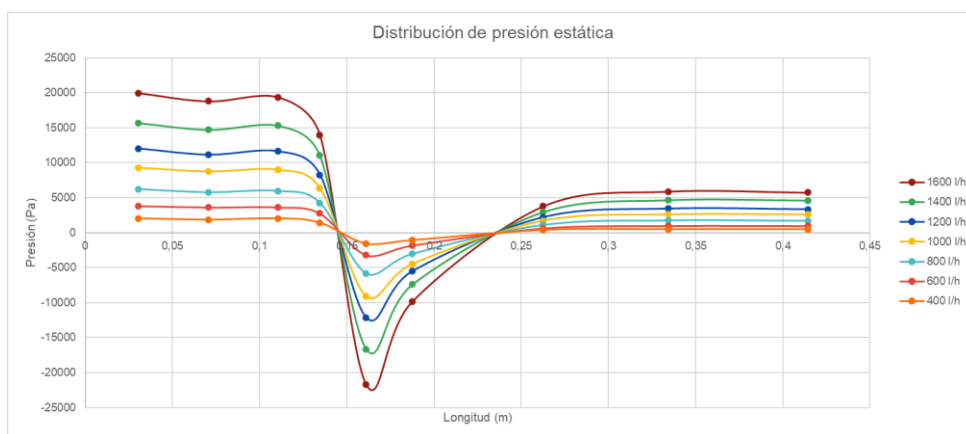


Ilustración 97. Distribución de presiones estáticas Venturi rectangular

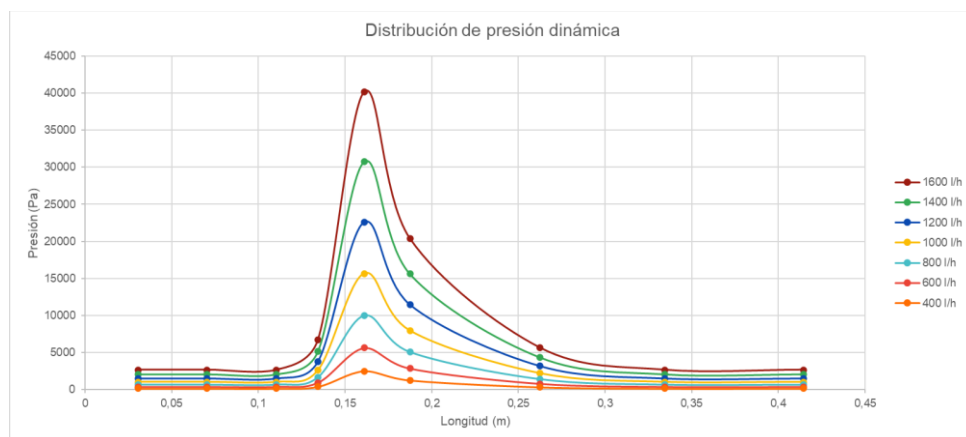


Ilustración 98. Distribución de presiones dinámica Venturi rectangular

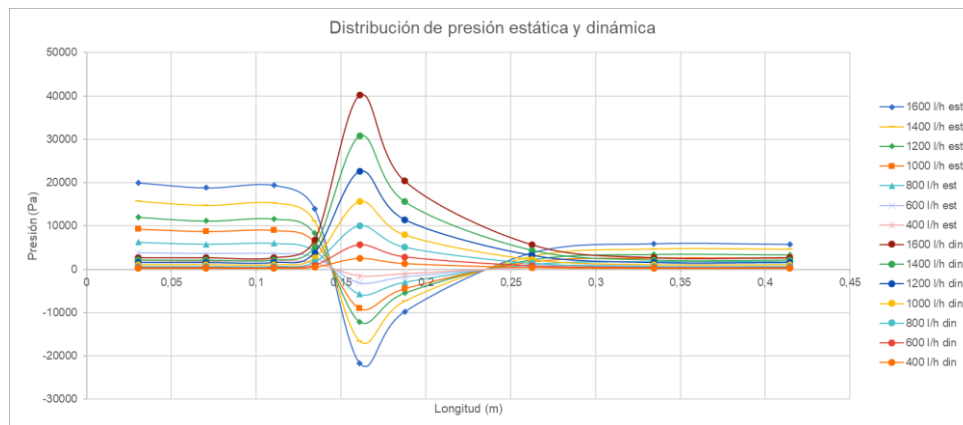


Ilustración 99. Distribución de presiones Venturi rectangular

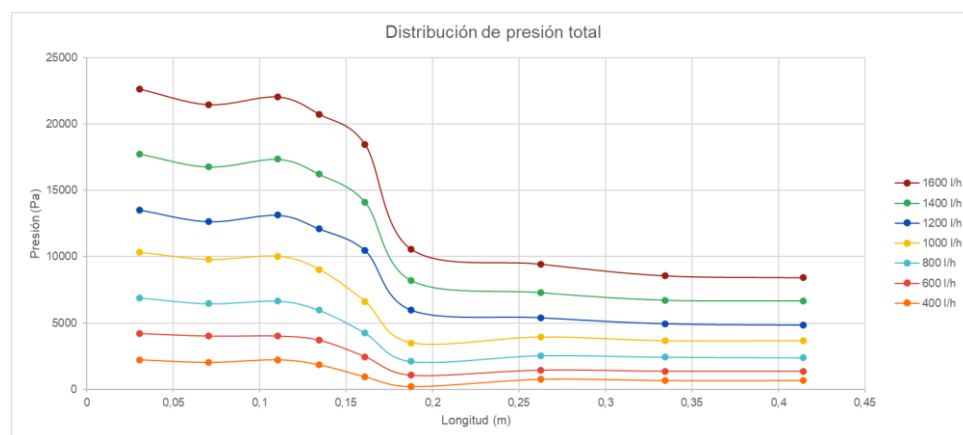


Ilustración 100. Distribución de presiones totales Venturi rectangular

6.1.2. Venturi Circular

Q=	400 l/h	Manómetro digital						
Toma	p estática (mm Hg)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	-340	-3335	0	0	0,25	30	30	0,0305
2	-325	-3188	15	147	0,25	30	177	0,0705
3	-350	-3434	-10	-98	0,25	30	-68	0,1105
4	-365	-3581	-25	-245	0,62	192	-53	0,1345
5	-1515	-14862	-1175	-11527	3,68	6772	-4754	0,161
6	-775	-7603	-435	-4267	1,87	1747	-2521	0,1875
7	-585	-5739	-245	-2403	0,52	135	-2268	0,2625
8	-540	-5297	-200	-1962	0,25	30	-1932	0,3345
9	-540	-5297	-200	-1962	0,25	30	-1932	0,4145

Tabla 14. Resultados Venturi circular a 400 l/h

Q=	500 l/h		Manómetro digital					
Toma	p estática (mm Hg)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	-225	-2207	0	0	0,31	47	47	0,0305
2	-210	-2060	15	147	0,31	47	194	0,0705
3	-225	-2207	0	0	0,31	47	47	0,1105
4	-245	-2403	-20	-196	0,78	301	105	0,1345
5	-1990	-19522	-1765	-17315	4,60	10582	-6733	0,161
6	-860	-8437	-635	-6229	2,34	2729	-3500	0,1875
7	-550	-5396	-325	-3188	0,65	211	-2977	0,2625
8	-490	-4807	-265	-2600	0,31	47	-2553	0,3345
9	-490	-4807	-265	-2600	0,31	47	-2553	0,4145

Tabla 15.Resultados Venturi circular a 500 l/h

Q=	600 l/h		Manómetro digital					
Toma	p estática (mm Hg)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	-65	-638	0	0	0,37	68	68	0,0305
2	-65	-638	0	0	0,37	68	68	0,0705
3	-75	-736	-10	-98	0,37	68	-30	0,1105
4	-110	-1079	-45	-441	0,93	433	-8	0,1345
5	-2415	-23691	-2350	-23054	5,52	15238	-7816	0,161
6	-915	-8976	-850	-8339	2,80	3930	-4408	0,1875
7	-545	-5346	-480	-4709	0,78	304	-4405	0,2625
8	-470	-4611	-405	-3973	0,37	68	-3905	0,3345
9	-470	-4611	-405	-3973	0,37	68	-3905	0,4145

Tabla 16.Resultados Venturi circular a 600 l/h

Q=	700 l/h		Manómetro digital					
Toma	p estática (mm Hg)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	45	441	0	0	0,43	92	92	0,0305
2	45	441	0	0	0,43	92	92	0,0705
3	30	294	-15	-147	0,43	92	-55	0,1105
4	-30	-294	-75	-736	1,09	589	-146	0,1345
5	-3090	-30313	-3135	-30754	6,44	20740	-10014	0,161
6	-1085	-10644	-1130	-11085	3,27	5349	-5736	0,1875
7	-515	-5052	-560	-5494	0,91	413	-5080	0,2625
8	-430	-4218	-475	-4660	0,43	92	-4567	0,3345
9	-430	-4218	-475	-4660	0,43	92	-4567	0,4145

Tabla 17.Resultados Venturi circular a 700 l/h

Q=	800 l/h		Manómetro digital					
Toma	p estática (mm Hg)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	215	2109	0	0	0,49	121	121	0,0305
2	175	1717	-40	-392	0,49	121	-272	0,0705
3	210	2060	-5	-49	0,49	121	72	0,1105
4	100	981	-115	-1128	1,24	770	-358	0,1345
5	-3720	-36493	-3935	-38602	7,36	27089	-11513	0,161
6	-1195	-11723	-1410	-13832	3,74	6987	-6845	0,1875
7	-465	-4562	-680	-6671	1,04	540	-6131	0,2625
8	-375	-3679	-590	-5788	0,49	121	-5667	0,3345
9	-370	-3630	-585	-5739	0,49	121	-5618	0,4145

Tabla 18.Resultados Venturi circular a 800 l/h

Q=	900 l/h		Manómetro digital					
Toma	p estática (mm Hg)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	395	3,87E+03	0	0,00E+00	0,55	153	153	0,0305
2	350	3,43E+03	-45	-4,41E+02	0,55	153	-289	0,0705
3	380	3,73E+03	-15	-1,47E+02	0,55	153	6	0,1105
4	260	2,55E+03	-135	-1,32E+03	1,40	974	-350	0,1345
5	-4510	-4,42E+04	-4905	-4,81E+04	8,28	34285	-13833	0,161
6	-1355	-1,33E+04	-1750	-1,72E+04	4,21	8843	-8325	0,1875
7	-445	-4,37E+03	-840	-8,24E+03	1,17	683	-7557	0,2625
8	-325	-3,19E+03	-720	-7,06E+03	0,55	153	-6911	0,3345
9	-320	-3,14E+03	-715	-7,01E+03	0,55	153	-6861	0,4145

Tabla 19.Resultados Venturi circular a 900 l/h

Q=	1000 l/h		Manómetro digital					
Toma	p estática (mm Hg)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	610	5984	0	0	0,61	189	189	0,0305
2	550	5396	-60	1521	0,61	189	1709	0,0705
3	585	5739	-25	1864	0,61	189	2052	0,1105
4	440	4316	-170	441	1,55	1203	1644	0,1345
5	-5410	-53072	-6020	-56947	9,20	42327	-14620	0,161
6	-1520	-14911	-2130	-18786	4,67	10917	-7869	0,1875
7	-400	-3924	-1010	-7799	1,30	844	-6955	0,2625
8	-255	-2502	-865	-6377	0,61	189	-6188	0,3345
9	-245	-2403	-855	-6278	0,61	189	-6090	0,4145

Tabla 20.Resultados Venturi circular a 1000 l/h

Q=	1100 l/h		Manómetro digital					
Toma	p estática (mm Hg)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	780	7652	0	0	0,68	228	228	0,0305
2	720	7063	-60	-589	0,68	228	-360	0,0705
3	780	7652	0	0	0,68	228	228	0,1105
4	600	5886	-180	-1766	1,71	1456	-310	0,1345
5	-6230	-61116	-7010	-68768	10,12	51216	-17552	0,161
6	-1680	-16481	-2460	-24133	5,14	13210	-10923	0,1875
7	-400	-3924	-1180	-11576	1,43	1021	-10555	0,2625
8	-195	-1913	-975	-9565	0,68	228	-9337	0,3345
9	-185	-1815	-965	-9467	0,68	228	-9239	0,4145

Tabla 21.Resultados Venturi circular a 1100 l/h

Q=	1200 l/h		Manómetro digital					
Toma	p estática (mm Hg)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	960	9418	0	0	0,74	271	271	0,0305
2	870	8535	-90	-883	0,74	271	-611	0,0705
3	930	9123	-30	-294	0,74	271	-23	0,1105
4	720	7063	-240	-2354	1,86	1732	-622	0,1345
5	-6770	-66414	-7730	-75831	11,04	60951	-14880	0,161
6	-1790	-17560	-2750	-26978	5,61	15721	-11257	0,1875
7	-355	-3483	-1315	-12900	1,56	1215	-11685	0,2625
8	-185	-1815	-1145	-11232	0,74	271	-10961	0,3345
9	-175	-1717	-1135	-11134	0,74	271	-10863	0,4145

Tabla 22.Resultados Venturi circular a 1200 l/h

Q=	1300 l/h		Manómetro digital					
Toma	p estática (mm Hg)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	1210	11870	0	0	0,80	319	319	0,0305
2	1080	10595	-130	-1275	0,80	319	-957	0,0705
3	1190	11674	-20	-196	0,80	319	122	0,1105
4	910	8927	-300	-2943	2,02	2033	-910	0,1345
5	-7900	-77499	-9110	-89369	11,96	71533	-17836	0,161
6	-2030	-19914	-3240	-31784	6,07	18450	-13334	0,1875
7	-310	-3041	-1520	-14911	1,69	1426	-13485	0,2625
8	-110	-1079	-1320	-12949	0,80	319	-12631	0,3345
9	-95	-932	-1305	-12802	0,80	319	-12483	0,4145

Tabla 23.Resultados Venturi circular a 1300 l/h

Q=	1400 l/h		Manómetro digital					
Toma	p estática (mm Hg)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	745	7308	0	0	0,86	369	369	0,0305
2	1310	12851	565	5543	0,86	369	5912	0,0705
3	1410	13832	665	6524	0,86	369	6893	0,1105
4	1120	10987	375	3679	2,17	2358	6037	0,1345
5	-8820	-86524	-9565	-93833	12,88	82961	-10872	0,161
6	-2210	-21680	-2955	-28989	6,54	21398	-7591	0,1875
7	-250	-2453	-995	-9761	1,82	1654	-8107	0,2625
8	-25	-245	-770	-7554	0,86	369	-7184	0,3345
9	-15	-147	-760	-7456	0,86	369	-7086	0,4145

Tabla 24.Resultados Venturi circular a 1400 l/h

Q=	1500 l/h		Manómetro digital					
Toma	p estática (mm Hg)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	1840	18050	0	0	0,92	424	424	0,0305
2	1680	16481	-160	-1570	0,92	424	-1145	0,0705
3	1820	17854	-20	-196	0,92	424	228	0,1105
4	1470	14421	-370	-3630	2,33	2707	-923	0,1345
5	-9510	-93293	-11350	-111344	13,80	95236	-16108	0,161
6	-2520	-24721	-4360	-42772	7,01	24564	-18208	0,1875
7	-180	-1766	-2020	-19816	1,95	1899	-17918	0,2625
8	60	589	-1780	-17462	0,92	424	-17038	0,3345
9	65	638	-1775	-17413	0,92	424	-16989	0,4145

Tabla 25.Resultados Venturi circular a 1500 l/h

Q=	1600 l/h		Manómetro digital					
Toma	p estática (mm Hg)	p estática (Pa)	Δp estát (mm)	Δp estát (Pa)	v (m/s)	p dinámica (Pa)	p total (Pa)	distancia (m)
1	3090	30313	0	0	0,98	483	483	0,0305
2	2980	29234	-110	-1079	0,98	483	-597	0,0705
3	3230	31686	140	1373	0,98	483	1856	0,1105
4	2760	27076	-330	-3237	2,48	3080	-158	0,1345
5	-9530	-93489	-12620	-123802	14,72	108357	-15445	0,161
6	-3350	-32864	-6440	-63176	7,48	27948	-35229	0,1875
7	-160	-1570	-3250	-31883	2,08	2160	-29722	0,2625
8	170	1668	-2920	-28645	0,98	483	-28163	0,3345
9	175	1717	-2915	-28596	0,98	483	-28114	0,4145

Tabla 26.Resultados Venturi circular a 1600 l/h

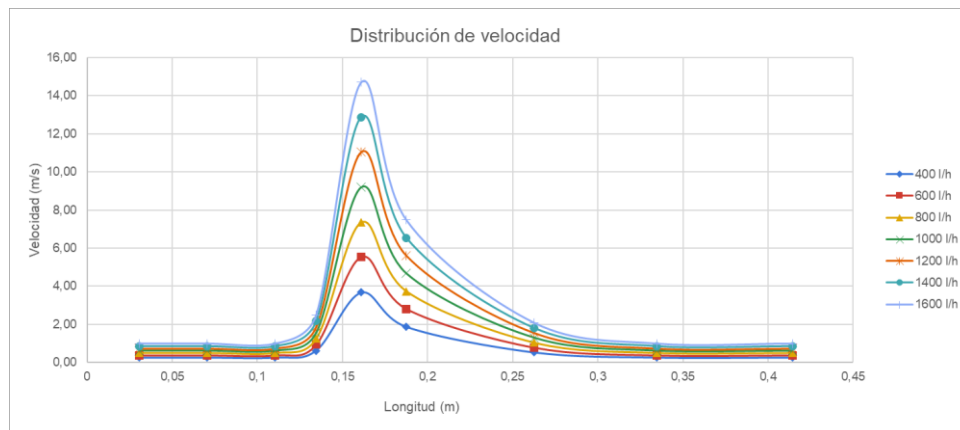


Ilustración 101. Distribución de velocidades Venturi circular

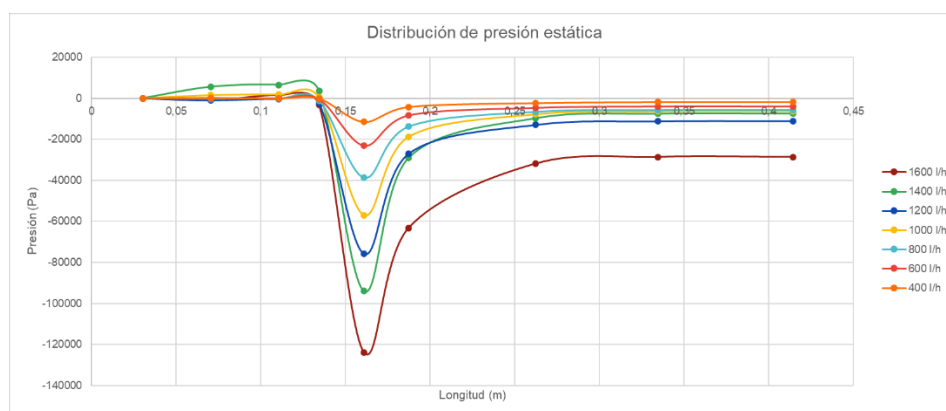


Ilustración 102. Distribución de presiones estáticas Venturi circular

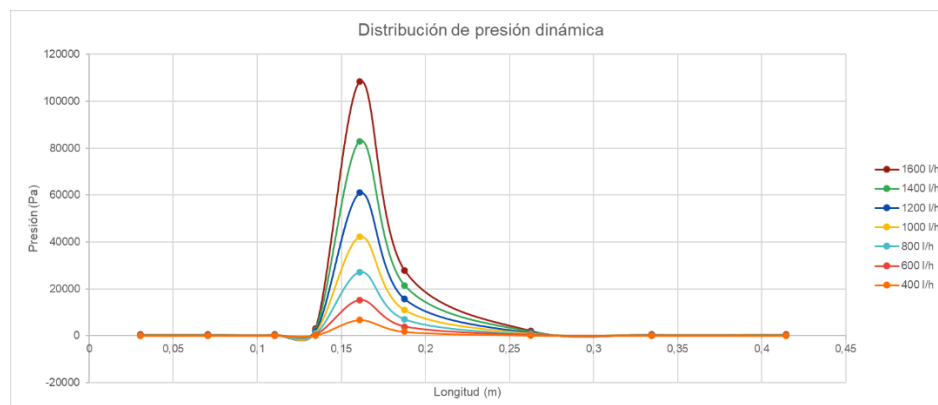


Ilustración 103. Distribución de presiones dinámicas Venturi circular

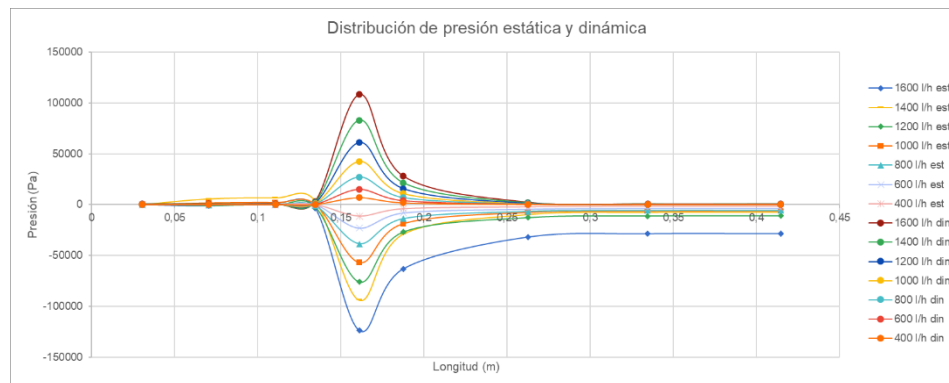


Ilustración 104. Distribución de presiones Venturi circular

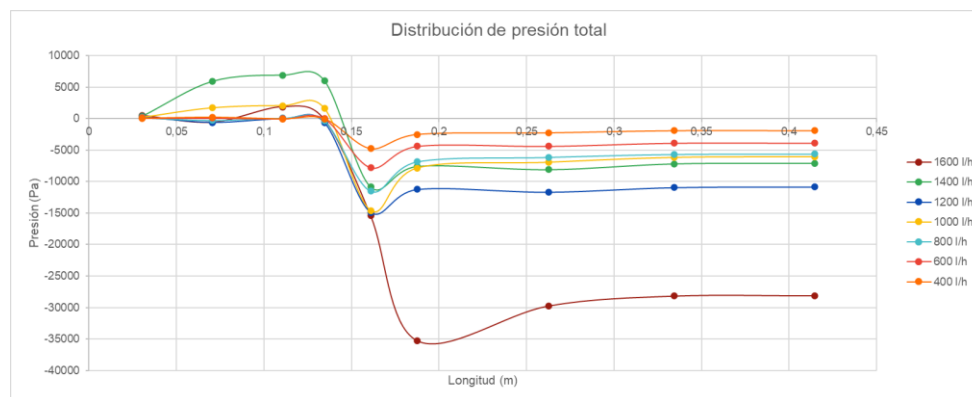


Ilustración 105. Distribución de presiones totales Venturi circular

6.1.3. Coeficiente de descarga y pérdidas

6.1.3.1. Venturi rectangular

		Cd VENTURI PLANO									PÉRDI.CARGA VENT.PLANO	
Q (l/h)	Q_medio (l/h)	h1 (mm)	h5 (mm)	h9 (mm)	Δh (mH ₂ O)	Δp (Pa)	Δp_medio (Pa)	Q_medio Teórico (l/h)	C _d	Qreal calcul (l/h)	Δp ₁₋₉ (Pa)	Δp ₁₋₉ medio(Pa)
300	300	310			0.31	3041	2485	412	0,728	379	3041	2485
300		210			0.21	2060					2060	
300		240			0.24	2354					2354	
400	400	430			0.43	4218	3761	507	0,789	466	4218	3761
400		350			0.35	3434					3434	
400		370			0.37	3630					3630	
500	500	540			0.54	5297	5069	588	0,850	541	5297	5069
500		500			0.50	4905					4905	
500		510			0.51	5003					5003	
600	600	710			0.71	6965	6834	683	0,878	629	6965	6834
600		670			0.67	6573					6573	
600		710			0.71	6965					6965	
700	700	910			0.91	8927	8894	780	0,898	717	8927	8894
700		890			0.89	8731					8731	
700		920			0.92	9025					9025	
800	800	1110			1.11	10889	11183	874	0,915	804	10889	11183
800		1130			1.13	11085					11085	
800		1180			1.18	11576					11576	
900	900	1410			1.41	13832	14061	980	0,918	902	13832	14061
900		1430			1.43	14028					14028	
900		1460			1.46	14323					14323	
1000	1000	1710			1.71	16775	17069	1080	0,926	993	16775	17069
1000		1740			1.74	17069					17069	
1000		1770			1.77	17364					17364	
1100	1100	2000			2.00	19620	20045	1170	0,940	1077	19620	20045
1100		2050			2.05	20111					20111	
1100		2080			2.08	20405					20405	
1200	1200	2325			2.33	22808	23037	1255	0,956	1154	22808	23037
1200		2330			2.33	22857					22857	
1200		2390			2.39	23446					23446	
1300	1300	2650			2.65	25997	26749	1352	0,962	1244	25997	26749
1300		2740			2.74	26879					26879	
1300		2790			2.79	27370					27370	
1400	1400	3050			3.05	29921	30444	1442	0,971	1327	29921	30444
1400		3110			3.11	30509					30509	
1400		3150			3.15	30902					30902	
1500	1500	3420			3.42	33550	34597	1537	0,976	1414	33550	34597
1500		3580			3.58	35120					35120	
1500		3580			3.58	35120					35120	
1600	1600	3900			3.90	38259	39044	1633	0,980	1503	38259	39044
1600		3960			3.96	38848					38848	
1600		4080			4.08	40025					40025	
1700	1700	4360			4.36	42772	43753	1729	0,983	1591	42772	43753
1700		4480			4.48	43949					43949	
1700		4540			4.54	44537					44537	
1800	1800	4915			4.92	48216	48805	1826	0,986	1680	48216	48805
1800		4960			4.96	48658					48658	
1800		5050			5.05	49541					49541	
1900	1900	5520			5.52	54151	54609	1932	0,984	1777	54151	54609
1900		5560			5.56	54544					54544	
1900		5620			5.62	55132					55132	
C _d medio=									0.920			

6.1.3.2. Venturi circular

Cd VENTURI-CIRCULAR									PÉRDI.CARGA VENT.CIRCULAR	
h1 (mm)	h5 (mm)	h9 (mm)	Δh (mH ₂ O)	Δp (Pa)	Δp _{medio} (Pa)	Q _{medio} Teórico (l/h)	C _d	Q _{real} calcu (l/h)	Δp ₁₋₉ (Pa)	Δp ₁₋₉ medio(Pa)
690			0,69	6769	6867	685	0,438	353	6769	6867
700			0,70	6867					6867	
710			0,71	6965					6965	
1080			1,08	10595	10987	866	0,462	447	10595	10987
1120			1,12	10987					10987	
1160			1,16	11380					11380	
2130			2,13	20895	17560	1095	0,456	565	20895	17560
1620			1,62	15892					15892	
1620			1,62	15892					15892	
2820			2,82	27664	23479	1267	0,474	653	27664	23479
2180			2,18	21386					21386	
2180			2,18	21386					21386	
3180			3,18	31196	29430	1418	0,494	731	31196	29430
2930			2,93	28743					28743	
2890			2,89	28351					28351	
3590			3,59	35218	35447	1556	0,514	802	35218	35447
3660			3,66	35905					35905	
3590			3,59	35218					35218	
4580			4,58	44930	44668	1747	0,515	900	44930	44668
4550			4,55	44636					44636	
4530			4,53	44439					44439	
5550			5,55	54446	54576	1931	0,518	995	54446	54576
5580			5,58	54740					54740	
5560			5,56	54544					54544	
6580			6,58	64550	64550	2100	0,524	1082	64550	64550
6610			6,61	64844					64844	
6550			6,55	64256					64256	
7650			7,65	75047	75275	2268	0,529	1169	75047	75275
7670			7,67	75243					75243	
7700			7,70	75537					75537	
8750			8,75	85838	86590	2432	0,534	1254	85838	86590
8840			8,84	86720					86720	
8890			8,89	87211					87211	
9960			9,96	97708	98623	2596	0,539	1338	97708	98623
10020			10,02	98296					98296	
10180			10,18	99866					99866	
11040			11,04	108302	107845	2715	0,553	1399	108302	107845
10960			10,96	107518					107518	
10980			10,98	107714					107714	
12420			12,42	121840	122331	2891	0,553	1490	121840	122331
12700			12,70	124587					124587	
12290			12,29	120565					120565	
14350			14,35	140774	139204	3084	0,551	1590	140774	139204
14180			14,18	139106					139106	
14040			14,04	137732					137732	
15840			15,84	155390	154736	3252	0,554	1676	155390	154736
15900			15,90	155979					155979	
15580			15,58	152840					152840	
17730			17,73	173931	172329	3431	0,554	1769	173931	172329
17620			17,62	172852					172852	
17350			17,35	170204					170204	
						C _d medio=	0,515			

6.2. Resultados de Ansys Fluent

6.2.1. Venturi Rectangular

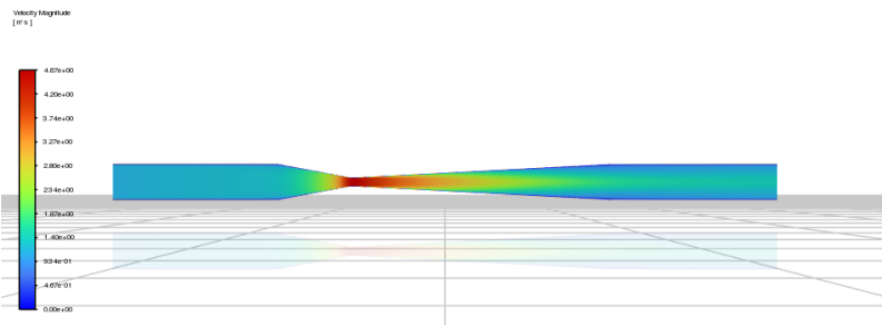


Ilustración 106. Diagrama de velocidades Venturi rectangular

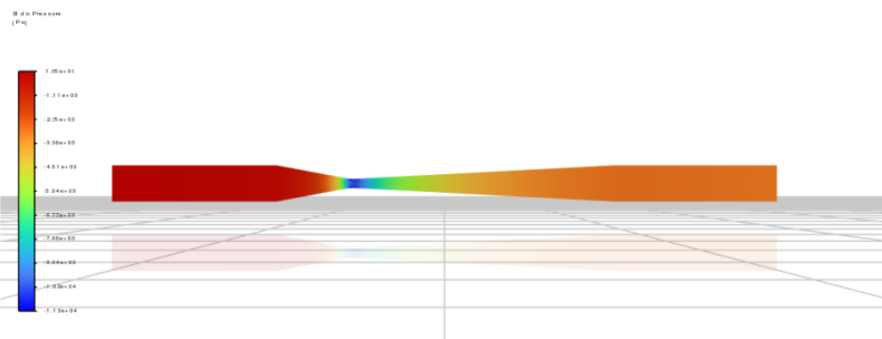


Ilustración 107. Diagrama de presiones estáticas Venturi rectangular

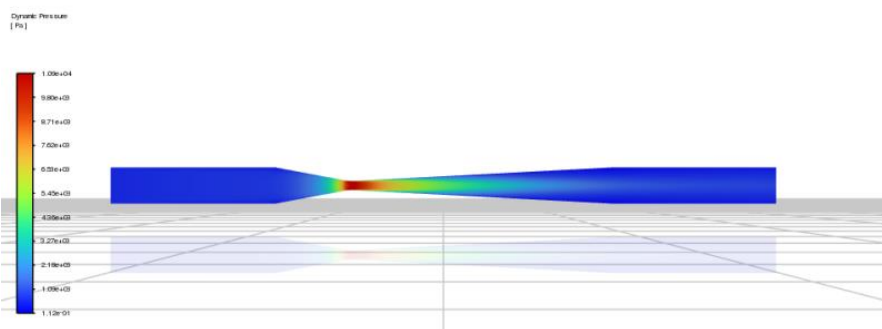


Ilustración 108. Diagrama de Presiones dinámicas Venturi rectangular

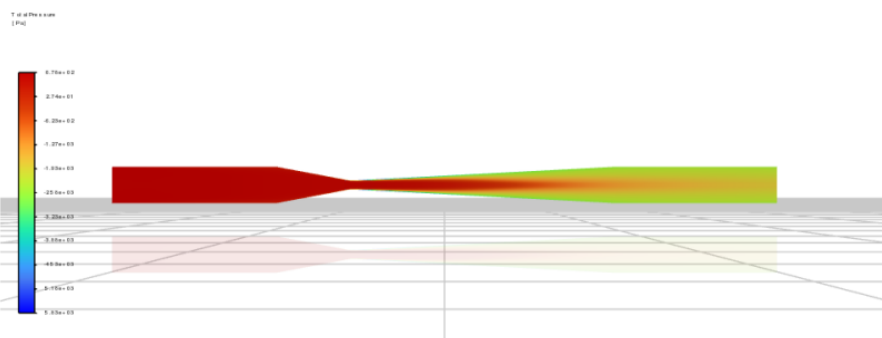


Ilustración 109. Diagrama de presiones Venturi rectangular

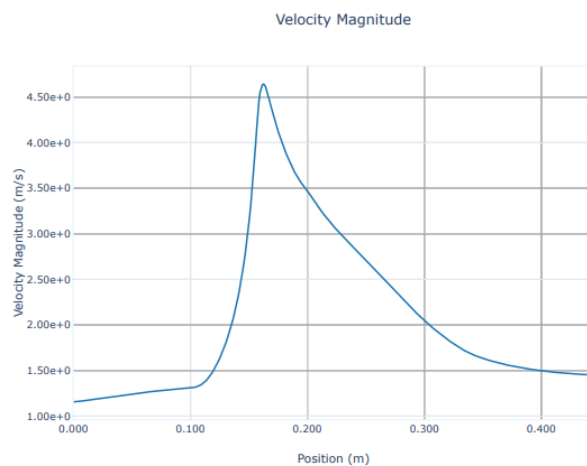


Ilustración 110. Curva de velocidad Venturi circular

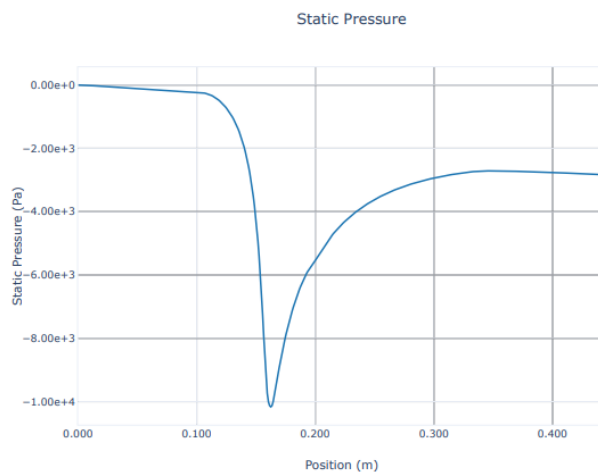


Ilustración 111. Curva de presión estática Venturi rectangular

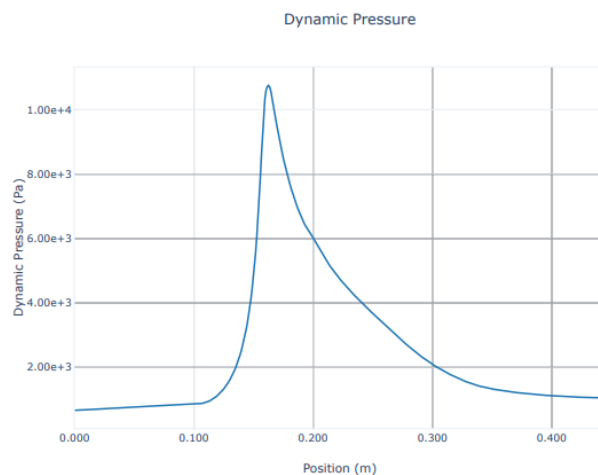


Ilustración 112. Curva de presión dinámica Venturi rectangular

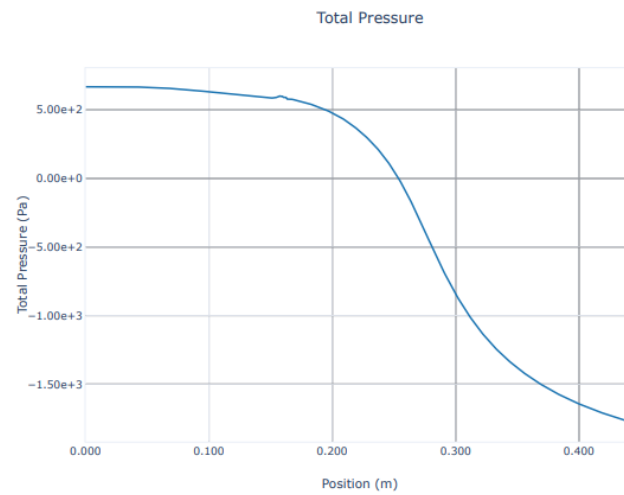


Ilustración 113. Curva de presión total Venturi rectangular

6.2.2. Venturi Circular

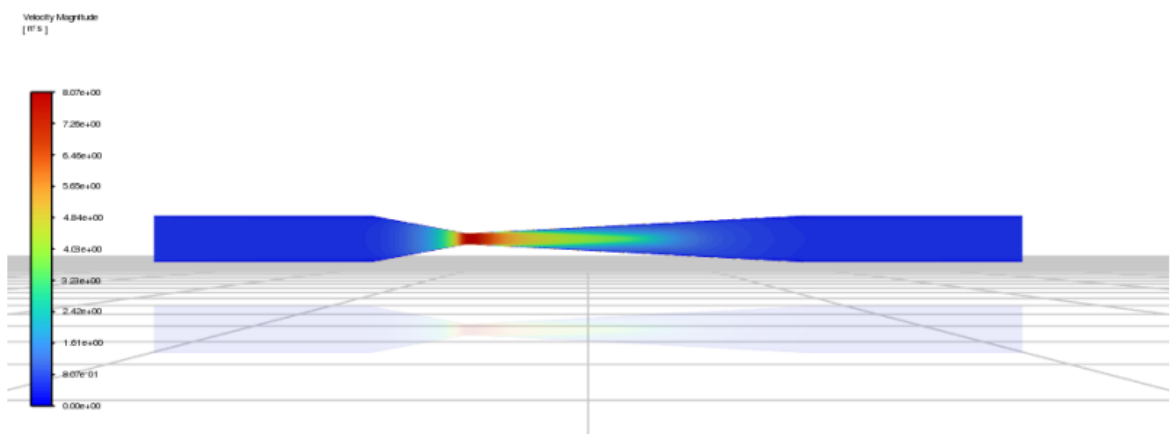


Ilustración 114. Diagrama de velocidades Venturi Circular

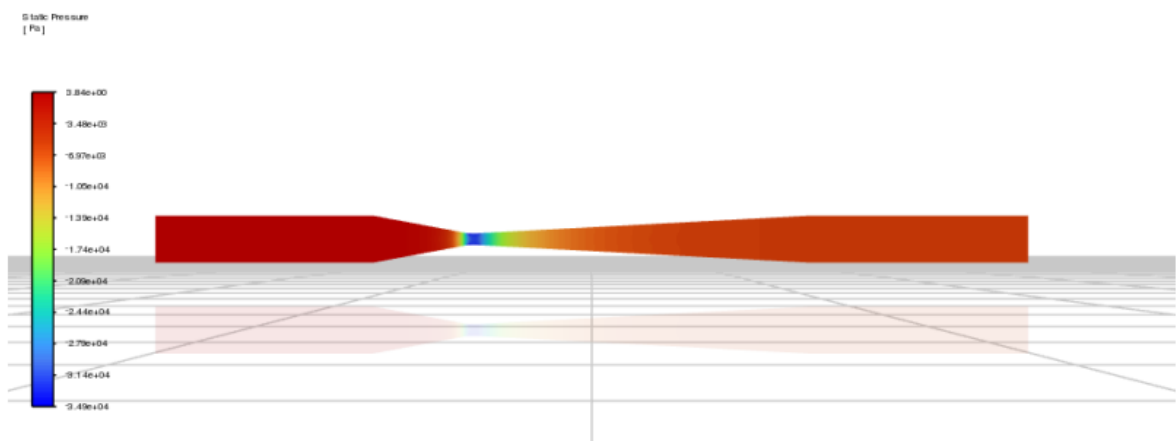


Ilustración 115. Diagrama de presiones estáticas Venturi Circular

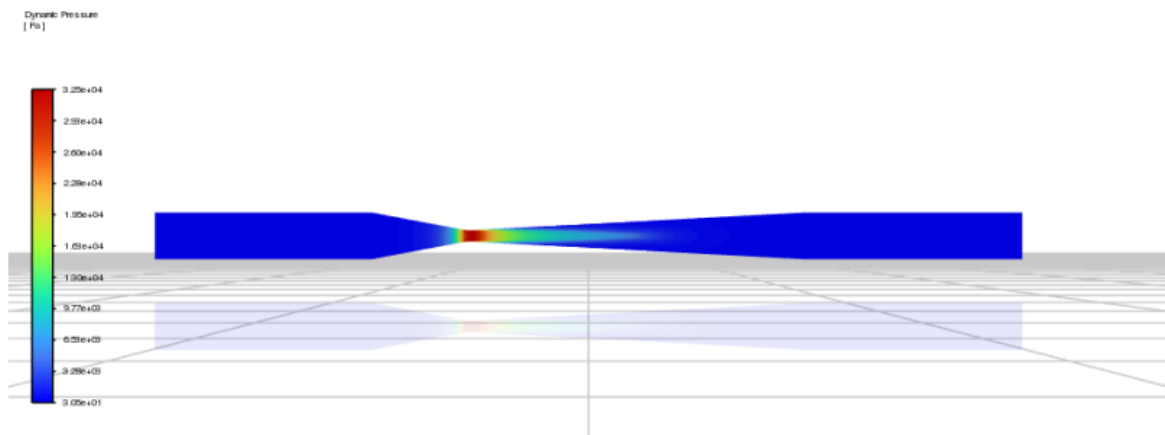


Ilustración 116. Diagrama de presiones dinámicas Venturi circular

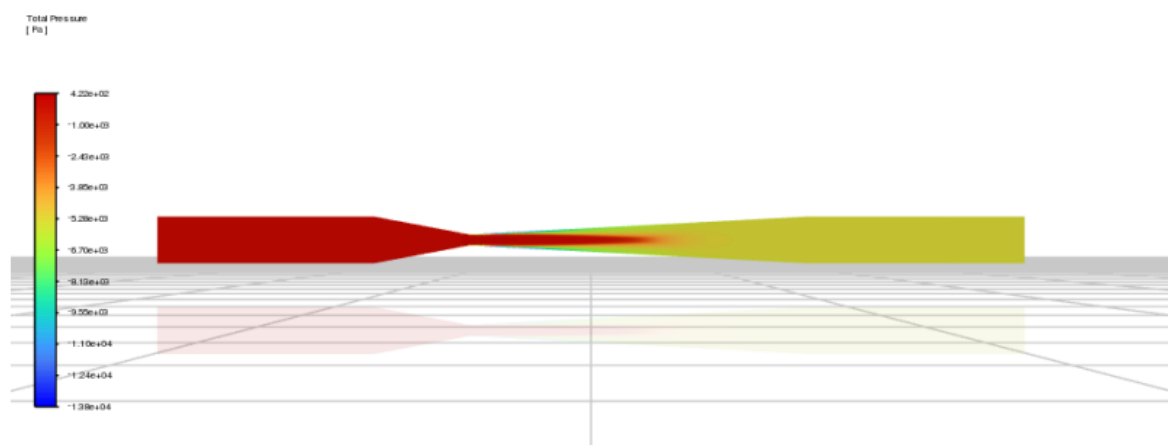


Ilustración 117. Diagrama de presiones totales Venturi circular

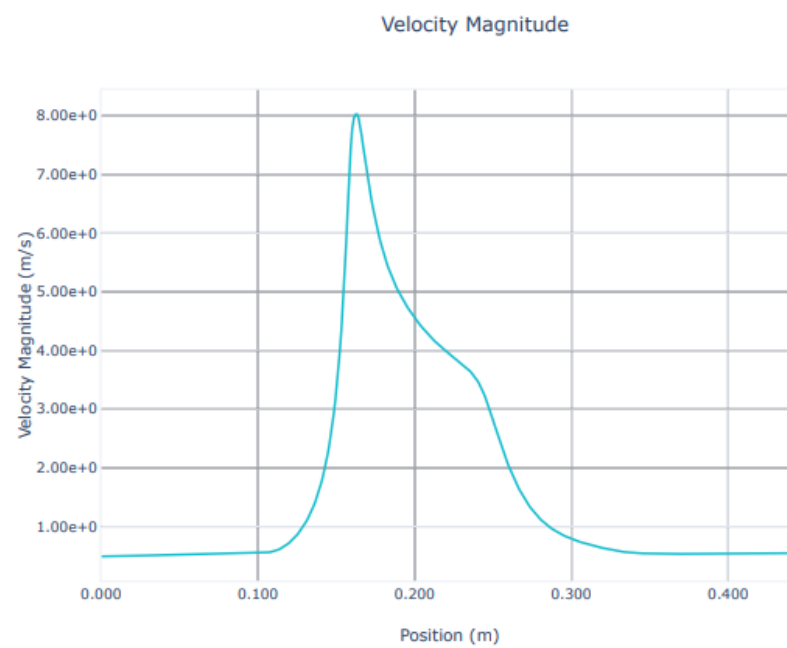


Ilustración 118. Curva de velocidad Venturi circular

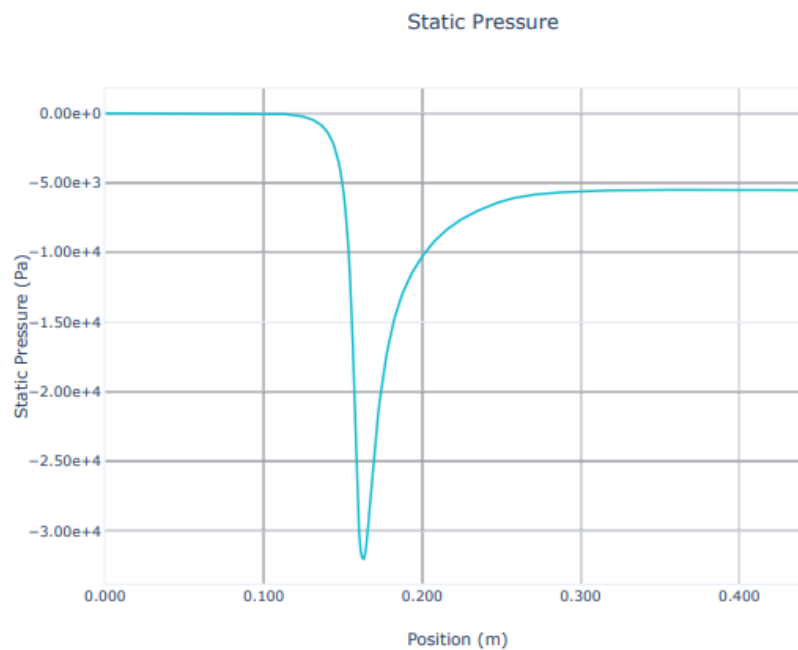


Ilustración 119. Curva presión estática Venturi Circular

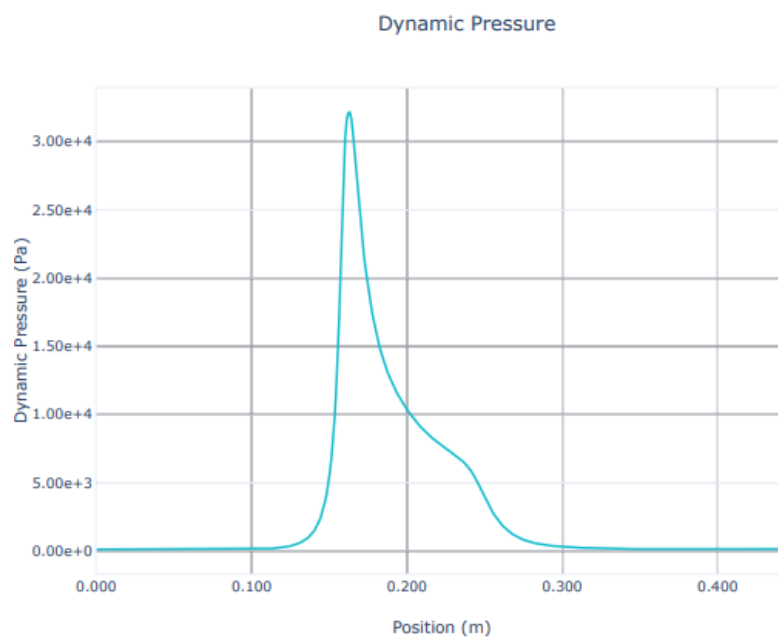


Ilustración 120. Curva presión dinámica Venturi circular

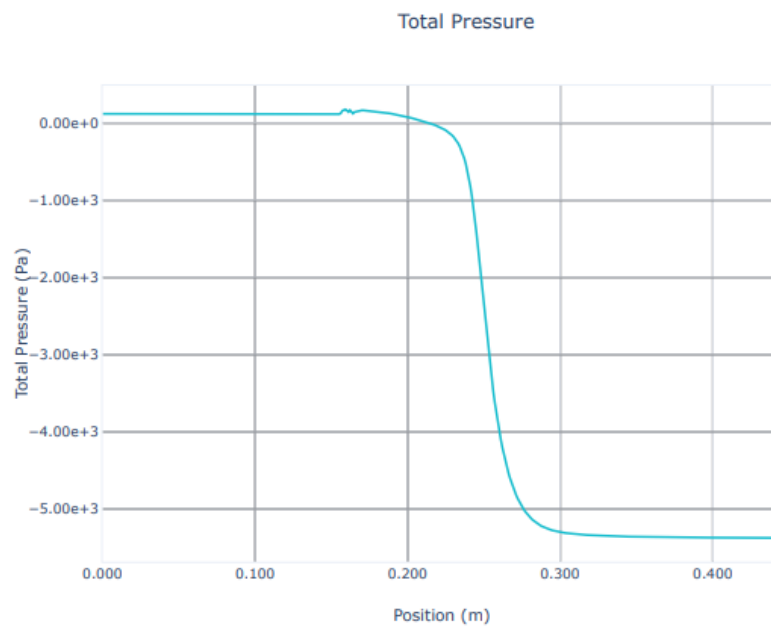


Ilustración 121. Curva presión total Venturi circular

6.3. Discusión de resultados

Con el enfoque puesto en los resultados para el caudal igual a 800 l/h, dado que es el caudal común en ambos resultados, puede verse como, inicialmente, la curva de las velocidades y presiones tienen tendencia similar.

En cuanto al Venturi rectangular, por ejemplo, la velocidad obtenida experimentalmente en la garganta es de 4,48 m/s, mientras que en los resultados obtenidos por el Ansys Fluent, la velocidad en dicho punto es de 4,67 m/s, por otro lado, la presión estática es de -12017 Pa para el ensayo experimental, mientras que Ansys Fluent devuelve un valor de entorno unos -11300 Pa, a lo que se quiere llegar es que, el error del ensayo experimental es bastante bajo.

El Venturi circular, pese a estar condicionado por la sección crítica tan pequeña, ha obtenido unos valores correctos también, la presión estática en dicho punto obtenida de manera experimental es de -38602 Pa, mientras que la obtenida en Ansys es de -34900 P.a.

La caracterización de los Venturi en ANSYS ha permitido tener una referencia sólida en la que comparar los resultados experimentales, por lo que ha sido una pieza fundamental en el Trabajo.

7. Trabajo futuro

El trabajo futuro del proyecto sería principalmente caracterizar antes de diseñar, habría que diseñar un Venturi en el que la presión estática mínima sea positiva a la vez que la presión estática máxima entre dentro del rango de medición de los tubos de m.c.a. para ello, fundamentalmente se debería de ensanchar la sección interna de los Venturi en su totalidad y que la sección mínima no sea tan brusca con respecto a la de entrada, con ello, el fluido no se acelerará en exceso, produciendo una bajada de presión por debajo de la presión de vapor.

Existen a día de hoy muchos recursos para dar con la solución, como podría ser crear un Script en cualquier lenguaje de programación para llegar a una solución con unos datos de entrada, como pueden ser, los caudales a los que se miden las presiones, las nuevas sección en las tomas de presión, el programa devolvería aquellos datos de presión estática para todos los puntos y caudales, siendo el programa capaz de discriminar aquellos caudales en los que la presión mínima es negativa, podría devolver también como sugerencia las dimensiones del Venturi iterando propiamente con un bucle hasta que cumpla con la restricción de la presión.

Otra solución podría ser usar la Inteligencia Artificial que tanto está sonando en estos últimos años, ya no hace falta ser programador avanzado para crear scripts, ésta es capaz de montar programas funcionales, por lo que puede servir de base para el programa, quizás con los años la propia IA sea capaz de iterar hasta llegar a la solución.

Una solución podría ser usar la plantilla de datos experimentales en la que se modifiquen los datos de las secciones y comprobar uno a uno si la presión cae a números negativos, pero esto demoraría el proceso, por lo que habría que buscar otra solución más automatizable y eficaz.

8. Conclusiones

El objetivo principal del Trabajo Fin de Grado se ha cumplido, caracterizar y validar un tubo de Venturi para el uso docente, con el añadido de hacerlo para dos secciones distintas, es decir, se ha cumplido el objetivo por el doble de lo esperado. La herramienta fundamental para la validación ha sido ANSYS, en mi opinión, si no hubiésemos tenido limitación a la hora de diseñar el proceso habría cambiado un poco, se podría haber simulado de primeras y, partir de los resultados, diseñar, fabricar y caracterizar.

Otro de los objetivos también se ha cumplido, aplicar todos los conocimientos posibles obtenidos a lo largo de esta etapa tan bonita de aprendizaje por la que he pasado, desde el principio tenía claro que mi trabajo incluiría parte de diseño 3D, rama de la ingeniería culpable de que en mi interior despertase interés por saber lo que quería para mi futuro, sin conocimiento profundo, he podido aprender de campos de la ciencia, física, propia ingeniería que nunca hubiese imaginado.

También tenía claro que mi trabajo tenía que incluir parte tangible, la idea de que diseñe algo y además funcione en la realidad me fascina y me incita a empezar nuevos proyectos, dado que la ingeniería no tiene límite, es un camino largo el que me queda por descubrir a partir de ahora, por lo que tengo ansia por empezar desde ya en nuevos proyectos.

Aunque el resultado del proyecto no ha sido el deseado, creo que los resultados han ayudado para darme cuenta que el fracaso es parte del proceso en la ingeniería y que no todo tiene porqué salir a la primera, rendirse no es una opción en este sector y así lo he aprendido a lo largo de todos estos años de aprendizaje, el afán por aprender y salir exitoso debe ser mayor que fracaso.

Estoy orgulloso de haber pertenecido a la Universidad de Jaén durante todos estos años, en la que he aprendido además de conocimientos, valores que a día de hoy me han hecho crecer como persona, he tenido la suerte de haber estudiado en la Escuela Politécnica Superior de Linares, en la que rebosa la confianza y acercamiento con los docentes, factores que facilitan el proceso de aprendizaje, tanto académicamente como personalmente, tratar directamente te llena de confianza para afrontar cualquier programa que aparezca.

Finalmente, gracias a todas las personas que, directa o indirectamente han aportado su granito de arena para que este trabajo fin de grado se haya podido llevar a cabo. Gracias a ti también lector, por haber dedicado tu valioso tiempo en leerlo.

9. Bibliografía

Marcos Vera Coello, Inmaculada Iglesias Estradé, Antonio L., Sánchez Pérez, Carlos Martínez Bazán. *Ingeniería fluidomecánica*. Madrid: Parainfo, 2012.

Li, Mingda. Bussonniere, Adrien. Bronson, Matthew. Xu, Zhenghe Liu, Qingxia. *Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles*. Minerals Engineering. 2019. 132, 268-274.

ISO 690:2013. *Información y documentación. Directrices para la redacción de referencias bibliográficas y de citas de recursos de información*.

ISO 5167-1:2022. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — Part 1: General principles and requirements*.

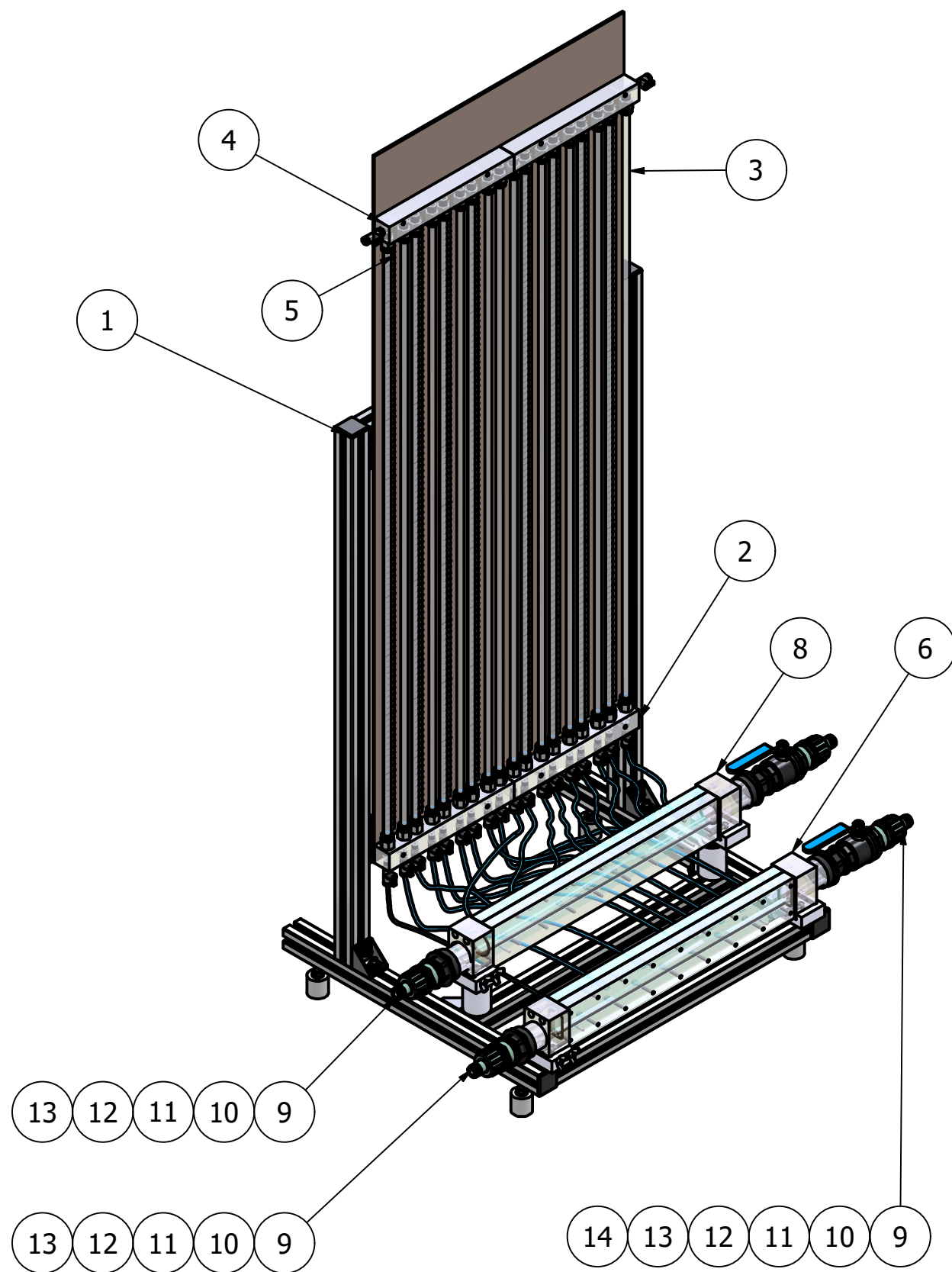
ISO 5167-4:2022. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — Part 4: Venturi tubes*.

ISO 5457:2000/A1:2010. *Documentación técnica de producto. Formatos y presentación de los elementos gráficos de las hojas de dibujo*.

ISO 16792:2021. *Technical product documentation — Digital product definition data practices*

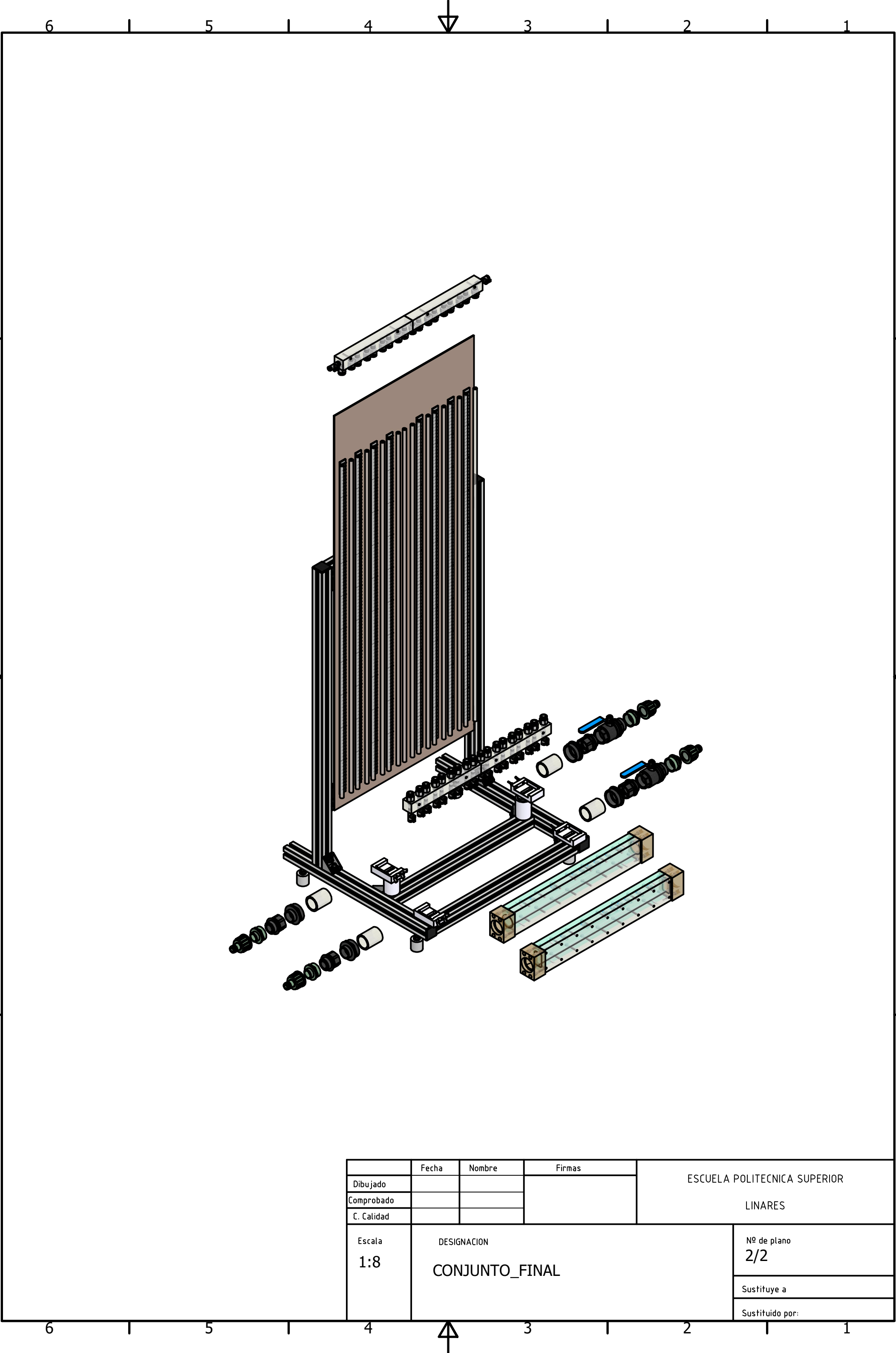


10. Planos

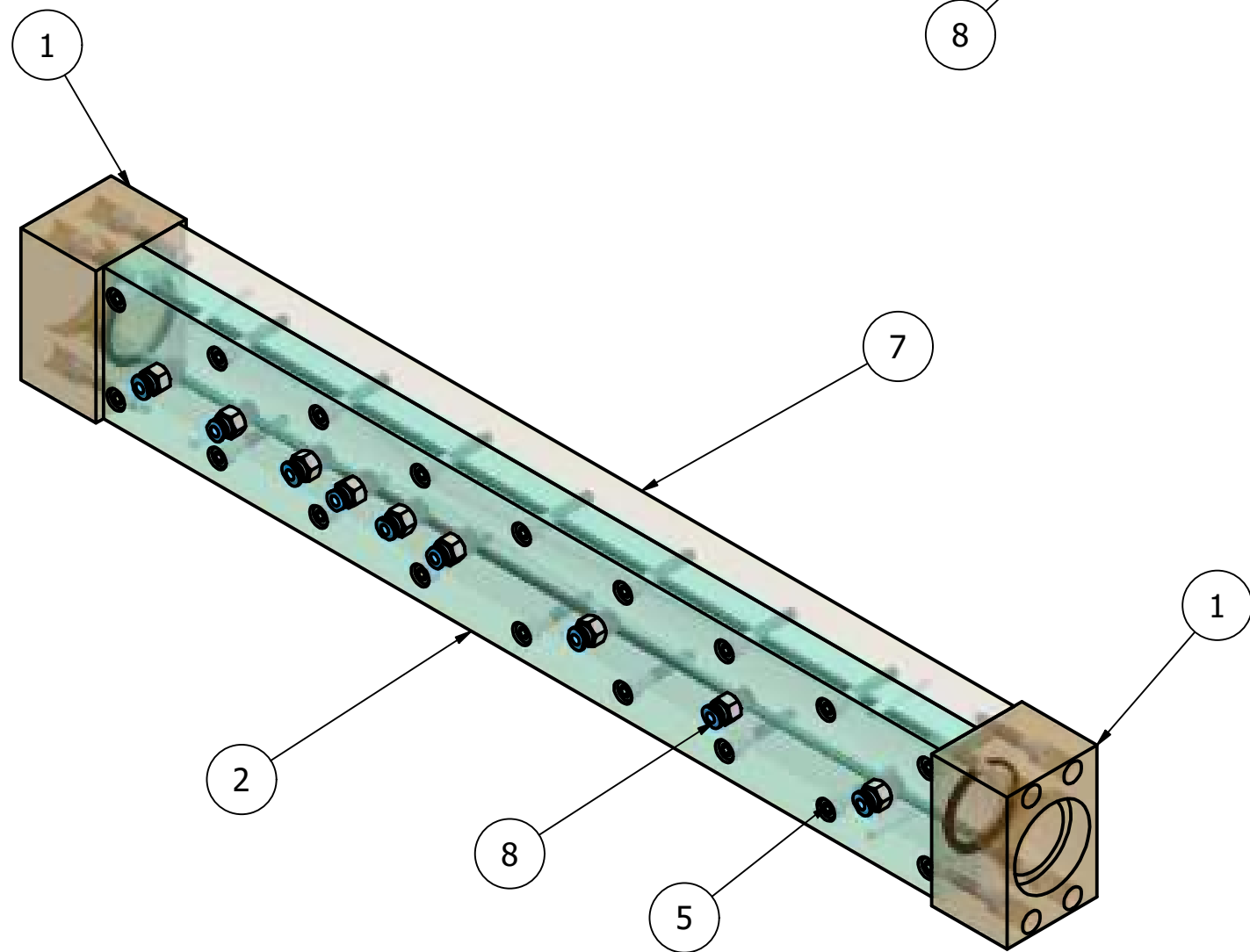
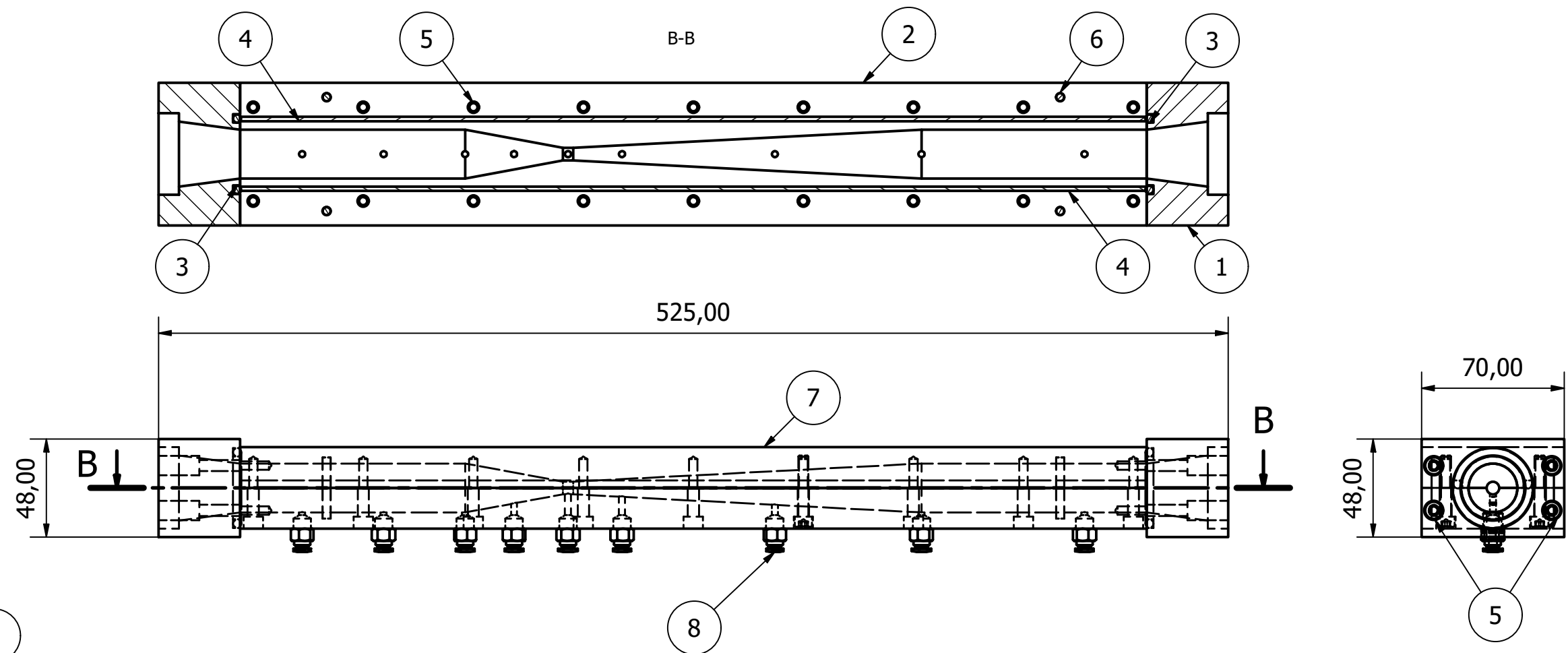


LISTA DE PIEZAS

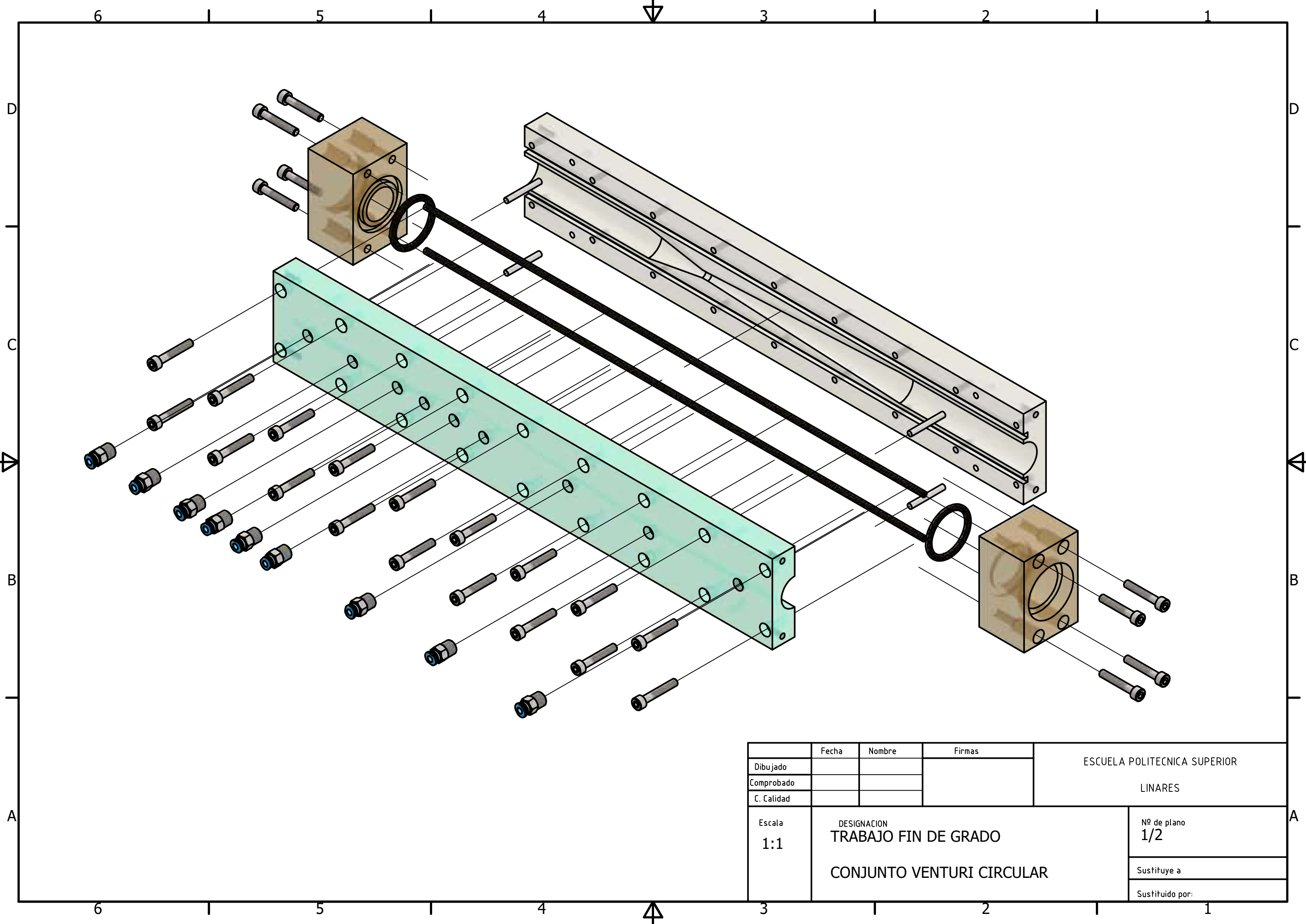
ELEMENTO		CTDAD		Nº DE PIEZA	
1		1		CONJUNTO_BASTIDOR	
2		1		CONJUNTO_COLECTOR_INFERIOR	
3		18		TUBOS_MCA	
4		1		CONJUNTO_COLECTOR_SUPERIOR	
5		8		REGLA	
6		1		CONJUNTO_VENTURI_PLANO	
7		2		ANCLAJE_VENTURI_CILINDRO	
8		1		CONJUNTO_VENTURI_CIRCULAR	
9		4		TUBOS_PVC	
10		4		EX-KEM 25/32 RAL 9005 10064744	
11		2		331.06-B-1	
12		4		SCA-M32-13	
13		4		3.57.018_(mechanical=high)	
14		4		FIPLOCK NEPA-M32M40B-H	
		FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO					
COMPROBADO					
ESCALA: 1:10		TRABAJO FIN DE GRADO CONJUNTO_FINAL			Nº PLANO 1/2
					SUSTITUYE A:
					SUSTITUIDO POR:



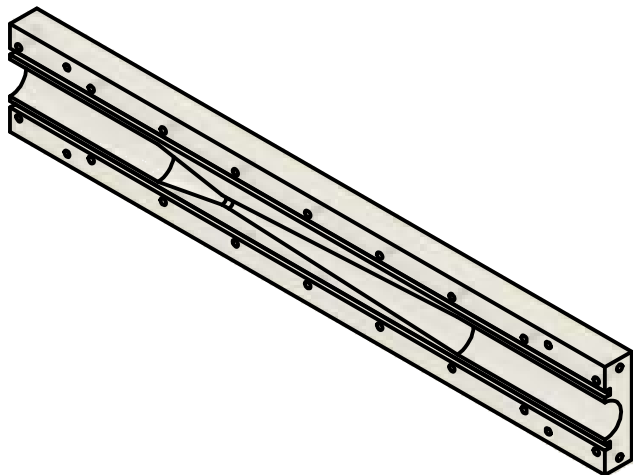
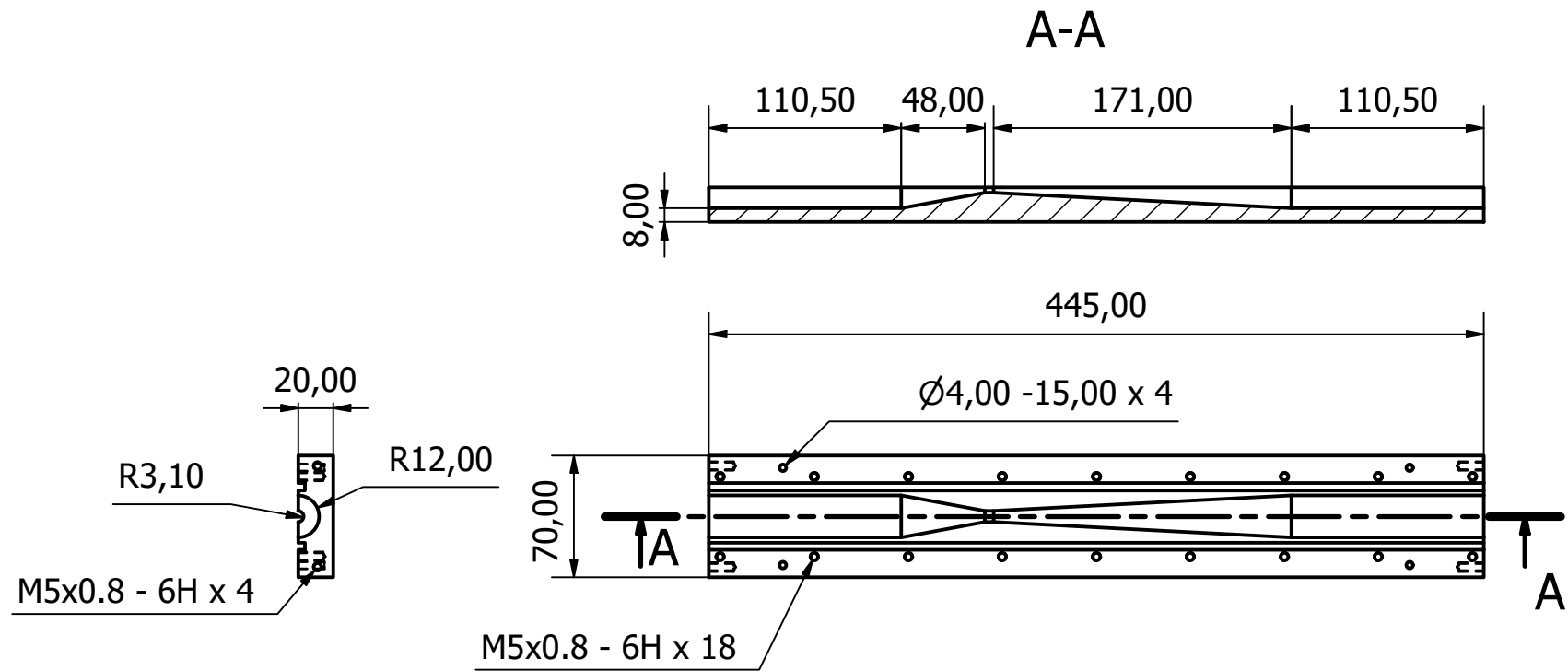
	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR LINARES
Dibujado				
Comprobado				
C. Calidad				
Escala 1:8	DESIGNACION CONJUNTO_FINAL			Nº de plano 2/2
				Sustituye a
				Sustituido por:



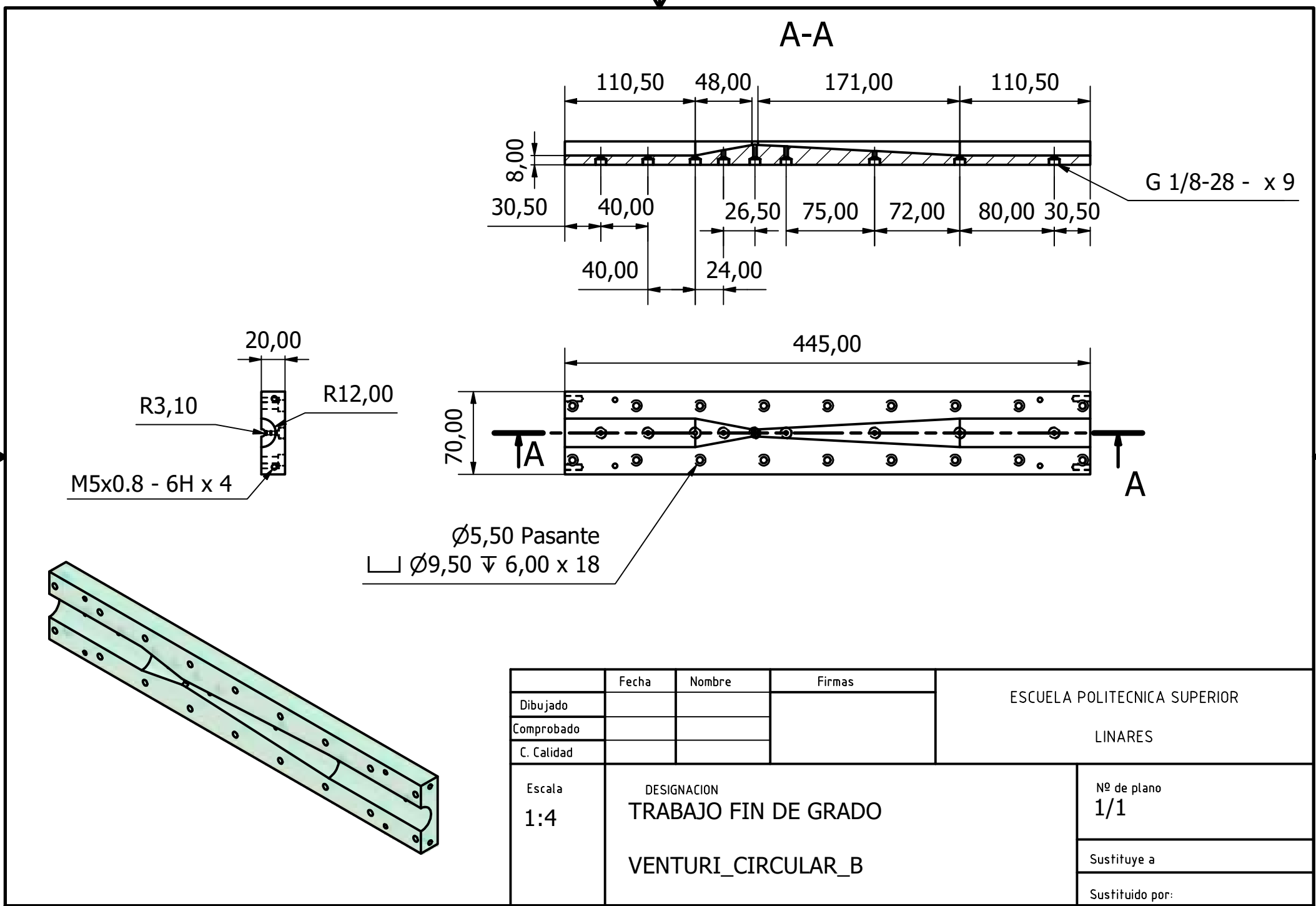
LISTA DE PIEZAS				
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	
1	2	ACOPLE_SOLELE_CIRCULAR		
2	1	VENTURI_CARA_B		
3	2	TORIC_SOLEL_VENTU_CIRCU		
4	2	CORDON_TORICO		
5	26	TH 110 / M5x30(P=0.8)	TH110-Hexagon socket head cap screws, DIN 912	
6	4	Pasador		
7	1	VENTURI_CARA_A		
8	9	8112913 NPQE-D-R18-Q4-P10---(high)	NPQE_D-push-in fitting	
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO				
COMPROBADO				
ESCALA: 2:5	TRABAJO FIN DE GRADO CONJUNTO VENTURI CIRCULAR			Nº PLANO 1/2
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

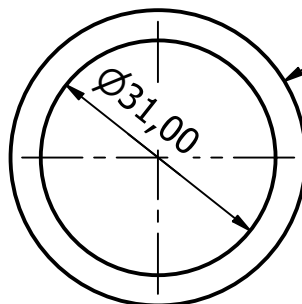
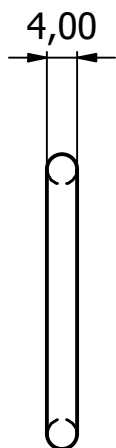


	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR	
Dibujado				LINARES	
Comprobado					
C. Calidad					
Escala 1:1	DESIGNACION TRABAJO FIN DE GRADO CONJUNTO VENTURI CIRCULAR			Nº de plano 1/2	
				Sustituye a	
				Sustituido por:	



	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR LINARES	
Dibujado					
Comprobado					
C. Calidad					
Escala 1:4	DESIGNACION TRABAJO FIN DE GRADO VENTURI_CIRCULAR_A			Nº de plano 1/1	
				Sustituye a	
				Sustituido por:	



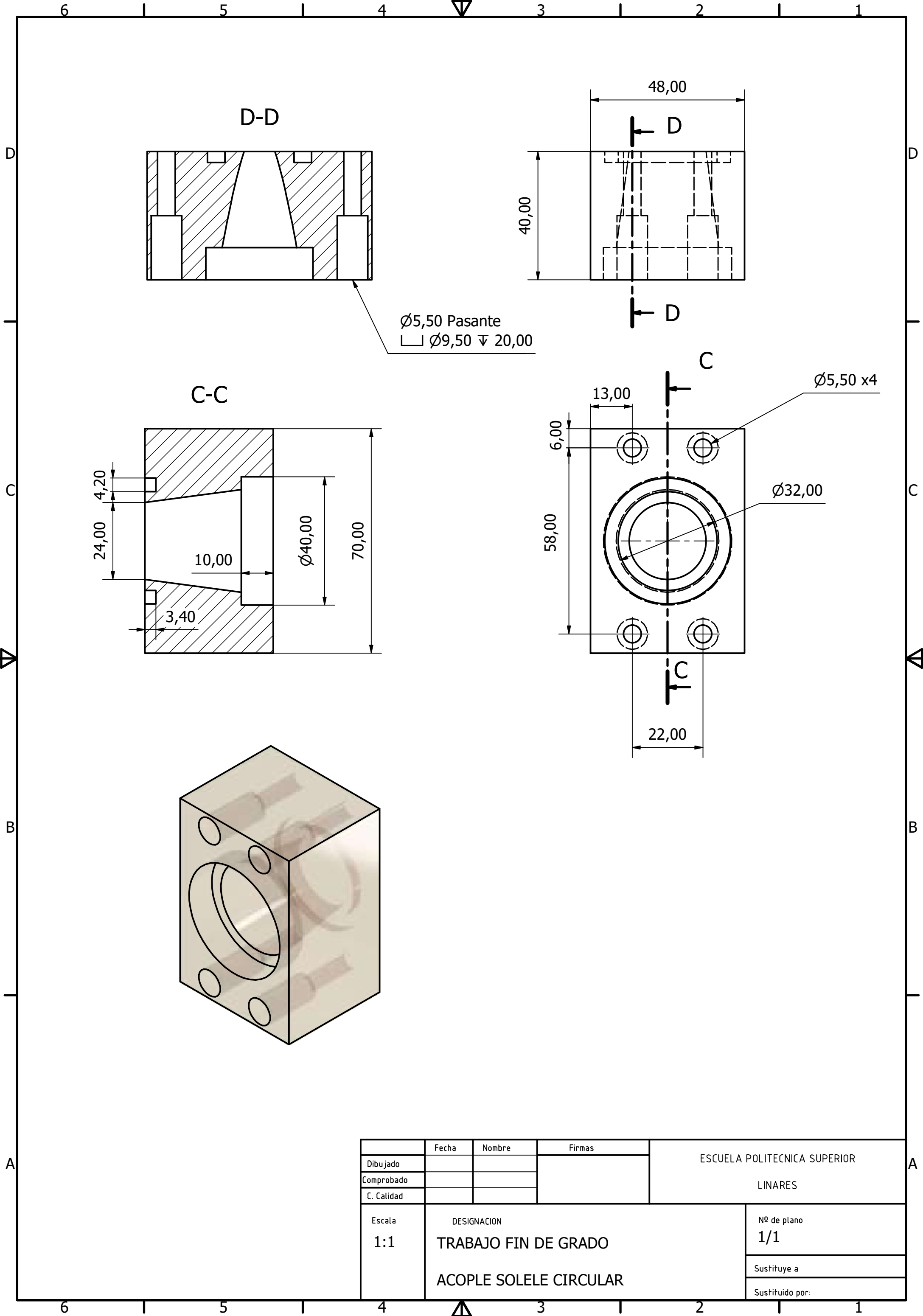


Ø39,00

Ø31,00



	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR LINARES
Dibujado				
Comprobado				
C. Calidad				
Escala 1:1	DESIGNACION TRABAJO FIN DE GRADO TORIC_SOLEL_VENTU_CIRCU			Nº de plano 1/1
				Sustituye a
				Sustituido por:



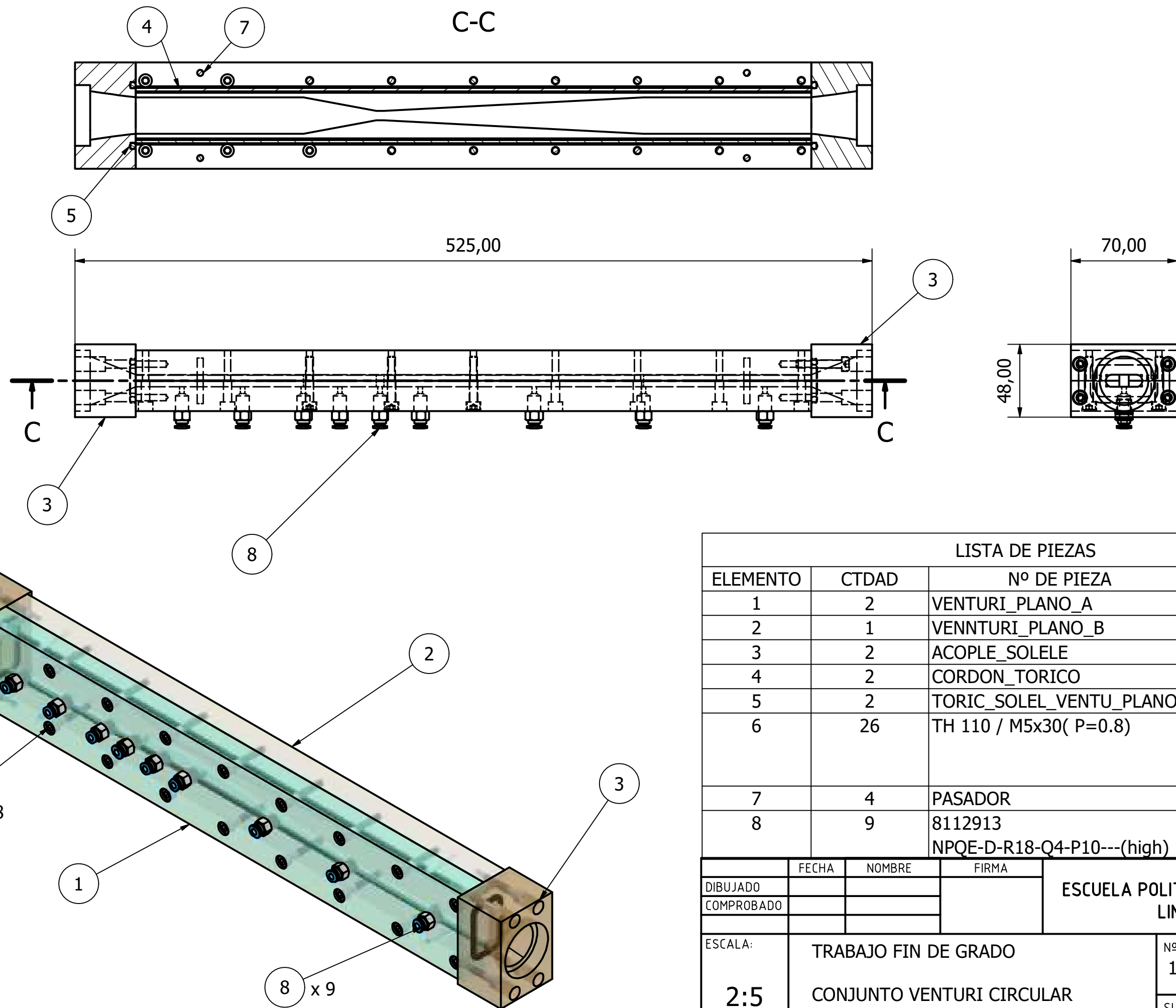
	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR LINARES
Dibujado				
Comprobado				
C. Calidad				
Escala 1:1	DESIGNACION TRABAJO FIN DE GRADO ACOPLE SOLELE CIRCULAR			Nº de plano 1/1
				Sustituye a
				Sustituido por:



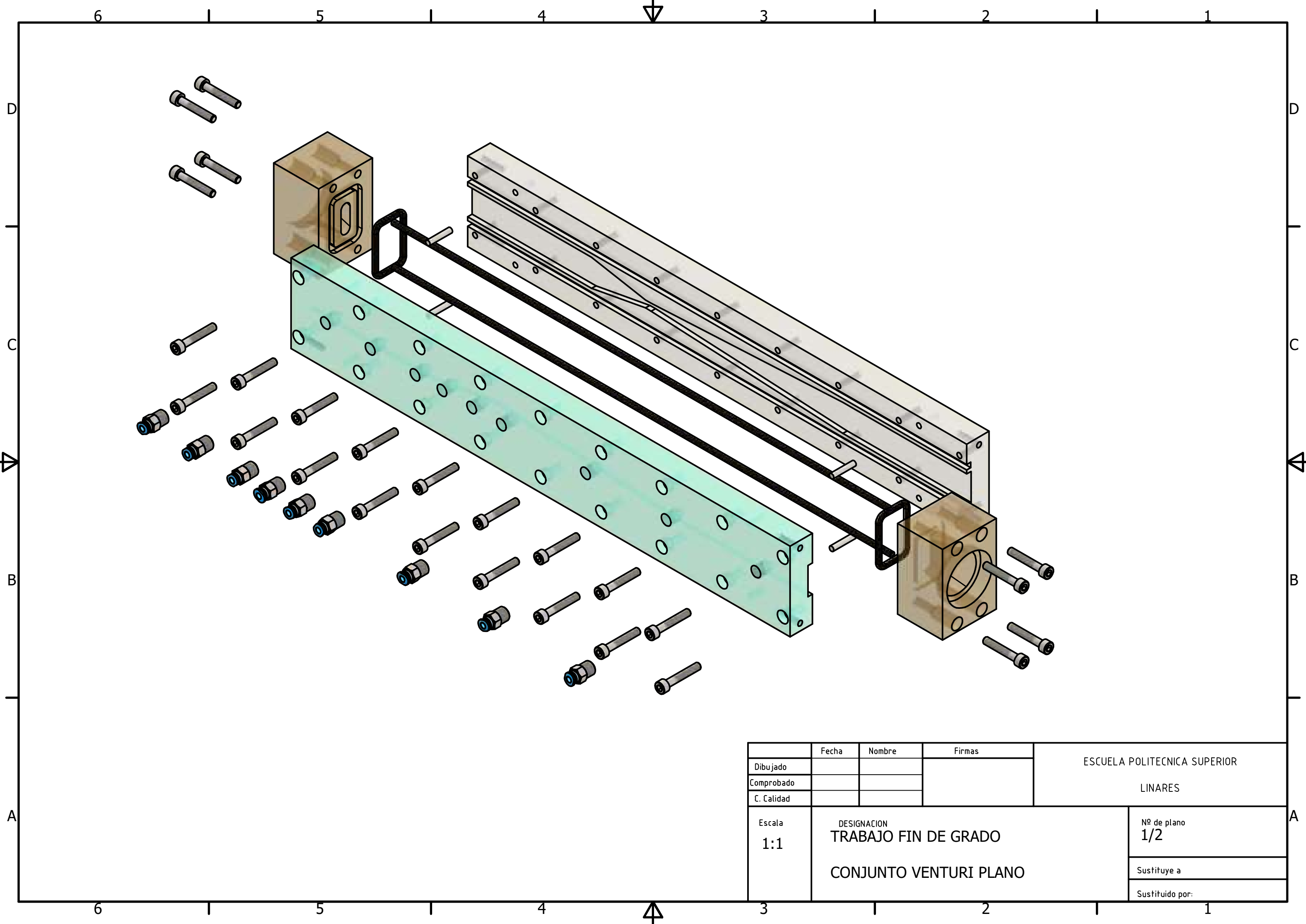
Ø4,00

445,00

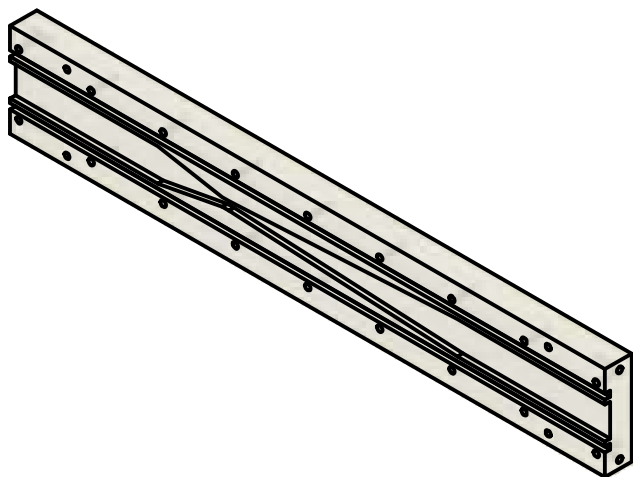
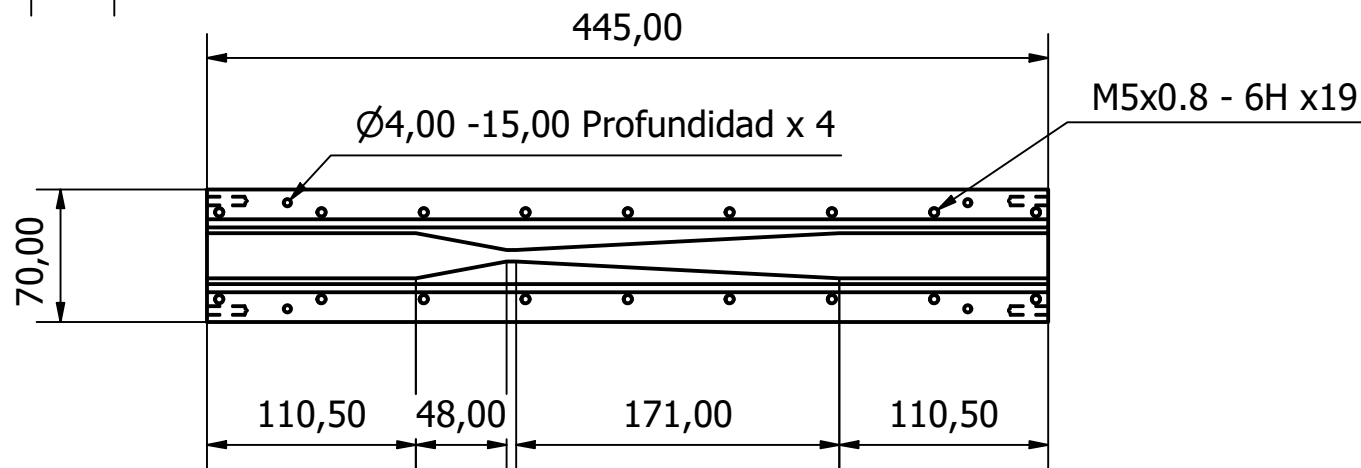
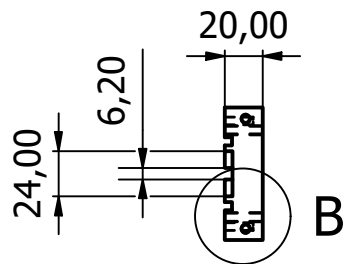
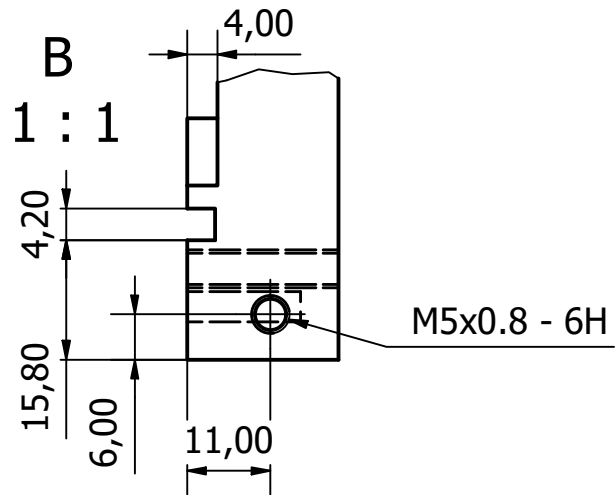
	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR	
Dibujado				LINARES	
Comprobado					
C. Calidad					
Escala 1:4	DESIGNACION TRABAJO DE GRADO CORDON_TORICO			Nº de plano 1/1	
				Sustituye a	
				Sustituido por:	



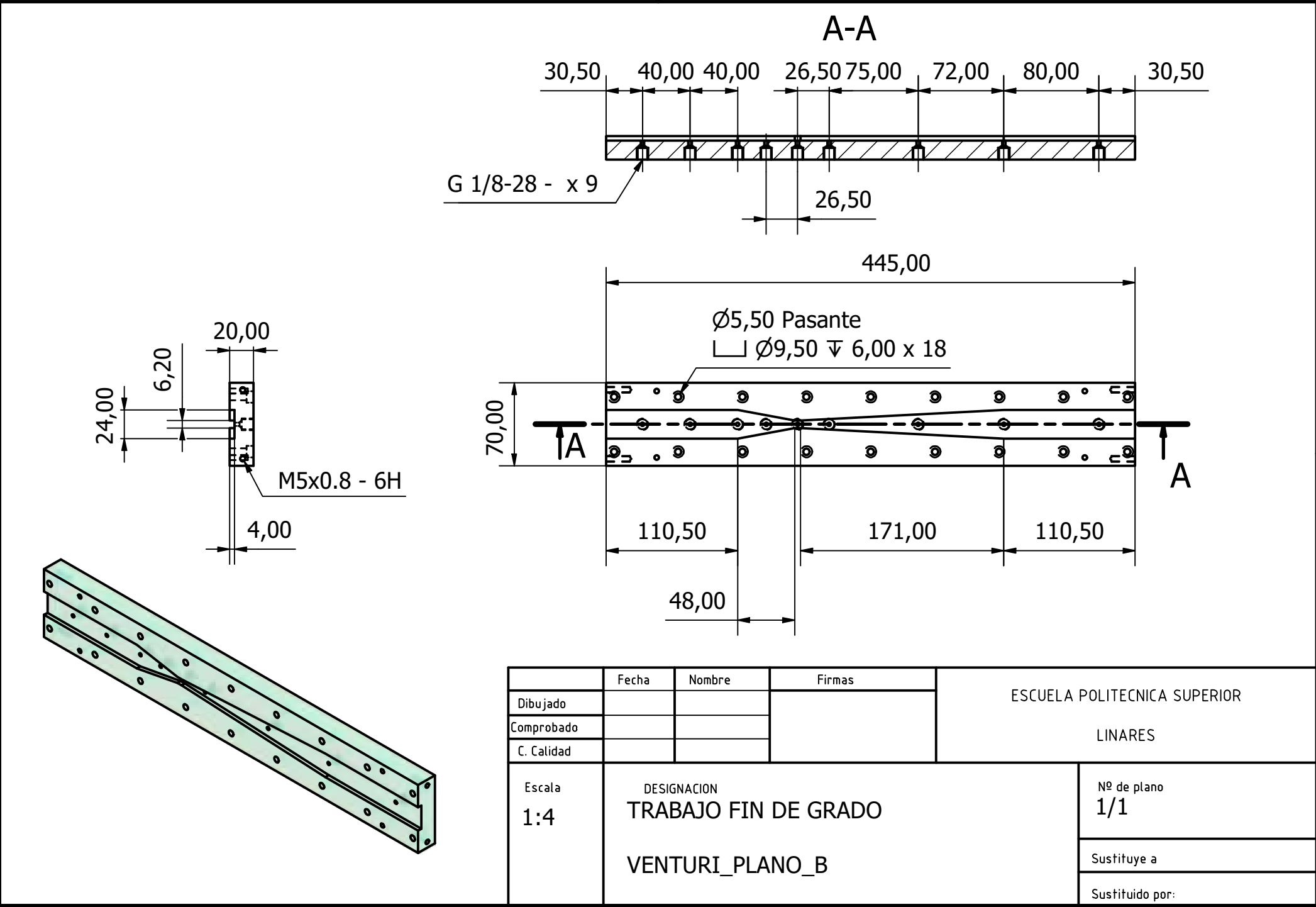
LISTA DE PIEZAS				
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	
1	2	VENTURI_PLANO_A		
2	1	VENNTURI_PLANO_B		
3	2	ACOPLE_SOLELE		
4	2	CORDON_TORICO		
5	2	TORIC_SOLEL_VENTU_PLANO		
6	26	TH 110 / M5x30(P=0.8)	TH110-Hexagon socket head cap screws, DIN 912	
7	4	PASADOR		
8	9	8112913 NPQE-D-R18-Q4-P10---(high)	NPQE_D-push-in fitting	
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO				
COMPROBADO				
ESCALA: 2:5	TRABAJO FIN DE GRADO CONJUNTO VENTURI CIRCULAR			Nº PLANO 1/2
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

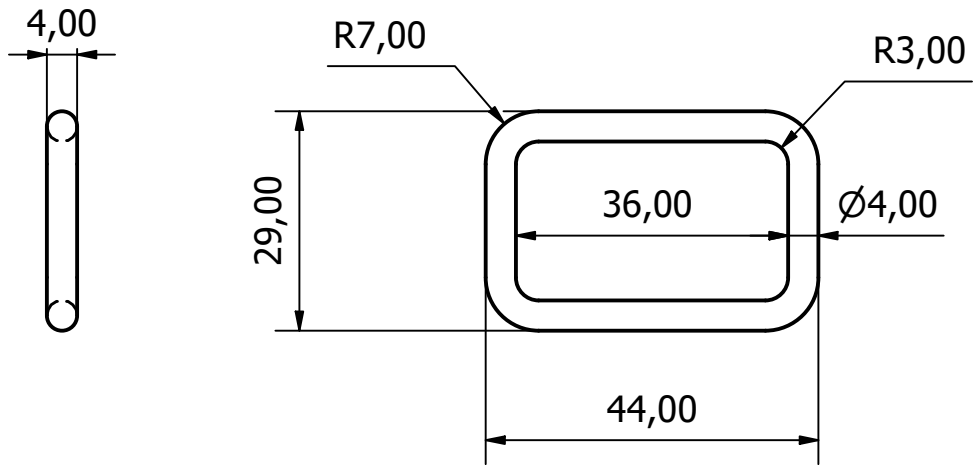


	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR LINARES
Dibujado				
Comprobado				
C. Calidad				
Escala 1:1	DESIGNACION TRABAJO FIN DE GRADO CONJUNTO VENTURI PLANO			Nº de plano 1/2
				Sustituye a
				Sustituido por:

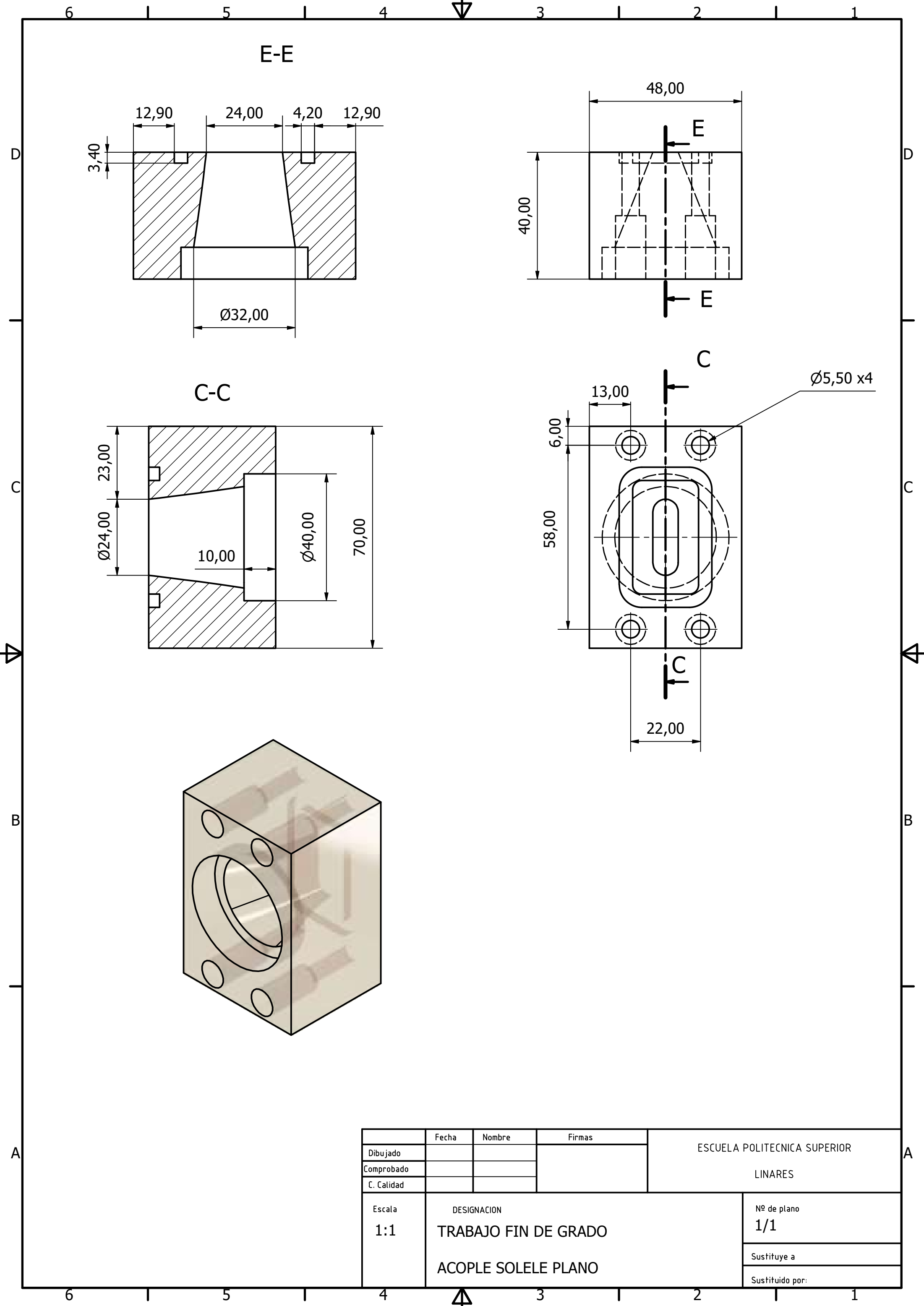


	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR	
Dibujado				LINARES	
Comprobado					
C. Calidad					
Escala 1:4	DESIGNACION			Nº de plano	
	TRABAJO FIN DE GRADO			1/1	
	VENTURI_PLANO_A			Sustituye a	
				Sustituido por:	

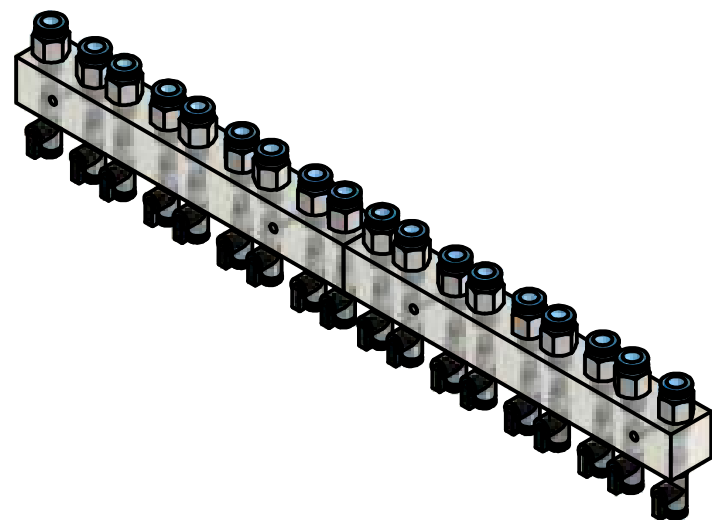
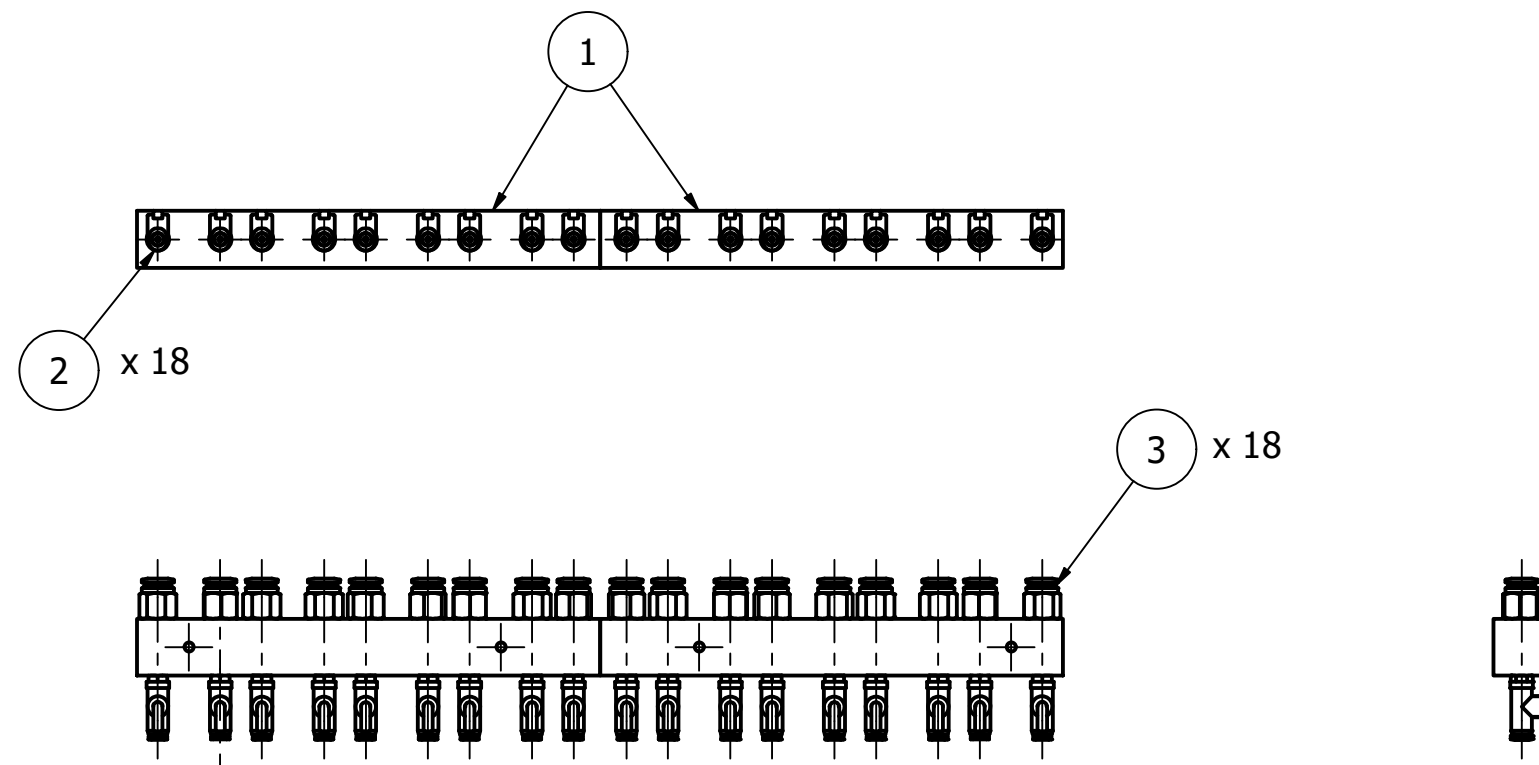




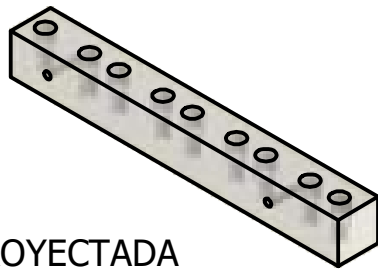
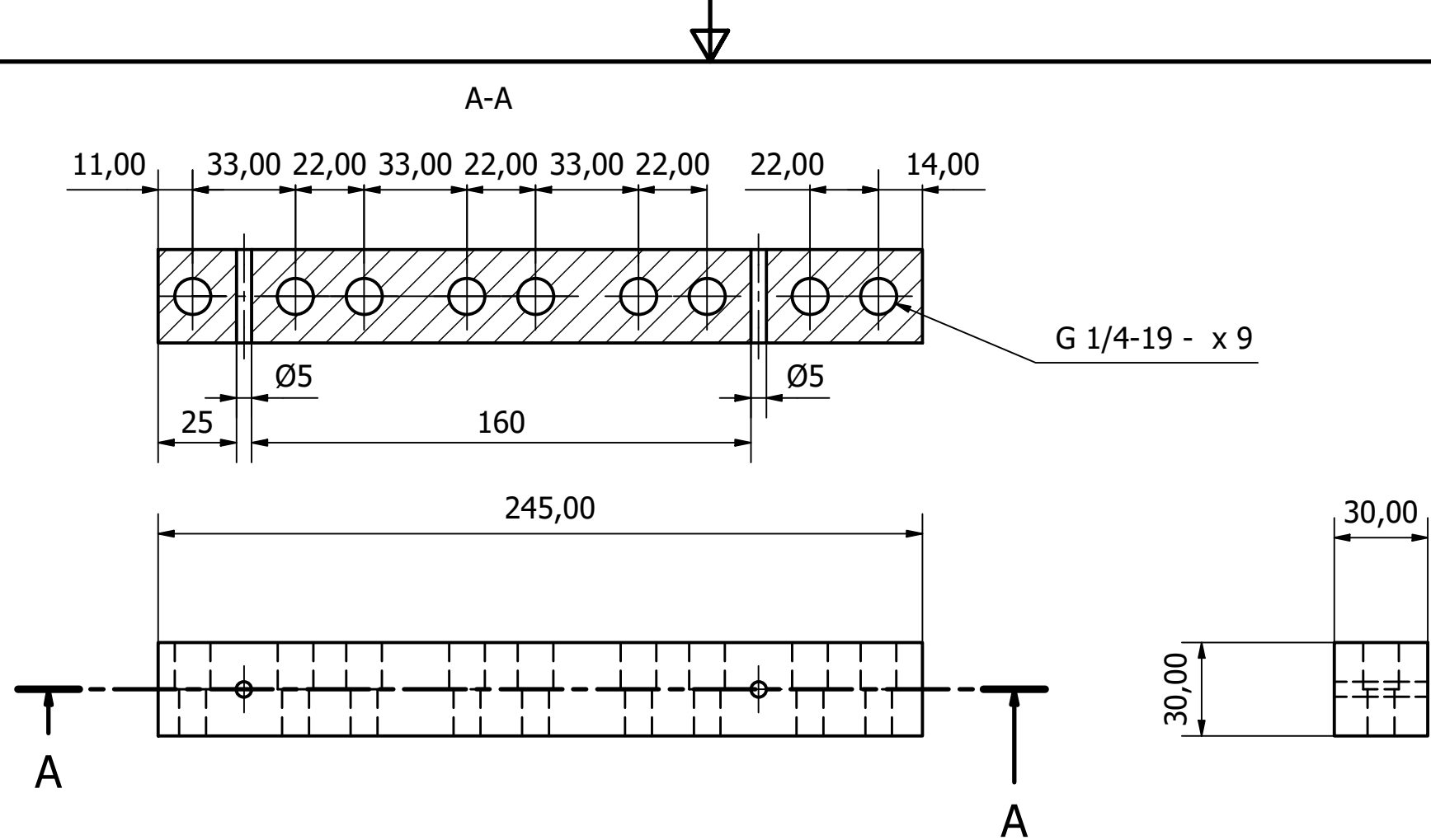
	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR LINARES	
Dibujado					
Comprobado					
C. Calidad					
Escala 1:1	DESIGNACION TRABAJO FIN DE GRADO TORIC_SOLEL_VENTU_PLANO				Nº de plano 1/1
					Sustituye a
					Sustituido por:



	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR LINARES
Dibujado				
Comprobado				
C. Calidad				
Escala 1:1	DESIGNACION TRABAJO FIN DE GRADO ACOPLE SOLELE PLANO			Nº de plano 1/1
				Sustituye a
				Sustituido por:

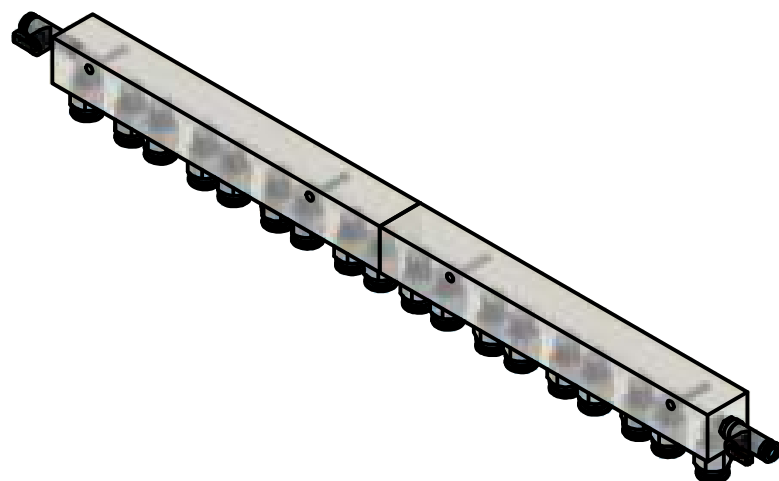
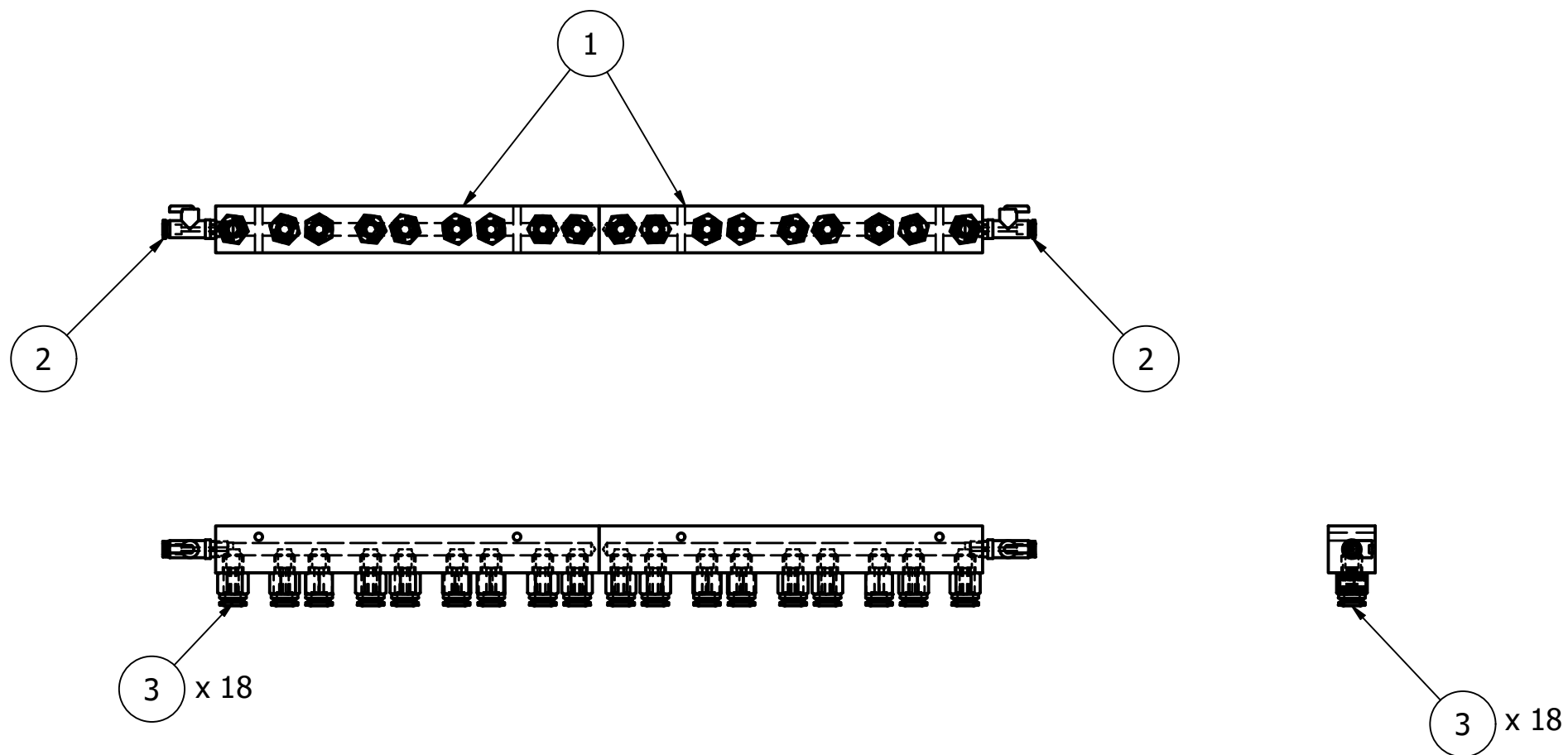


LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	COLECTOR_INFERIOR_A_B1	
2	18	153487 QH-QS-6-1/8	QH-QS-ball valve
3	18	8112921 NPQE-D-R14-Q10-P10---(high)	NPQE_D-push-in fitting
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO			ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
COMPROBADO			
ESCALA: 1:4	TRABAJO FIN DE GRADO CONJUNTO COLECTOR INFERIOR		Nº PLANO 1/1
			SUSTITUYE A:
			SUSTITUIDO POR:

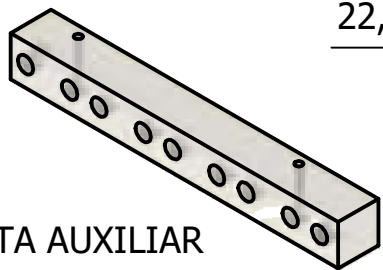
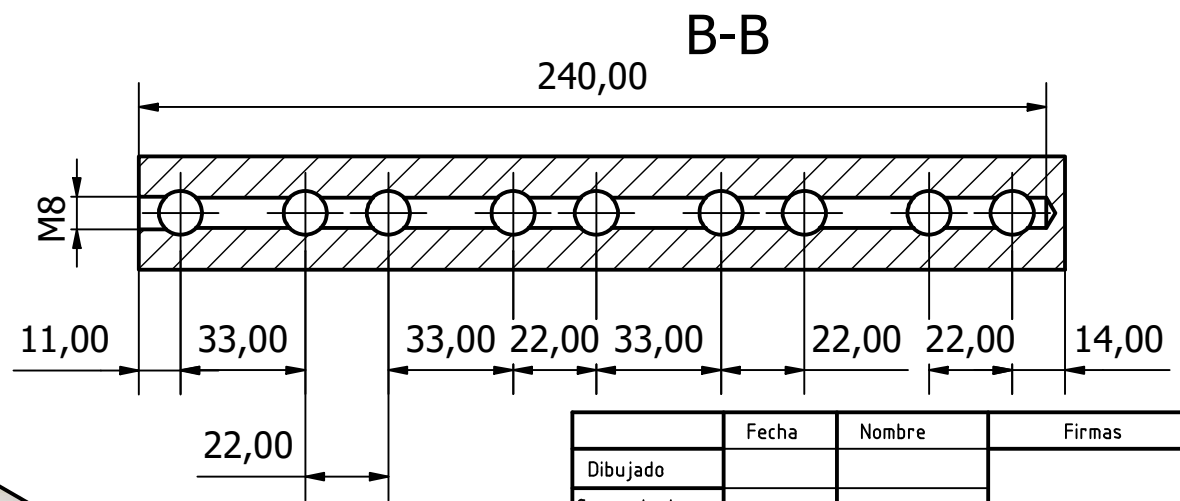
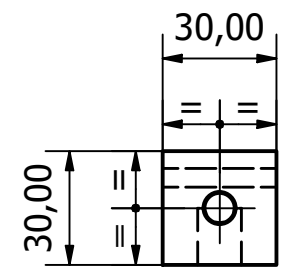
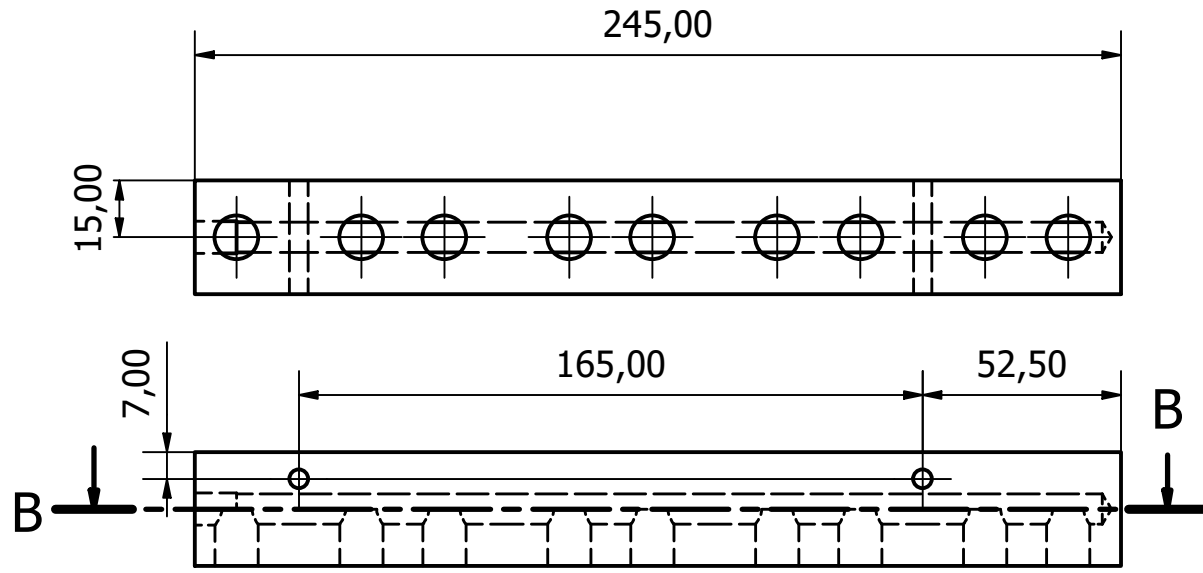


VISTA ROYECTADA
1:4

	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR LINARES	
Dibujado					
Comprobado					
C. Calidad					
Escala 1:2	DESIGNACION COLECTOR INFERIOR			Nº de plano 1/1	
				Sustituye a	
				Sustituido por:	

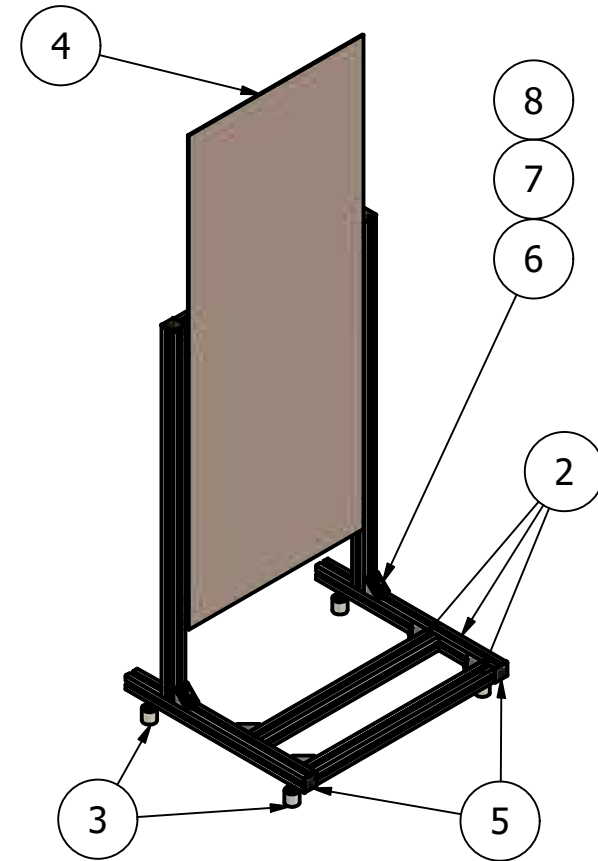
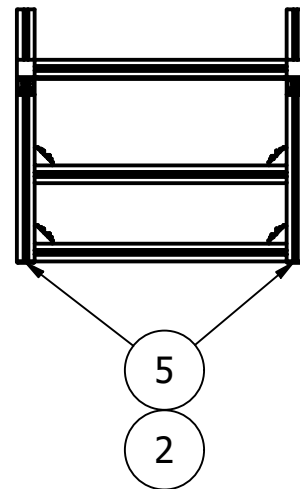
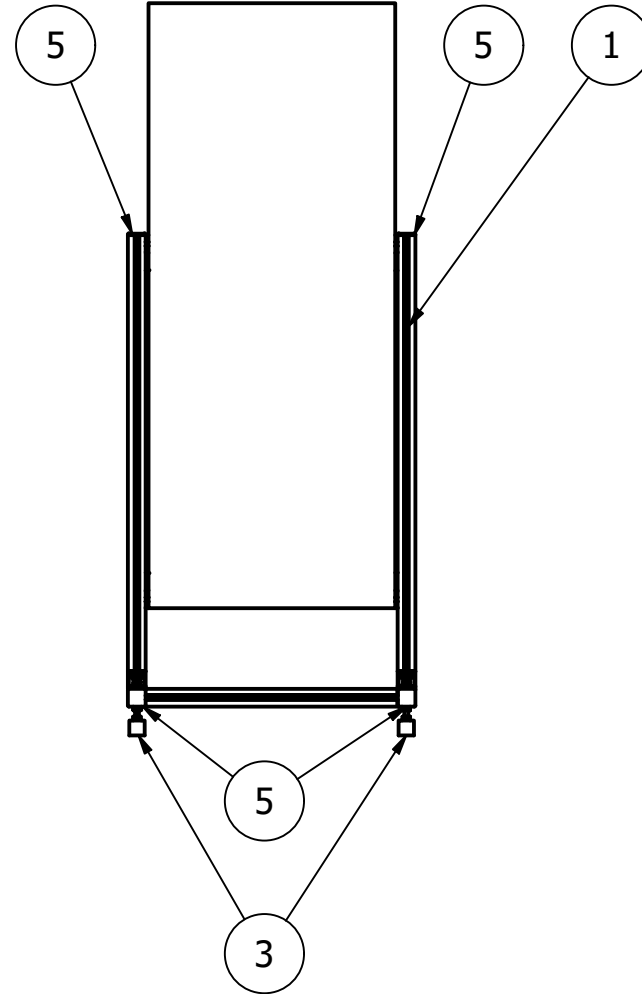
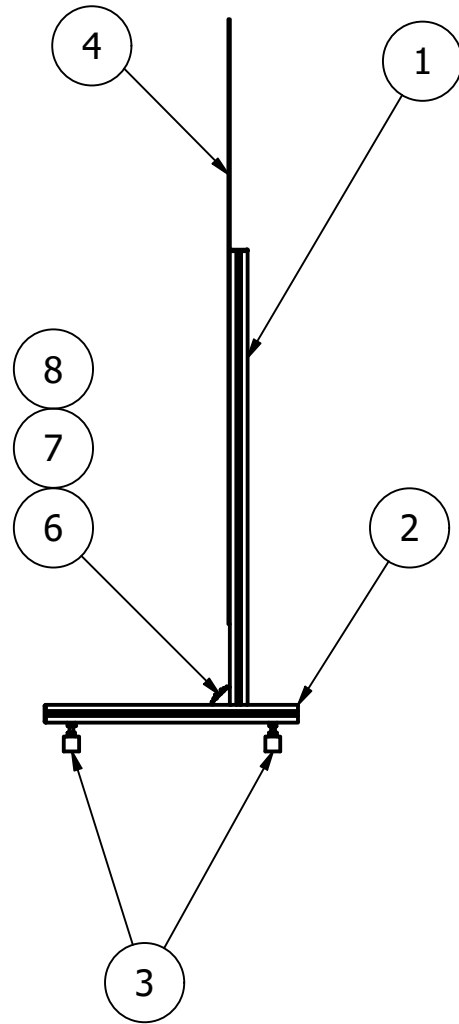


LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	COLECTOR_SUPERIOR_A_B	
2	2	153487 QH-QS-6-1/8	QH-QS-ball valve
3	18	8112921 NPQE-D-R14-Q10-P10---(high)	NPQE_D-push-in fitting
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO			ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
COMPROBADO			
ESCALA: 1:4	TRABAJO FIN DE GRADO CONJUNTO COLECTOR SUPERIOR		Nº PLANO 1/1
			SUSTITUYE A:
			SUSTITUIDO POR:

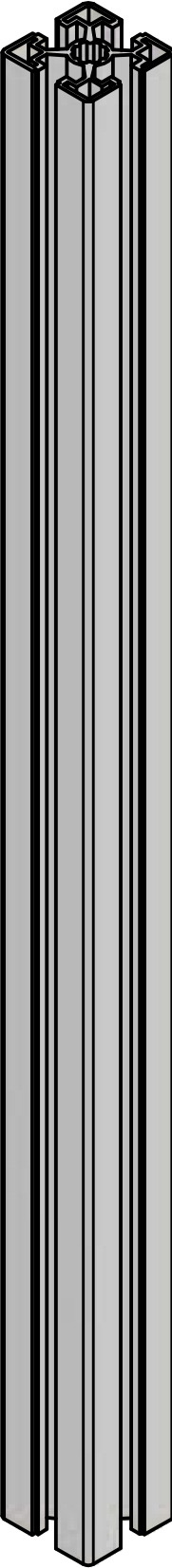
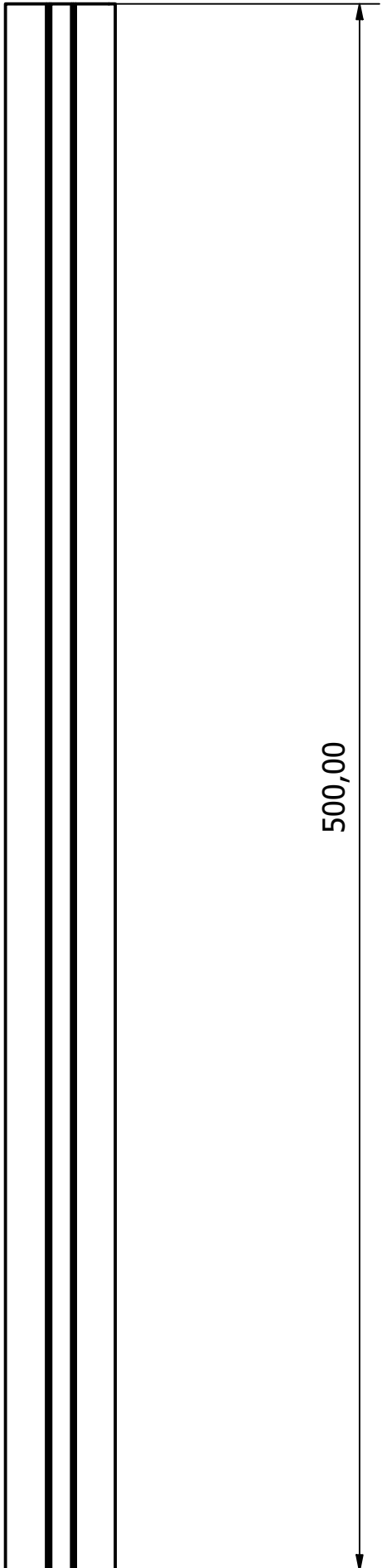
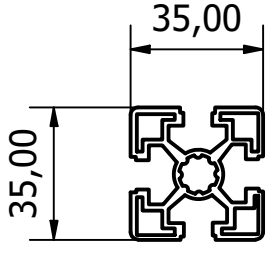
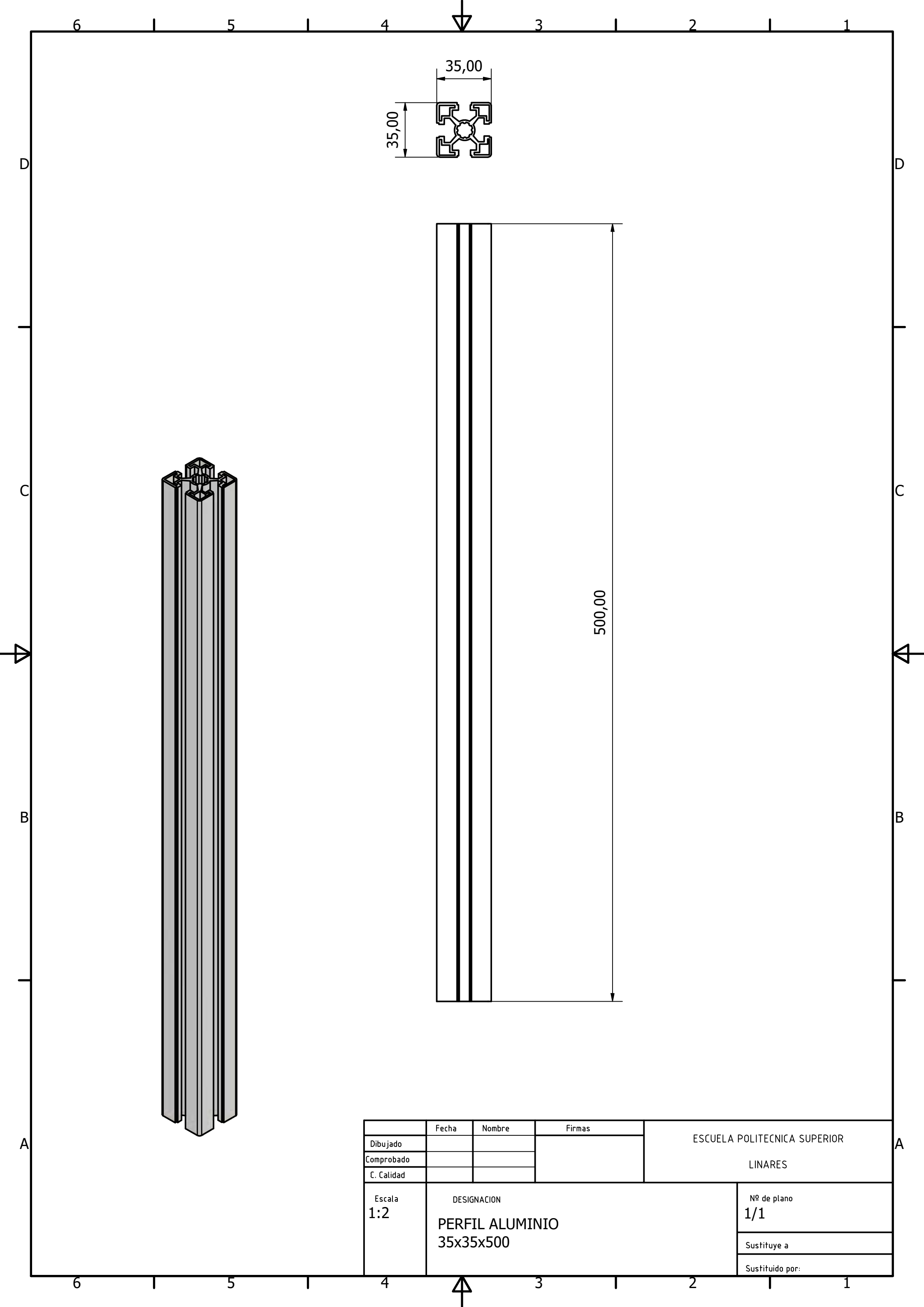


VISTA AUXILIAR
1:4

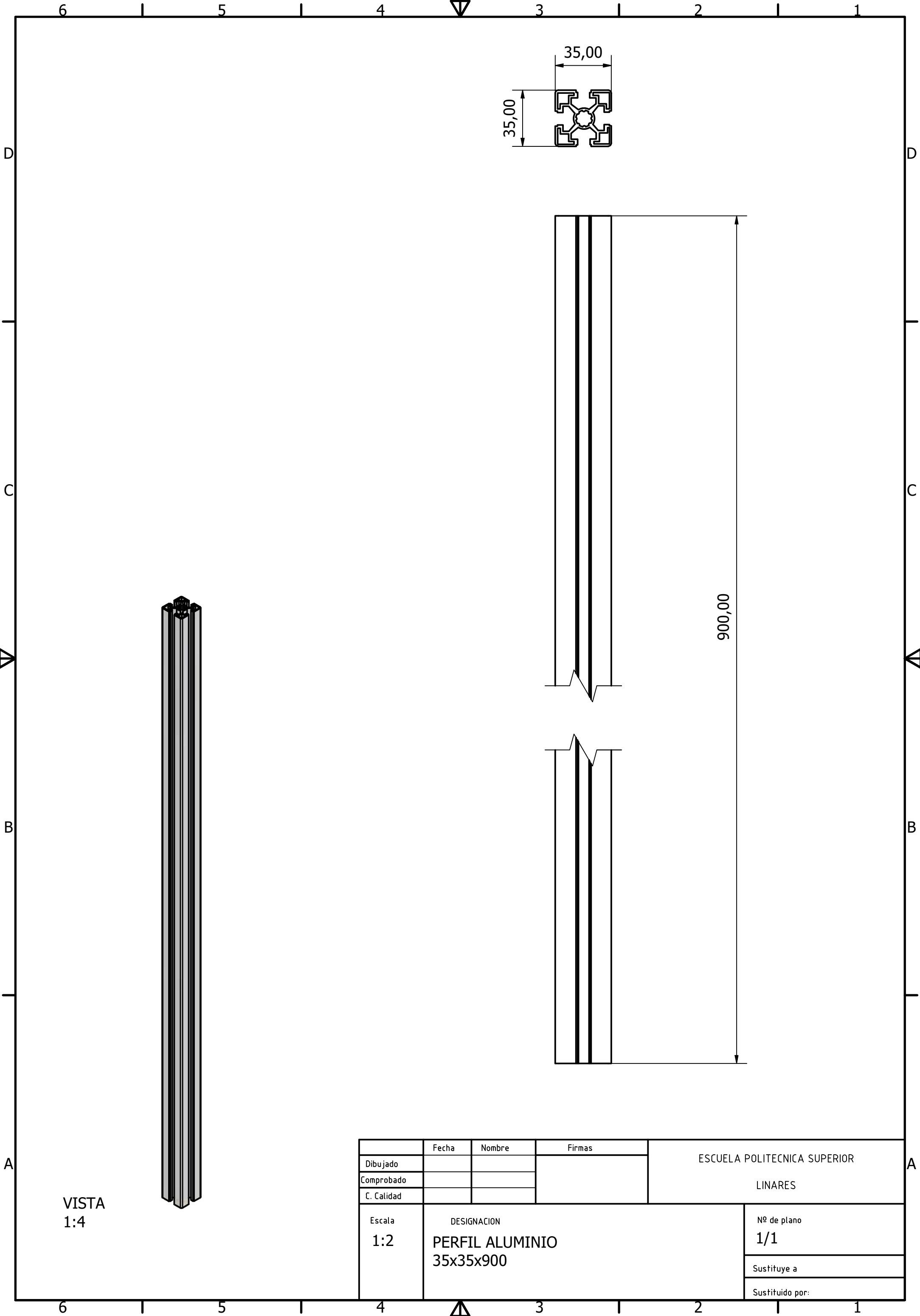
	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR LINARES	
Dibujado					
Comprobado					
C. Calidad					
Escala 1:2	DESIGNACION COLECTOR SUPERIOR			Nº de plano 1/1	
Sustituye a					
		Sustituido por:			

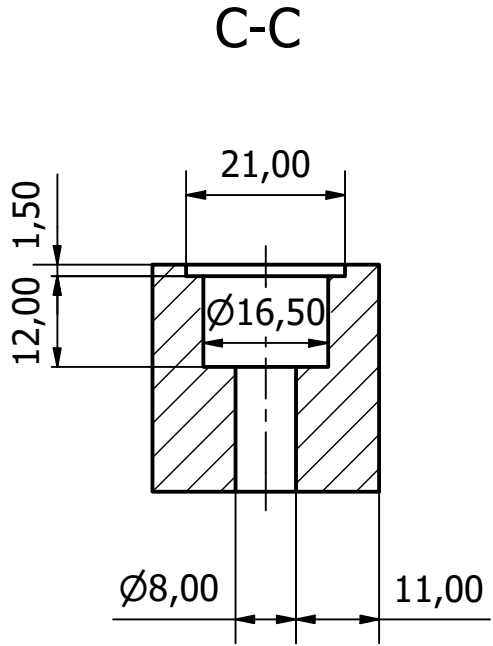
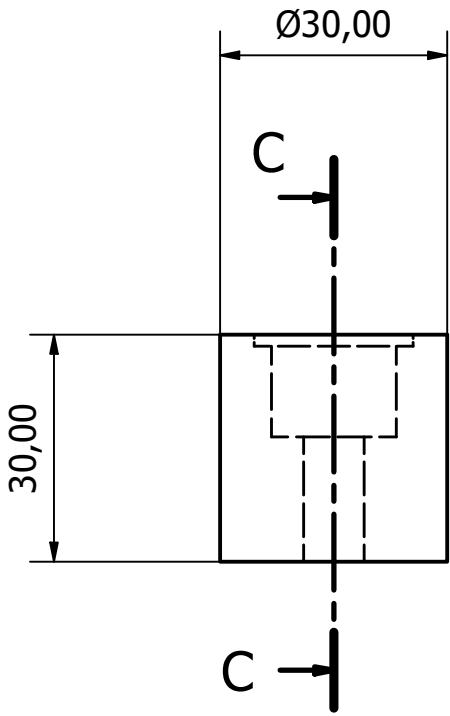
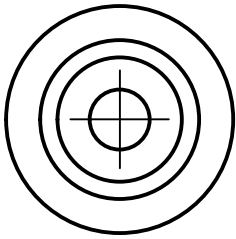
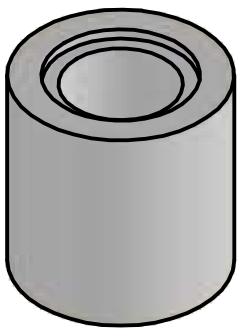


LISTA DE PIEZAS				
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	
1	2	Perfil_Aluminio35x35x900		
2	6	Perfil_Aluminio35x35x500		
3	4	CONJUNTO PATAS		
4	1	CONTRACHAPADO		
5	4	TAPON		
6	10	ESCUADRA		
7	20	K1030.08	K1030-Hexagon nuts with flange	
8	20	K1029.1008030X25	K1029-Hammer-head screws	
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO				
COMPROBADO				
ESCALA: 1:15	TRABAJO FIN DE GRADO CONJUNTO BASTIDOR			Nº PLANO 1/1
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

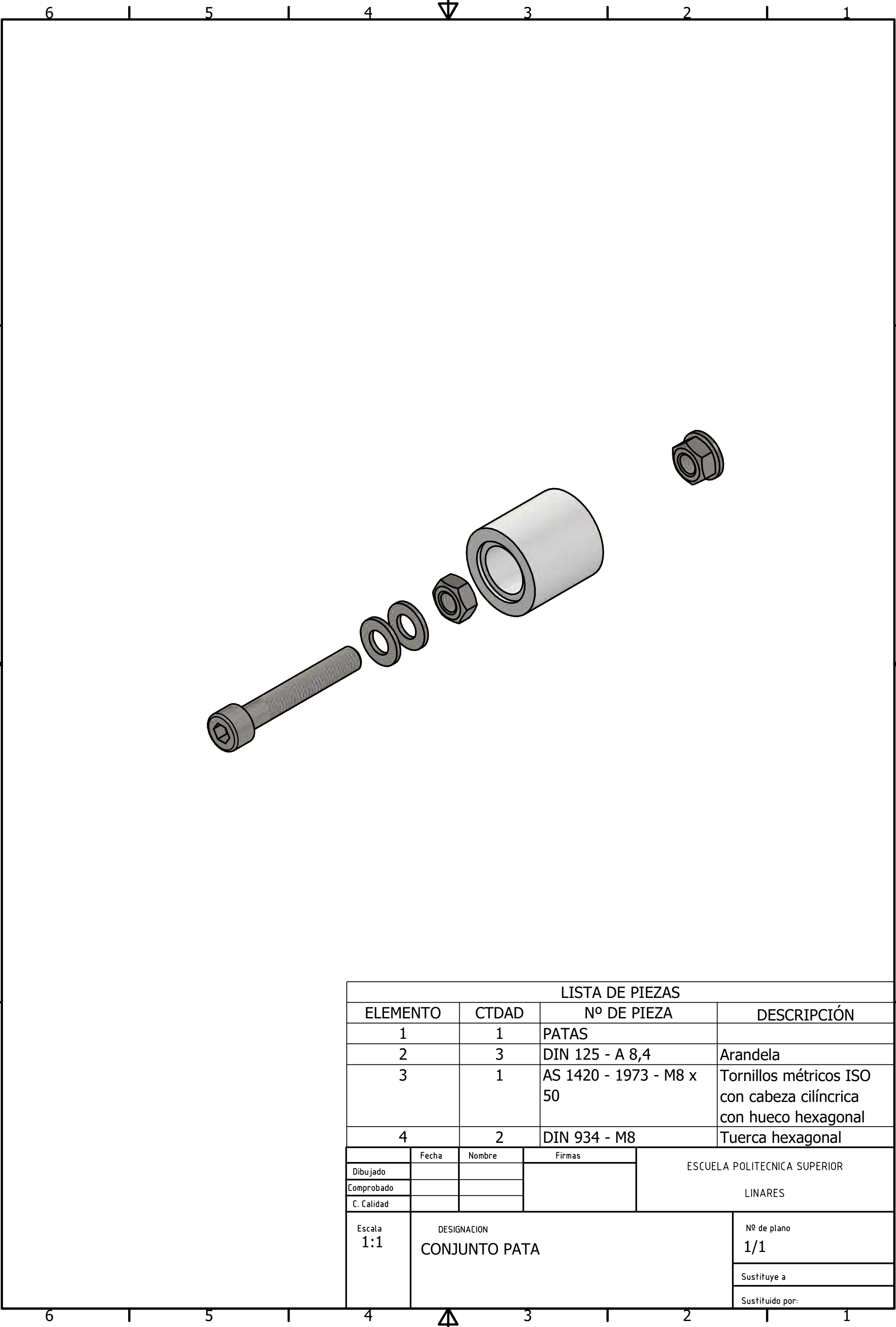


	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR LINARES
Dibujado				
Comprobado				
C. Calidad				
Escala 1:2	DESIGNACION			Nº de plano 1/1
	PERFIL ALUMINIO 35x35x500			Sustituye a
				Sustituido por:

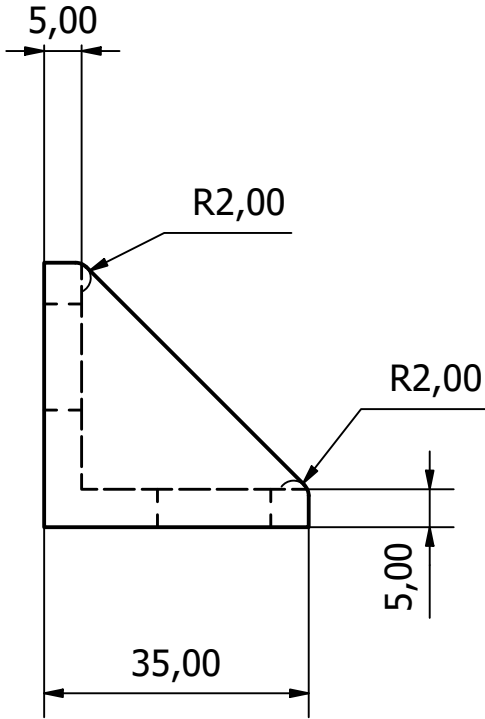
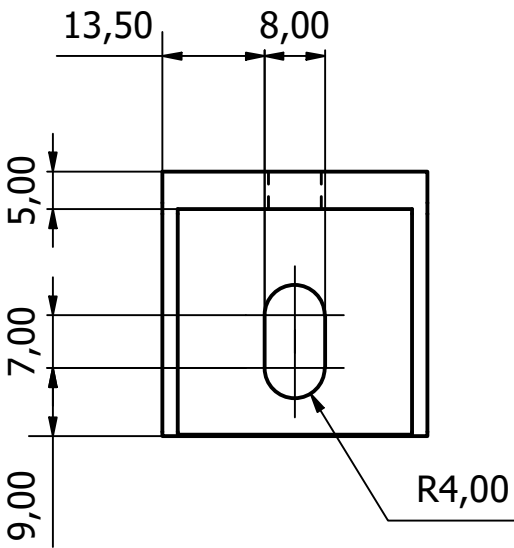
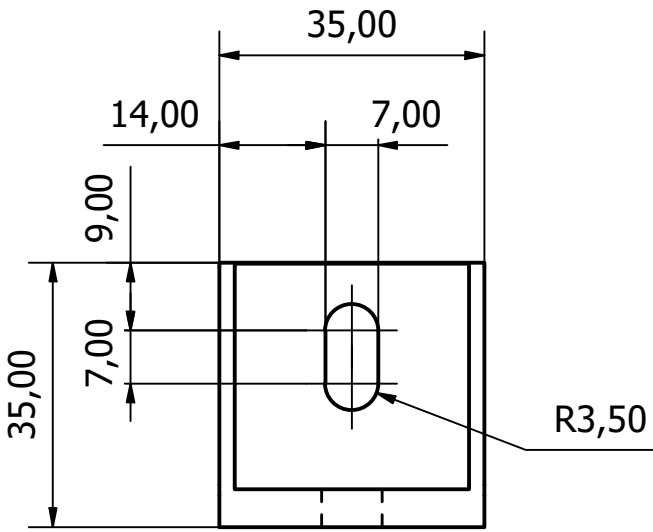
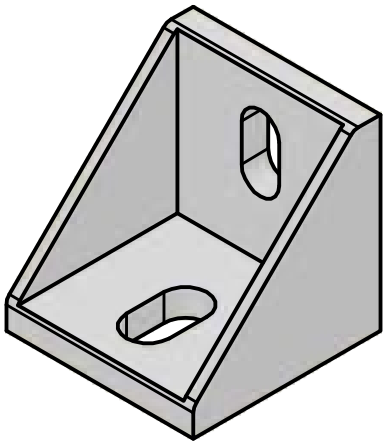




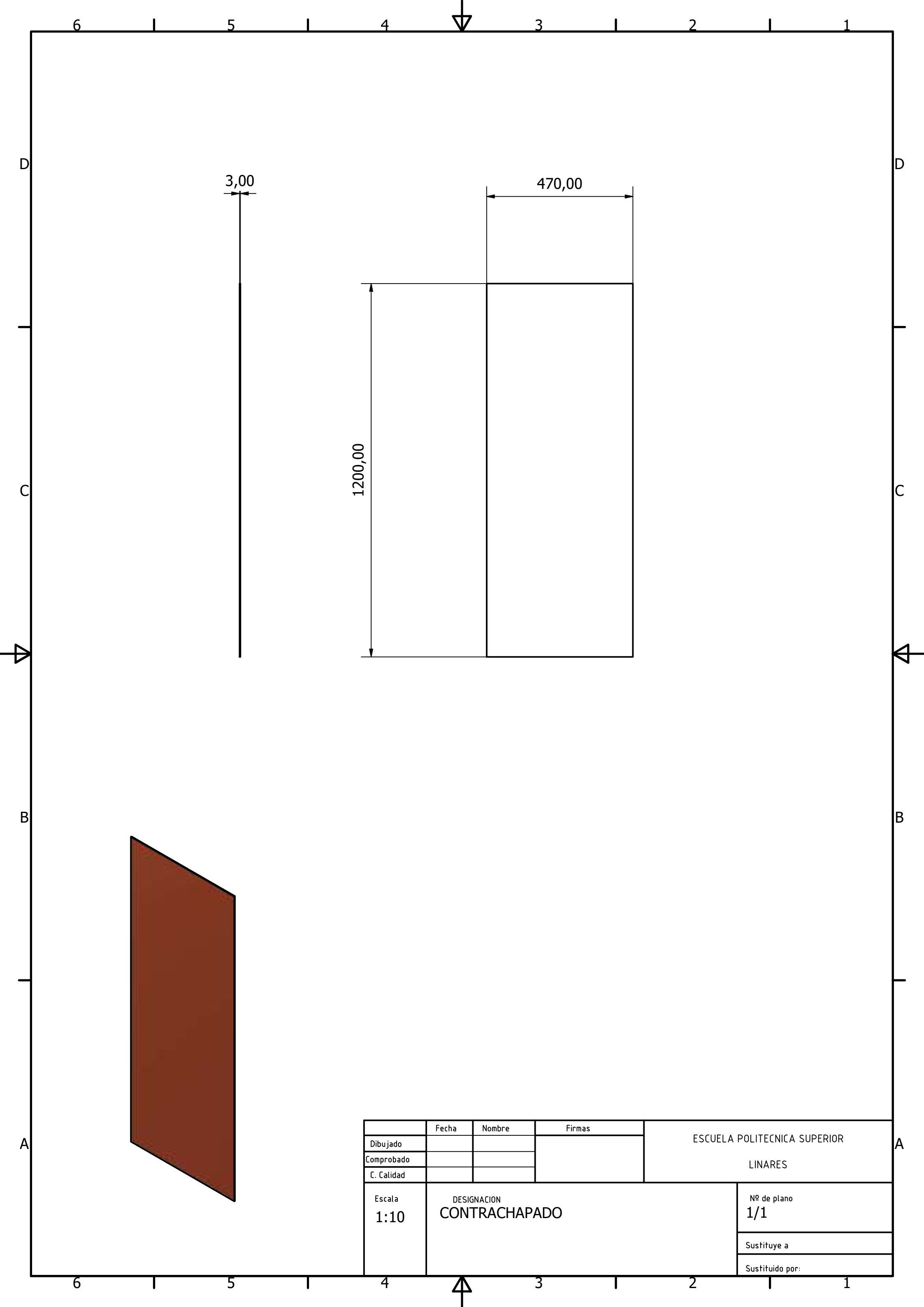
	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR LINARES
Dibujado				
Comprobado				
C. Calidad				
Escala 1:1	DESIGNACION TACO PATA			Nº de plano 1/1
				Sustituye a
				Sustituido por:

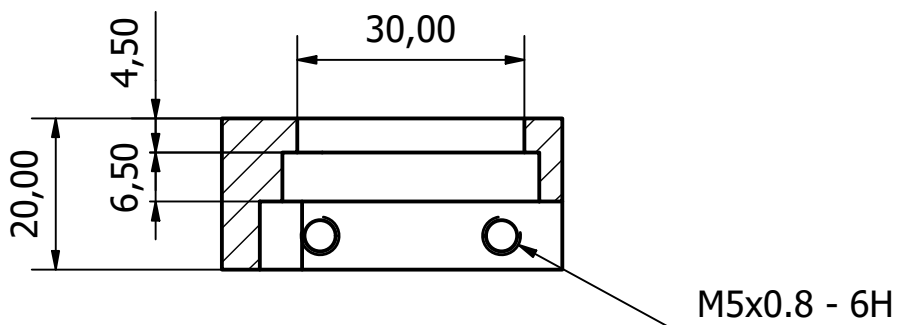
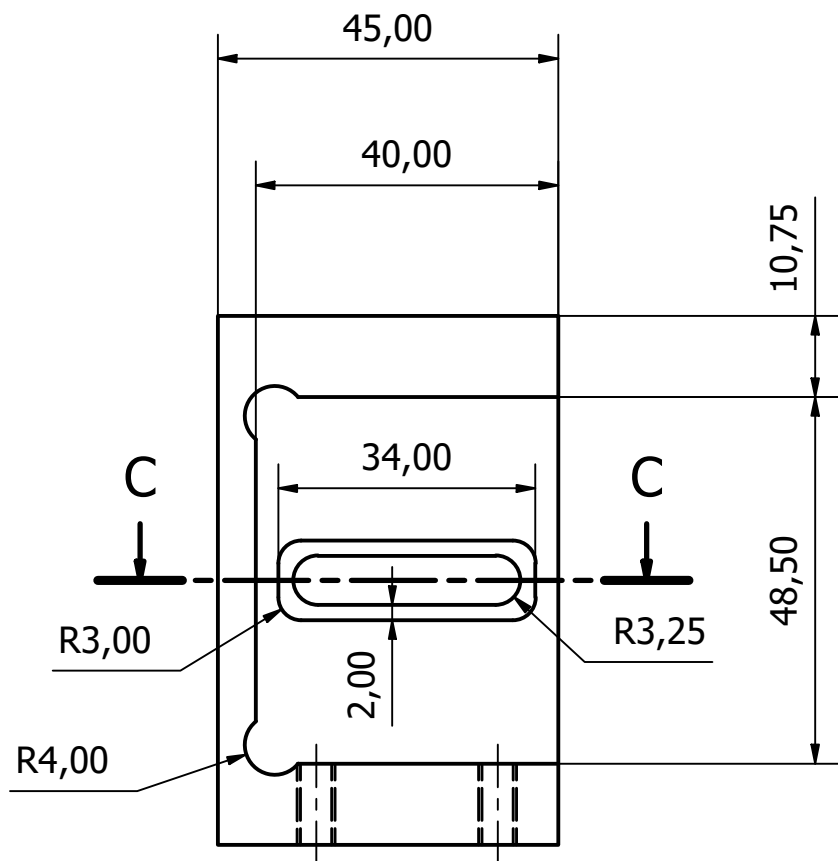
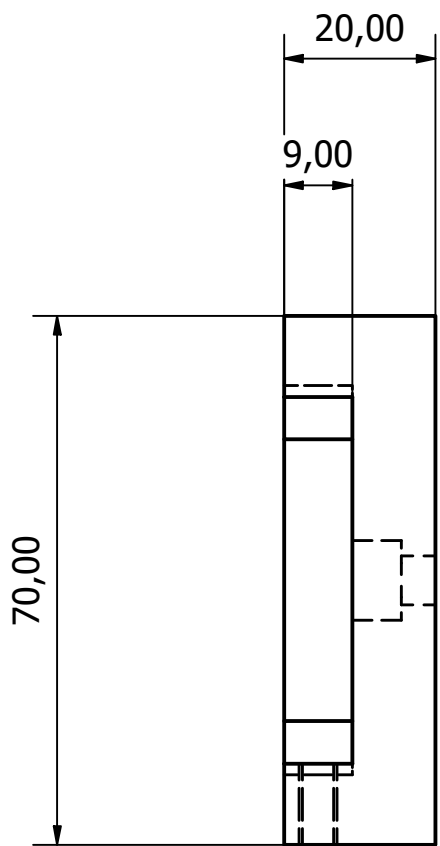


LISTA DE PIEZAS				
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA		DESCRIPCIÓN
1	1	PATAS		
2	3	DIN 125 - A 8,4		Arandela
3	1	AS 1420 - 1973 - M8 x 50		Tornillos métricos ISO con cabeza cilíncrica con hueco hexagonal
4	2	DIN 934 - M8		Tuerca hexagonal
	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR LINARES
Dibujado				
Comprobado				
C. Calidad				
Escala 1:1	DESIGNACION CONJUNTO PATA			Nº de plano 1/1
				Sustituye a
				Sustituido por:

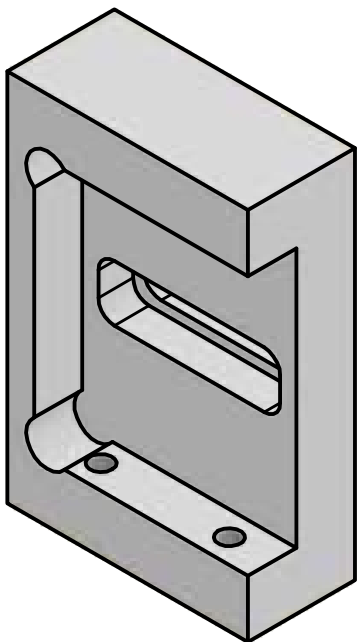


	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR LINARES
Dibujado				
Comprobado				
C. Calidad				
Escala 1:1	DESIGNACION ESCUADRA			Nº de plano 1/1
				Sustituye a
				Sustituido por:

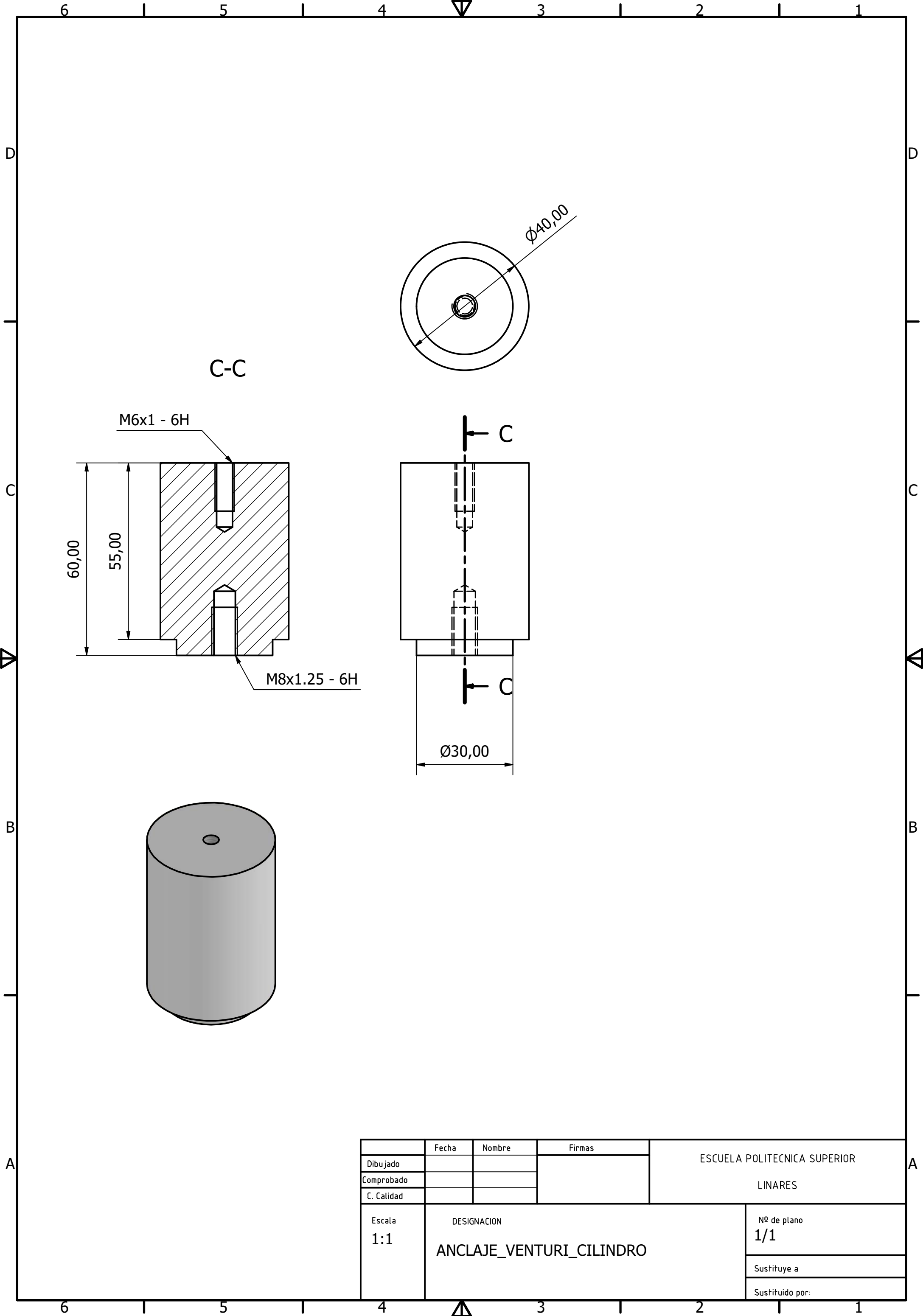




C-C



	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR LINARES
Dibujado				
Comprobado				
C. Calidad				
Escala 1:1	DESIGNACION ANCLAJE VENTURI			Nº de plano 1/1
				Sustituye a
				Sustituido por:



	Fecha	Nombre	Firmas	ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR LINARES
Dibujado				
Comprobado				
C. Calidad				
Escala 1:1	DESIGNACION			Nº de plano 1/1
	ANCLAJE_VENTURI_CILINDRO			Sustituye a
				Sustituido por:

