



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE UNA VENTOSA COMERCIAL MEDIANTE TÉCNICAS CFD

AUTOR: PABLO CASTILLO QUÍLEZ

TUTOR: PEDRO L. IGLESIAS REY

COTUTOR: JORGE GARAY OCHANDIO

Curso Académico: 2013-14



Agradecimientos:

La ejecución de este Trabajo Final de Grado ha sido una labor de conjunto y no podría haberse llevado a cabo sin la colaboración de muchas personas.

Para comenzar quiero dar las gracias a la inestimable ayuda de mi tutor y cotutor Pedro y Jorge, respectivamente. A ellos les quiero expresar mi más sincero agradecimiento por la preocupación de que el trabajo se llevase a cabo de la mejor forma posible.

También ha sido de gran importancia la ayuda y el apoyo de mi amigo y compañero Nacho, con el que he compartido largas horas de trabajo, no sólo durante la realización del trabajo sino a lo largo de los cuatro años del grado.

A mis padres Ana y Manolo y mi hermana Nuria, que siempre han estado pendientes de mí para que el TFG llegase a buen puerto durante estos cinco duros meses de trabajo.

Por último, me gustaría agradecer a aquellas personas que, indirectamente, han colaborado para la consecución final del presente trabajo.



Resumen:

El aire se introduce en las conducciones a presión por motivos muy diversos, siendo el aire atrapado la causa de numerosos problemas. Uno de los más importantes es que la presencia de aire puede originar presiones muy elevadas que pueden dar lugar incluso a la rotura de la instalación.

Una posible solución para evitar estos picos de presión debidos a la presencia de aire es la utilización de ventosas, las cuales permiten que el aire almacenado en la instalación escape libremente a la atmósfera.

Por desgracia, la determinación de las características de comportamiento de algunos de los sistemas presentes en las instalaciones de fluidos, como son las ventosas, es compleja. Dicha evaluación de sus características puede presentar unos requerimientos experimentales sumamente costosos, como son los ensayos realizados para aire. Para soslayar este problema, se buscan alternativas viables para la caracterización de ventosas.

En primer lugar, se puede aplicar la semejanza hidrodinámica para relacionar los ensayos realizados para aire (complejos y caros) con los ensayos realizados para agua (sencillos y económicamente viables).

Por otro lado, la alternativa principal del presente trabajo se centra en el uso de técnicas computacionales (CFD: *Computational Fluid Dynamics*) basadas en el análisis del comportamiento del fluido en el interior de la ventosa.

Por lo tanto, para que los resultados obtenidos se aproximen más al comportamiento real de la ventosa será de vital importancia el estudio detallado de estas técnicas.



Resum:

L'aire s'introduïx en les conduccions a pressió per motius molt diversos, sent l'aire atrapat la causa de nombrosos problemes. Un dels més importants és que la presència d'aire pot originar pressions molt elevades que poden donar lloc fins i tot al trencament de la instal·lació.

Una possible solució per a evitar estos becs de pressió deguts a la presència d'aire és la utilització de ventoses, les quals permeten que l'aire emmagatzemat en la instal·lació fuga lliurement a l'atmosfera.

Per desgràcia, la determinació de les característiques de comportament d'alguns dels sistemes presents en les instal·lacions de fluids, com són les ventoses, és complexa. Aquesta avaluació de les seues característiques pot presentar uns requeriments experimentals sumament costosos, com són el ensaigs realitzats per a aire. Per a biaixar aquest problema, es cerquen alternatives viables per a la caracterització de ventoses.

En primer lloc, es pot aplicar la semblança hidrodinàmica per a relacionar els ensaigs realitzats per a aire (complexos i cars) amb els ensaigs realitzats per a aigua (senzills i econòmicament viables).

D'altra banda, l'alternativa principal del present treball es centra en l'ús de tècniques computacionals (CFD: *Computational Fluid Dynamics*) basades en l'anàlisi del comportament del fluid a l'interior de la ventosa.

Per tant, perquè els resultats obtinguts s'aproximen més al comportament real de la ventosa serà de vital importància l'estudi detallat d'aquestes tècniques.



Abstract:

The air is introduced into the pressurized pipes for very different reasons, being the trapped air the cause of many problems. One of the most important reasons is that the presence of air can cause very high pressures which may even lead to the installation break.

A possible solution to avoid these pressure peaks due to the presence of air is the use of air valves, which allow the air stored in the installation freely escape into the atmosphere.

Unfortunately, the determination of the performance characteristics of some of the systems on-site fluid installations, such as air valves, is complex. This assessment of its characteristics may have some extremely expensive experimental requirements, such as for air trials. To circumvent this problem, viable alternatives are sought for air valves characterizing.

Firstly, the hydrodynamic similarity can be applied to relate the air trials (complex and expensive) with the water trials (simple and economically viable).

On the other hand, the main alternative of this work focuses on the use of computational techniques (CFD: *Computational Fluid Dynamics*) based on fluid performance analysis inside the air valve.

Therefore, the detailed study of these techniques will be of vital importance to obtain results close to the real performance of the air valve.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Índice del Trabajo Final De Grado

A.- MEMORIA.

B.- PRESUPUESTO.

C.- PLANOS.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

A.- MEMORIA



Índice de la Memoria

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 13 |
| 1.1.- Justificación del TFG. | 13 |
| 1.2.- Motivación. | 13 |
| 1.3.- Objetivos del TFG..... | 14 |
| 1.4.- Antecedentes. | 14 |
| 1.5.- El aire en las instalaciones. | 16 |
| 1.5.1.- Origen del aire atrapado. | 16 |
| 1.5.2.- Problemas relacionados con la presencia de aire en las tuberías. | 18 |
| 1.5.3.- Soluciones actuales frente a la problemática del aire..... | 19 |
| 2. ESTADO DEL ARTE DE LAS VENTOSAS. | 21 |
| 2.1.- Principio de Funcionamiento. | 21 |
| 2.2.- Clasificación de las ventosas..... | 26 |
| 2.2.1.- Ventosas de gran orificio. | 27 |
| 2.2.2.- Ventosas de pequeño orificio o purgadores. | 29 |
| 2.2.3.- Ventosas monofuncionales..... | 31 |
| 2.2.4.- Ventosas bifuncionales..... | 32 |
| 2.2.5.- Ventosas trifuncionales. | 33 |
| 2.3.- Dimensionado de ventosas. | 34 |
| 2.4.- Localización de las ventosas. | 35 |
| 2.5.- Conclusiones. | 38 |
| 3. CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DE LAS VENTOSAS. | 41 |
| 3.1.- Introducción. | 41 |
| 3.2.- Flujo isoentrópico en toberas. | 41 |
| 3.3.- Analogía entre el flujo en toberas y el flujo en ventosas. | 46 |
| 3.3.1.- Admisión de aire ($p_t^* < p_{atm}^*$) | 46 |
| 3.3.2.- Expulsión de aire ($p_t^* > p_{atm}^*$) | 47 |



| | |
|---|-----------|
| 3.3.3.- Ajuste propuesto por Boldy. | 48 |
| 3.4.- Interpretación de las curvas características de una ventosa. | 50 |
| 3.5.- Flujo compresible e incompresible. | 54 |
| 4. VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE VENTOSAS. | 57 |
| 4.1.- Introducción. | 57 |
| 4.2.- Normativa aplicable: Norma UNE-EN 1074. | 58 |
| 4.3.- Estudios con aire. | 61 |
| 4.3.1.- Introducción. | 61 |
| 4.3.2.- Montaje experimental de las ventosas. | 62 |
| 4.3.3.- Resultados obtenidos. | 64 |
| 4.3.4.- Análisis de los resultados. | 66 |
| 4.3.5.- Conclusiones. | 66 |
| 4.4.- Alternativas en la Caracterización de ventosas. Estudios con agua. | 67 |
| 4.4.1.- Medios a utilizar. | 67 |
| 4.4.2.- Bloqueo del flotador. | 73 |
| 4.4.3.- Calibración de los manómetros. | 74 |
| 4.4.4.- Ensayo con agua en el laboratorio. | 76 |
| 4.5.- Aplicación de la semejanza hidrodinámica. | 77 |
| 4.6.- Conclusiones. | 79 |
| 5. UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS CFD PARA LA CARACTERIZACIÓN DE VENTOSAS. | 81 |
| 5.1.- Introducción a la mecánica de fluidos computacional. | 81 |
| 5.2.- Ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos. | 82 |
| 5.2.1.- Ecuación de la Conservación de la Masa o de Continuidad. | 82 |
| 5.2.2.- Ecuación de la Conservación de la Cantidad de Movimiento. | 83 |
| 5.2.3.- Las ecuaciones de Navier-Stokes. Fluidos viscosos. | 84 |
| 5.3.- Aplicaciones de los CFD. | 85 |
| 5.3.1.- CFD en la Industria de la Automoción. | 86 |
| 5.3.2.- CFD en la Industria de la Construcción. | 86 |



| | |
|---|------------|
| 5.4.- Método de trabajo de un modelo CFD..... | 87 |
| 5.4.1.- Pre-procesado..... | 88 |
| 5.4.2.- Solver..... | 88 |
| 5.4.3.- Post-procesado..... | 89 |
| 5.5.- Ventajas e inconvenientes de los CFD..... | 90 |
| 5.6.- Estudio de la turbulencia..... | 91 |
| 5.6.1.- Modelos promediados de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS)..... | 92 |
| 5.6.2.- Modelos de Simulación de Grandes Remolinos (LES)..... | 93 |
| 5.6.3.- Modelos de Simulación Numérica Directa (DNS)..... | 94 |
| 5.6.4.- Comparación entre modelos..... | 94 |
| 5.7.- Softwares comerciales. Ansys Fluent..... | 95 |
| 5.8.- Conclusiones..... | 96 |
| 6. ESTUDIOS PRELIMINARES..... | 97 |
| 6.1.- Geometría..... | 97 |
| 6.1.1.- Introducción al software de modelado CAD en 3D. Autodesk Inventor Professional..... | 97 |
| 6.1.2.- Proceso de modelado de la geometría mediante herramientas CAD..... | 98 |
| 6.1.3.- Importación de la geometría..... | 102 |
| 6.1.4.- Creación del volumen del fluido interior..... | 103 |
| 6.2.- Mallado..... | 104 |
| 6.2.1.- Introducción al mallado en el análisis computacional de CFD..... | 104 |
| 6.2.2.- Diseño y generación de una malla inicial..... | 105 |
| 6.2.3.- Condiciones de contorno..... | 107 |
| 6.2.4.- Análisis computacional del mallado inicial..... | 108 |
| 6.2.5.- Estudio del mallado..... | 114 |
| 7. ESTUDIOS DE VALIDACIÓN DE LAS TÉCNICAS CFD..... | 117 |
| 7.1.- Estudios con Aire de la ventosa..... | 118 |
| 7.2.- Estudios con Agua de la ventosa..... | 120 |



| | |
|---|------------|
| 7.3.- Estudios con Agua de la Cámara de Ensayo de Ventosas con Agua (CEVA) con la ventosa en su interior..... | 121 |
| 7.4.- Estudio de la aplicación de la semejanza hidrodinámica..... | 123 |
| 7.4.1.- Semejanza hidrodinámica de CFD con Agua a Aire..... | 123 |
| 7.4.2.- Semejanza hidrodinámica de CFD con Aire a Agua..... | 124 |
| 7.4.3.- Semejanza hidrodinámica del Ensayo de Aire en Laboratorio a Agua..... | 124 |
| 8. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS..... | 125 |
| 8.1.- Conclusiones..... | 126 |
| 8.2.- Desarrollos futuros..... | 127 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA..... | 129 |



Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Cámara de Ensayo de Ventosas con Agua (CEVA) para una ventosa de 2”.... | 16 |
| Figura 1.2. Instalación de cuatro tramos con perfil irregular y dos bolsas de aire (Fuertes y otros, 1997)..... | 17 |
| Figura 2.1. Ventosa cerrada ($p_t > 0$) (Fuertes, 2001)..... | 23 |
| Figura 2.2. Ventosa expulsando aire ($p_t > 0$) (Fuertes, 2001)..... | 24 |
| Figura 2.3. Ventosa cerrando ($p_t > 0$) (Fuertes, 2001)..... | 25 |
| Figura 2.4. Ventosa cerrada ($p_t < 0$: depresión) (Fuertes, 2001). | 25 |
| Figura 2.5. Ventosas de gran y pequeño orificio (Fuertes, 2001). | 27 |
| Figura 2.6. Ventosa de gran orificio (Fuertes, 2001)..... | 28 |
| Figura 2.7. Ventosa de pequeño orificio o purgador (Fuertes, 2001)..... | 30 |
| Figura 2.8. Ventosa monofuncional. | 32 |
| Figura 2.9. Ventosa bifuncional. | 33 |
| Figura 2.10. Ventosa trifuncional con un único cuerpo. | 33 |
| Figura 2.11. Ventosa trifuncional con doble cuerpo. | 34 |
| Figura 2.12. Pendientes mínimas recomendadas para la mejora del uso de las ventosas (García Mares, 2012)..... | 36 |
| Figura 3.1. Esquema de una tobera convergente (Iglesias y otros, 2013). | 41 |
| Figura 3.2. Ajuste del comportamiento de una ventosa según Boldy (García Mares, 2012). | 49 |
| Figura 3.3. Curva característica de una ventosa de gran orificio (Fuertes, 2001)..... | 50 |
| Figura 3.4. Curva característica de una ventosa de pequeño orificio (Fuertes, 2001)..... | 51 |



| | |
|--|----|
| Figura 3.5. Ensayos realizados por el Council for Scientific and Industrial Research, indicando el “punto de cierre dinámico” para dos ventosas de gran orificio DN 80 (García Mares, 2012)..... | 53 |
| Figura 3.6. Curvas características de diferentes ventosas de DN 50 en la fase de admisión (Fuertes, 2001)..... | 53 |
| Figura 3.7. Comparación entre flujo compresible e incompresible (Iglesias y otros, 2013). | 56 |
| Figura 4.1. Comparación entre los ensayos de expulsión de aire con las curvas del fabricante de una ventosa de DN 50 en fase de expulsión (Fuertes y otros, 2006)..... | 57 |
| Figura 4.2. Instalación de ensayo con función de salida de aire (UNE-EN 1074-4, 2000). | 59 |
| Figura 4.3. Ejemplos de instalación de ensayo con función de entrada de aire (UNE-EN 1074-4, 2000). | 61 |
| Figura 4.4. Banco de ensayos con aire del laboratorio..... | 63 |
| Figura 4.5. Ensayo de aire con la ventosa modelo IRUA 930..... | 63 |
| Figura 4.6. Ensayo de expulsión de aire de la ventosa modelo IRUA 930. | 64 |
| Figura 4.7. Ensayo de admisión de aire de la ventosa modelo IRUA 930. | 65 |
| Figura 4.8. Instalación del ensayo con agua en el laboratorio..... | 68 |
| Figura 4.9. Depósito. | 68 |
| Figura 4.10. Instalación con dos bombas en paralelo..... | 69 |
| Figura 4.11. Variador de Frecuencia. | 69 |
| Figura 4.12. Válvula de regulación del caudal. | 70 |
| Figura 4.13. Caudalímetro electromagnético. | 70 |
| Figura 4.14. Cámara de Ensayo de Ventosas con Agua (CEVA) donde se aloja la ventosa modelo IRUA 930. | 71 |



| | |
|--|-----|
| Figura 4.15. Manómetros. | 72 |
| Figura 4.16. Transductor de presión diferencial..... | 72 |
| Figura 4.17. Bloqueo realizado al flotador de la ventosa modelo IRUA 930. | 73 |
| Figura 4.18. Calibrador de manómetros. | 75 |
| Figura 5.1. Imagen de perfil de líneas de corriente en un coche Fórmula 1..... | 86 |
| Figura 5.2. Distribución de temperaturas mediante técnicas CFD..... | 87 |
| Figura 5.3. Evolución de la presión a la entrada de la ventosa modelo IRUA 930..... | 89 |
| Figura 5.4. Diferencia entre flujo laminar y flujo turbulento. | 92 |
| Figura 5.5. Comparativa entre los tres grandes tipos de modelos de turbulencia (Capote y otros, 2008)..... | 94 |
| Figura 6.1. Menú de selección para el desarrollo de bocetos en Autodesk Inventor Professional. | 98 |
| Figura 6.2. Menú de selección para el desarrollo de ensamblajes en Autodesk Inventor Professional. | 98 |
| Figura 6.3. Ventosa modelo IRUA 930 de DN 80 mm (3”)...... | 99 |
| Figura 6.4. Ensamblaje parcial 1: Flotador..... | 100 |
| Figura 6.5. Ensamblaje parcial 2: Cuerpo principal y Flotador..... | 101 |
| Figura 6.6. Ensamblaje parcial 3: Ventosa sin la tapa superior..... | 101 |
| Figura 6.7. Ensamblaje parcial 4: Ventosa completa. | 102 |
| Figura 6.8. Operaciones de la geometría en Ansys Workbench..... | 103 |
| Figura 6.9. Fluido interior de la ventosa modelo IRUA 930 en Ansys Workbench. | 104 |
| Figura 6.10. Mallado de la ventosa modelo IRUA 930 en Ansys Meshing..... | 107 |
| Figura 6.11. Condiciones de Contorno de la ventosa modelo IRUA 930. | 108 |
| Figura 6.12. Características del mallado inicial de la ventosa modelo IRUA 930..... | 108 |



| | |
|---|-----|
| Figura 6.13. Resultados obtenidos (<i>Skewness</i>) de la ventosa modelo IRUA 930. | 109 |
| Figura 6.14. Resultados obtenidos (<i>Orthogonal Quality</i>) de la ventosa modelo IRUA 930. | 110 |
| Figura 6.15. Evolución del residuo de la ventosa modelo IRUA 930. | 112 |
| Figura 6.16. Evolución del flujo de aire a la salida de la ventosa modelo IRUA 930. | 112 |
| Figura 6.17. Mapa de presiones a lo largo de la ventosa modelo IRUA 930. | 113 |
| Figura 6.18. Mapa de turbulencia a lo largo de la ventosa modelo IRUA 930. | 113 |
| Figura 6.19. Estudio del mallado (1) de la ventosa modelo IRUA 930. | 115 |
| Figura 6.20. Estudio del mallado (2) de la ventosa modelo IRUA 930. | 116 |
| Figura 7.1. Verificación del modelo CFD de la ventosa modelo IRUA 930 mediante el ensayo con aire. | 119 |
| Figura 7.2. Comparativa CFD – ensayo físico con aire..... | 119 |
| Figura 7.3. Verificación del modelo CFD de la ventosa modelo IRUA 930 mediante el ensayo con agua..... | 120 |
| Figura 7.4. Fluido interior de la CEVA en Ansys Workbench..... | 121 |
| Figura 7.5. Mallado de la CEVA en Ansys Meshing..... | 121 |
| Figura 7.6. Verificación del modelo CFD de la CEVA mediante el ensayo con agua..... | 122 |
| Figura 7.7. Verificación de la semejanza hidrodinámica desde el CFD de Agua a Aire. . | 123 |
| Figura 7.8. Verificación de la semejanza hidrodinámica desde el CFD de Aire a Agua. . | 124 |
| Figura 7.9. Verificación de la semejanza hidrodinámica desde el ensayo de laboratorio con Aire a Agua..... | 124 |
| Figura 8.1. Comparación entre los ensayos de admisión de aire con las curvas del fabricante de una ventosa de DN 50 en fase de admisión (Fuertes y otros, 2006)..... | 126 |



Índice de Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 3.1. Comportamiento del flujo en una tobera..... | 45 |
| Tabla 3.2. Fase de admisión en una ventosa..... | 46 |
| Tabla 3.3. Fase de expulsión en una ventosa..... | 48 |
| Tabla 4.1. Resultados obtenidos tras el ensayo de expulsión de aire..... | 64 |
| Tabla 4.2. Resultados obtenidos tras el ensayo de admisión de aire..... | 65 |
| Tabla 4.3. Resultados obtenidos tras la calibración del manómetro de entrada..... | 75 |
| Tabla 4.4. Resultados obtenidos tras la calibración del manómetro de salida..... | 76 |
| Tabla 6.1. Diferentes calidades de malla según <i>Skewness</i> | 109 |
| Tabla 6.2. Diferentes calidades de malla según <i>Orthogonal Quality</i> | 110 |
| Tabla 6.3. Resultados obtenidos tras el estudio del mallado (1)..... | 114 |
| Tabla 6.4. Resultados obtenidos tras el estudio del mallado (2)..... | 115 |
| Tabla 7.1. Resultados obtenidos tras el ensayo de la ventosa modelo IRUA 930 con aire mediante técnicas CFD..... | 118 |
| Tabla 7.2. Resultados obtenidos tras el ensayo de la ventosa modelo IRUA 930 con agua mediante técnicas CFD..... | 120 |
| Tabla 7.3. Resultados obtenidos tras el ensayo de la CEVA con agua mediante técnicas CFD..... | 122 |



1. INTRODUCCIÓN.

1.1.- Justificación del TFG.

El proyecto de determinación de las características de una ventosa comercial mediante técnicas CFD se ofreció a los alumnos del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales a modo de comprobación de un proyecto realizado en el Laboratorio de Nahariya (Israel) perteneciente a la empresa Bermad. Además, los estudios se amplían en el Laboratorio Justo Nieto de la Universidad Politécnica de Valencia del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (DIHMA) para la realización de los ensayos con agua de la ventosa.

Por lo tanto, el alumno decidió realizar dicha investigación para cubrir, en parte, las necesidades de una verificación computacional sobre el proyecto mencionado, así como en el ámbito personal, adquirir conocimientos adicionales acerca de la simulación computacional de un fluido sobre una ventosa comercial modelo IRUA 930 y enriquecer sus estudios de manera más específica en aspectos de la ingeniería relacionados con esta materia.

1.2.- Motivación.

El Trabajo Final de Grado (TFG) constituye la materia final que todo alumno debe completar antes de obtener su titulación de Grado. El TFG se concibe como una síntesis académica de los contenidos cursados durante los cuatro años de los que consta el Grado, debiendo mostrarse de manera clara y eficiente la adquisición de las competencias correspondientes a la titulación. Por lo tanto, el primer motivo es la necesidad de obtener el título de graduado en Tecnologías Industriales y así poder continuar sus estudios realizando el Master en Ingeniería Industrial.

Además, desde el inicio de sus estudios universitarios, al alumno autor del presente Trabajo Final de Grado, le han venido interesando los temas relacionados con la Mecánica de Fluidos y la Hidráulica.

Por otra parte, el uso de las técnicas computacionales mediante CFD se ha incorporado recientemente al ámbito ingenieril y el auge producido en los últimos años ofrece un incentivo adicional para su estudio.



Por consiguiente, el interés por profundizar en dichas cuestiones constituye la principal causa y motivación personal para la elección del tema objeto del trabajo, en el que pretende plasmar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera.

1.3.- Objetivos del TFG.

El presente Trabajo Final de Grado forma parte del estudio del Proyecto de Investigación OPERAGUA denominado “*Mejora de las técnicas de llenado y operación de Redes de Abastecimiento de Agua*” financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España.

El propósito principal de este trabajo es el estudio de validación de técnicas CFD para caracterizar una ventosa comercial modelo IRUA 930 con un diámetro nominal de 80 mm.

Para ello el trabajo se distribuye en las siguientes etapas u objetivos:

1. Definición del elemento a estudiar y establecimiento de los rangos de presión y flujo mediante ensayos experimentales dentro de los cuales será necesario realizar la caracterización.
2. Representación gráfica mediante técnicas CAD del elemento a analizar donde se dispone del elemento real. Ser capaz de desmontar el mismo debiendo tomar las medidas adecuadas a fin de, finalmente, elaborar el modelo geométrico.
3. Desarrollar una estrategia de mallado del elemento a analizar.
4. Aplicar el estudio de la semejanza hidrodinámica y analizar el comportamiento de la ventosa mediante técnicas computacionales (CFD).
5. Comparar los diferentes análisis realizados en el laboratorio con la simulación computacional correspondiente.

1.4.- Antecedentes.

La historia de los CFD, como es lógico, va ligada a la evolución de los ordenadores. Surgió en la década de los 70 como medio para simular fluidos en movimiento, aunque para situaciones muy simples y en aplicaciones aeroespaciales e industrias donde la predicción



del comportamiento del flujo era importante. Con la evolución de los ordenadores y con el desarrollo de nuevas técnicas numéricas, los problemas que se podían resolver eran cada vez más complejos.

Ya a principios de los años 80 se resolvían las ecuaciones de Euler en dos y, posteriormente, en tres dimensiones. A mediados de la década de los 80 se fue desplazando el interés hacia los fluidos viscosos y, por tanto, hacia la resolución completa de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Es en los años 90 cuando se expande de forma significativa el uso de los CFD a distintas aplicaciones y procesos industriales en los que interviene la transferencia de calor, las reacciones químicas, los flujos bifásicos, los cambios de fase, la transferencia de masa y los esfuerzos al interactuar con sólidos, entre otros.

Actualmente el uso de esta herramienta ha cambiado radicalmente. Ha pasado de ser empleado únicamente a nivel de investigación, a ser utilizado como una potente herramienta en problemas aplicados de ingeniería de carácter industrial.

Un ejemplo similar al del estudio del presente trabajo se refleja en la Universidad Politécnica de Valencia donde se han llevado a cabo experimentos sobre la “*Caracterización de ventosas mediante técnicas CFD*” (García Mares, 2012).

Este proyecto fue desarrollado en 2012 en el laboratorio Justo Nieto de la UPV mediante un primer prototipo para poder realizar el ensayo de agua con ventosas de 2” tanto para la admisión como para la expulsión. Por sistema de admisión se entiende el conjunto de dispositivos que permiten que se ingrese el aire en la ventosa, y por otra parte, un sistema de expulsión es aquel capaz de dar salida al aire desde la válvula de aireación a la atmósfera.

En la Figura 1.1 se recoge el ambiente donde se realizó el ensayo. En éste, el fluido entra por la parte superior de la cámara en la que está la ventosa instalada (CEVA: Cámara de Ensayo de Ventosas con Agua) y sale a través de la ventosa. Puede utilizarse en un sentido o en el contrario, en cuyo caso, el fluido entra en la cámara a través de la ventosa y sale por la apertura superior de la cámara.



Figura 1.1. Cámara de Ensayo de Ventosas con Agua (CEVA) para una ventosa de 2”.

En el presente trabajo, se trata de profundizar en el estudio y caracterización de una ventosa de 3” (DN 80 mm) y observar cómo se comporta cuando se le somete a ensayos de aire y agua, así como su posterior validación mediante las técnicas CFD.

1.5.- El aire en las instalaciones.

1.5.1.- Origen del aire atrapado.

El estudio minucioso de la evolución del aire atrapado en una tubería, así como la forma más eficiente de expulsarlo o admitirlo en la misma son esenciales tanto para poder pronosticar los efectos indeseables que dicho aire puede tener sobre el conjunto de la instalación, como para restringir o anular los mismos.

La existencia de aire en las tuberías puede ser tanto intencionada como accidental y, además, puede tener procedencias muy diferentes. Una de ellas es debido a la liberación de aire disuelto que se encuentra en el agua en cantidades variables. El ascenso de la temperatura y el descenso de la presión reduce el contenido de aire disuelto en el agua.

Otro efecto es consecuencia de que la instalación se encuentre incorrectamente diseñada o no haya sido convenientemente llenada y/o purgada, en cuyo caso pueden llegar a existir grandes bolsas de aire retenido en su interior.

Por otra parte, el aire puede entrar desde el exterior de las tuberías en el transcurso de su funcionamiento normal tomando en consideración motivos tales como; ocasionales vórtices en la aspiración de las bombas que succionan el aire de la atmósfera al bombear, operación de ventosas admitiendo aire, roturas de las tuberías o pequeñas grietas en zonas de presión que se hallen por debajo de la atmosférica.

En muchas ocasiones, las conducciones deben librar desniveles considerables del terreno siendo su perfil irregular, lo cual permite la concentración de bolsas de aire en los puntos elevados de las mismas (Figura 1.2). Es el caso de gran parte de los sistemas de suministro de agua en los cuales existe un desnivel notable entre el origen de suministro hasta los depósitos de distribución situados en el inicio de las redes.

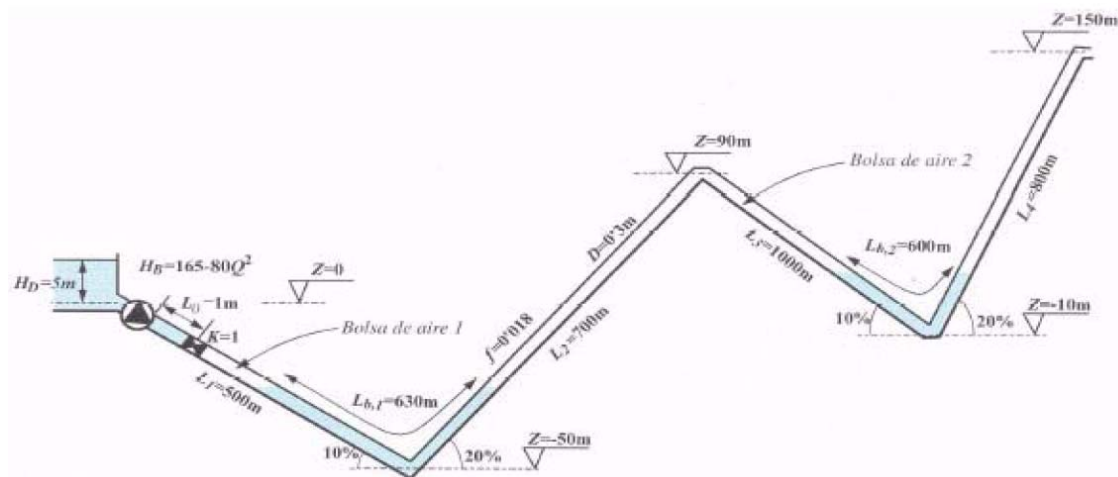


Figura 1.2. Instalación de cuatro tramos con perfil irregular y dos bolsas de aire (Fuentes y otros, 1997).

Además de los perfiles discontinuos de las instalaciones, cabe añadir en excesivas ocasiones, el corte de suministro con la siguiente puesta en marcha de la instalación. Estas circunstancias son completamente usuales en las impulsiones para riego en las cuales las paradas en el suministro son ineludibles.

Es también habitual en poblaciones en las cuales la carencia de agua hace indispensable establecer cortes de suministro.

El posterior arranque de la instalación, seguido de que la instalación se haya mantenido fuera de servicio, considera a menudo la presencia de aire atrapado en las tuberías.



1.5.2.- Problemas relacionados con la presencia de aire en las tuberías.

Entre los posibles problemas asociados a la presencia de aire en una conducción cabe señalar los siguientes:

- Reduce la sección transversal efectiva de la tubería, lo cual conlleva un descenso de la capacidad de transporte de la tubería, así como un incremento en las pérdidas de carga y la posibilidad de producirse cavitación.
- Las propiedades del fluido varían al estar compuesto por una combinación de agua y aire, la densidad del fluido disminuye, en cambio, la elasticidad del mismo se ve incrementada.
- La turbulencia del flujo se ve modificada y cambia la fricción con la pared de la tubería.
- Las burbujas de aire se trasladan debido a su flotación lo cual puede cambiar el campo de velocidades del flujo.
- En transitorios hidráulicos, la presencia de bolsas de aire de tamaño considerable interviene en las ondas de presión, acentuándolas en ocasiones, e incluso alterándolas. También se ha descubierto que los pequeños depósitos de aire pueden presentar efectos desfavorables en los transitorios de presiones.
- El amontonamiento de aire en un sistema puede producir aumentos drásticos de presión que produzcan vibraciones y deterioros estructurales pudiendo llegar a ocasionar fluctuaciones en el flujo.
- El aire puede ser un impedimento en las maniobras de filtrado. Los picos formados por fluctuaciones en la presión del aire dificultan el mantenimiento de las operaciones de filtrado. Además las burbujas de aire pueden permanecer atrapadas en los filtros de arena disminuyendo de esta forma su eficiencia.
- La presencia de aire puede reducir el rendimiento de bombas y turbinas. En el momento en que el aire se junta con el agua que sustenta una turbina se produce una caída de presión a la salida.
- En tuberías de hierro la presencia de aire estimula el desgaste y corrosión de las mismas.
- El aire puede ocasionar errores en los instrumentos de lectura o de medición tales como contadores de agua, caudalímetros y manómetros. En casos límite puede producir desgastes anormales en los elementos giratorios de los contadores, pudiendo llegar a inutilizarlos para su función medidora.



1.5.3.- Soluciones actuales frente a la problemática del aire.

Una posible medida para impedir picos extremadamente altos de presión en redes de distribución de agua como consecuencia de la compresión del aire atrapado durante los transitorios hidráulicos y las condiciones de vacío en las instalaciones es el empleo de ventosas (Carlos Alberola, 2007).

Las funciones básicas de las ventosas son, a grandes rasgos, admitir aire para eliminar las presiones negativas lo más rápido posible, expulsar grandes cantidades de aire de la instalación cuando se lleva a cabo su llenado, así como expulsar pequeñas cantidades de aire durante el comportamiento normal del sistema.

La presencia de ventosas no siempre ofrece la fiabilidad que demandan determinados suministros de agua. Tanto una mala selección, un funcionamiento incorrecto, o incluso, por la ausencia de mantenimiento, puede llevar a la instalación a situaciones más adversas de las inicialmente previstas.

Otro problema surge a la hora de modelar, con la suficiente fiabilidad, la ventosa. Por ejemplo, la escasez de documentación acerca de su comportamiento tanto en condiciones estáticas como dinámicas no garantiza la fiabilidad de los datos proporcionados como se comentará en el apartado 3.4. Sobre todo en cuanto a la caracterización dinámica de ventosas se refiere, los técnicos disponen de datos y se desconocen los tiempos de respuesta de las ventosas desde que la columna de agua llega al flotador hasta que ésta queda sellada, la capacidad de expulsión o admisión de aire en régimen permanente, el caudal de aire que puede producir un cierre anticipado de la ventosa, etc.

El cierre brusco de una ventosa tras la expulsión de aire de una instalación puede originar valores muy altos de presión. Es por ello que a menudo se utilizan una serie de mecanismos que ralentizan el cierre de la ventosa y hacen que la expulsión de aire se lleve a cabo de modo controlado. Los problemas que presenta la utilización de dichos dispositivos son el requerimiento de un espacio mayor, así como el incremento del coste de los mismos.



2. ESTADO DEL ARTE DE LAS VENTOSAS.

2.1.- Principio de Funcionamiento.

En los sistemas de distribución de agua, las ventosas realizan una o varias de las siguientes funciones:

- Descarga de enormes masas de aire a la hora de realizar el llenado de agua ya sea de un sistema parcial o de un sistema completamente en vacío.
- Admitir grandes masas de aire en la instalación en la cual se vaya a vaciar de agua a fin de evitar presiones muy bajas que puedan deteriorar la instalación.
- Descarga de aire residual que se encuentra atrapado después del llenado de agua o después de haber sido desprendido de la misma durante el funcionamiento normal en una instalación presurizada.

Por lo tanto, la función principal de las ventosas es introducir y/o expulsar aire a través de un orificio de sección A_0 , según la situación en la que se encuentre la conducción.

La expulsión de aire mediante ventosas se produce cuando se procede a llenar de agua una conducción que inicialmente se encontraba parcial o totalmente llena de aire. Algunos ejemplos son: al poner en funcionamiento una instalación, al arrancar las bombas o cuando se procede al llenado de las tuberías después de un fallo en el suministro.

Por otra parte, la admisión de aire se realiza para proteger la instalación frente al colapso debido a la caída de presiones que se encuentran por debajo de la presión atmosférica (presiones negativas). Esto ocurre a la hora de vaciar una instalación, en el transcurso de un transitorio hidráulico en instalaciones con perfiles irregulares o en zonas altas donde el consumo es muy elevado.

Según Fuertes (2001) una vez se ha observado el funcionamiento de la ventosa desde el exterior, el estudio se debe centrar en analizar qué ocurre en el interior de la ventosa. Dentro de la misma se encuentra un flotador de volumen V_f , el cual puede ascender o descender cerrando o abriendo el orificio de salida con sección A_0 . Como es lógico, el peso específico del flotador γ_f debe ser siempre inferior al del agua γ . Se llama p_t a la presión manométrica en el interior de la conducción (p_d será el valor de la presión en el caso de que exista una depresión) y V_s al volumen de flotador sumergido en agua.



El principio de funcionamiento de las ventosas puede explicarse de manera sencilla a partir del balance de fuerzas actuantes sobre el flotador, cuya resultante será la responsable de que el flotador descienda y abra la ventosa o ascienda y la cierre.

Las fuerzas actuantes sobre el flotador son las siguientes:

- El peso del flotador: $\gamma_f \nabla_f$
- El empuje del agua: $\gamma \nabla_s$
- El desequilibrio de presiones: $p_t A_0$

A las fuerzas anteriores, se puede añadir una de difícil cuantificación como es la “fuerza de adherencia” del flotador al orificio, que puede estimarse en un rango entre un 10% y un 50% del peso del flotador, en función de los materiales utilizados y su estado, superficie de contacto, frecuencia de apertura de la ventosa, etc. Evidentemente, esta fuerza adicional tan solo se manifiesta cuando la ventosa se encuentra un cierto tiempo cerrada y puede llegar a producir un agarrotamiento en la apertura de la ventosa en un momento dado. Evidentemente, este efecto reduce el valor de la presión máxima, en el mismo porcentaje que el valor de la propia “fuerza de adherencia” a la cual la ventosa es capaz de abrir.

Otra resultante que puede aparecer es la llamada “fuerza de sustentación”, que se genera por el flujo de aire al proyectar sobre la superficie del flotador cuando el aire está saliendo al exterior. Además, esta fuerza puede llegar a provocar el cierre no intencionado de la ventosa antes de haber extraído todo el aire, exponiéndose así una peligrosa bolsa de aire dentro de la tubería. Dicha fuerza depende de factores como: la velocidad al cuadrado del aire cuando éste pasa por la conducción, la sección del flotador, la morfología que presenta la ventosa, etc.

Algunos fabricantes proporcionan el caudal máximo que puede evacuar una ventosa sin provocar el cierre anticipado de ésta, es decir, la presión máxima a la que puede ser expulsado el aire, ya que el caudal de aire expulsado y la presión están relacionados para una ventosa determinada.

Como criterio de descenso del flotador y por tanto de la apertura de la ventosa se tiene que verificar que el peso del flotador sea superior a la suma del empuje del agua más la fuerza que resulta del desequilibrio de presiones. Así pues, la ventosa se abre y comienza a expulsar el aire siempre y cuando la ventosa esté cerrada y la presión en la conducción sea superior a la manométrica, verificándose:

$$\gamma_f \nabla_f > \gamma \nabla_s + p_t A_0 \quad (2.1)$$

Además, la ventosa siempre debe ser capaz de abrir cuando el interior se encuentre completamente lleno de aire, desapareciendo el empuje del agua ($\nabla_s = 0$) y verificándose para el descenso del flotador:

$$\gamma_f \nabla_f > p_t A_0 \quad (2.2)$$

Esta condición marca el límite para que se abra la ventosa, de lo contrario, el flotador nunca bajará y por tanto, la ventosa no se abrirá en ninguna ocasión como se observa en la Figura 2.1.

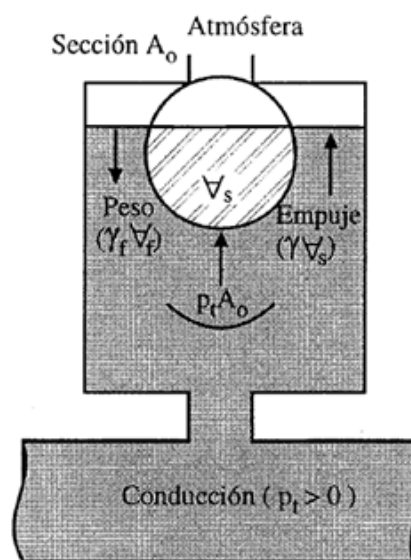


Figura 2.1. Ventosa cerrada ($p_t > 0$) (Fuentes, 2001).

Al analizar la desigualdad anterior, se observa que el peso del flotador viene restringido por la presión de trabajo p_t y por el área del orificio A_0 . Por lo tanto, cuando se desee aumentar alguna de estas dos variables se debe incrementar el peso del flotador y, por lo tanto, su volumen para que se abra la ventosa.

Esto es, se fija un determinado valor del área del orificio de expulsión A_0 , indispensable para posibilitar la expulsión del caudal de aire necesario, para una ventosa cuyo flotador tenga un peso $\gamma_f \nabla_f$ se puede calcular el valor máximo de la presión de trabajo p_t que permitiría abrir el orificio. En otras palabras, dados el área del orificio A_0 y la presión de trabajo p_t , se puede determinar el valor máximo del peso del flotador $\gamma_f \nabla_f$ y, fijado el peso específico γ_f , se calcula el volumen máximo del flotador.

En el caso de expulsar grandes cantidades de aire es imprescindible un orificio de salida de grandes dimensiones aunque si es considerablemente grande, la presión de trabajo no podrá ser muy alta, a no ser que el volumen del flotador sea enorme.

Una vez abierta la ventosa, el flotador desciende hasta quedar sobre su apoyo y el aire sale libremente al exterior a través del orificio de sección A_0 , como se observa en la Figura 2.2.

La sección de entrada a la cámara no debe limitar el flujo de aire, el cual vendrá forzado por la presión existente en la conducción y por la sección del orificio. Por lo tanto, la sección de entrada a la cámara deberá ser como mínimo igual a la del orificio.

En caso de no ser así, sería la sección mínima la que determinaría el caudal de aire expulsado por la ventosa para una presión dada.

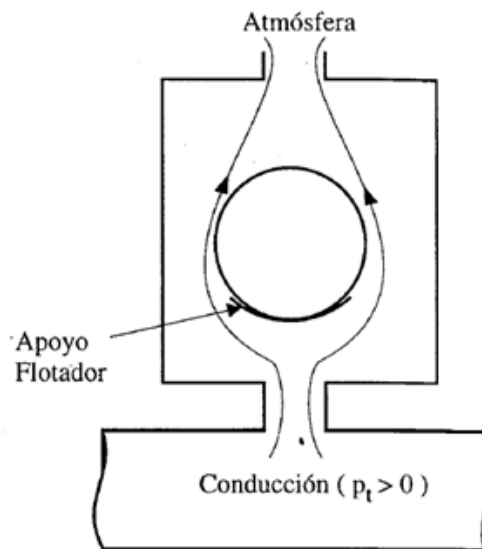


Figura 2.2. Ventosa expulsando aire ($p_t > 0$) (Fuertes, 2001).

Cuando la cámara de la ventosa inicie de nuevo el llenado de agua debido a la expulsión del aire existente en el interior de la conducción, comienza a actuar el empuje γV_s en sentido ascendente sobre el flotador, como se observa en la Figura 2.3. Cuando el empuje es superior al peso del flotador ($\gamma V_s > \gamma_f V_f$), éste asciende hasta apoyar sobre el orificio de salida y cerrar así la ventosa. Una vez cerrada, la presión existente en la tubería ayuda a mantenerla cerrada con una fuerza adicional $p_t A_0$, además del empuje del agua y de la anteriormente comentada fuerza de adherencia.

El peso del flotador se opone a todo este conjunto de fuerzas, pero sin duda es inferior a ellas dado que tan solo el empuje ya debe ser mayor que el peso, pues el flotador se

encuentra casi totalmente sumergido (puede quedar un pequeño volumen del mismo en contacto con el aire que haya podido quedar en la parte superior del cuerpo de la ventosa).

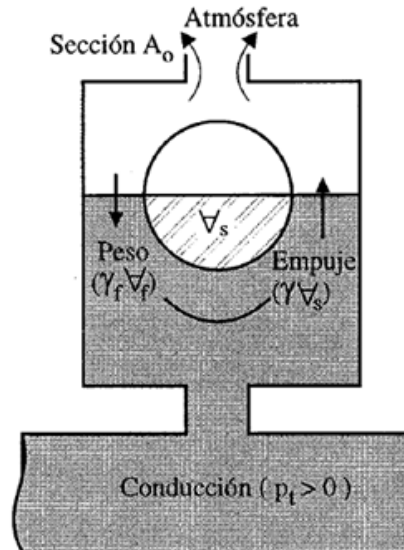


Figura 2.3. Ventosa cerrando ($p_t > 0$) (Fuertes, 2001).

Si la presión en la tubería es inferior a la atmosférica (depresión) y la ventosa se encuentra cerrada (completamente llena de agua), la apertura de la misma se producirá cuando el peso del flotador junto con la fuerza originada por la citada depresión (ambas en sentido descendente) superen el empuje del agua ($\gamma_f \nabla_f + p_d A_0 > \gamma \nabla_s$) como se observa en la Figura 2.4. Además, hay que considerar también la ya comentada fuerza de adherencia, la cual puede generar importantes problemas a la hora de abrir la ventosa.

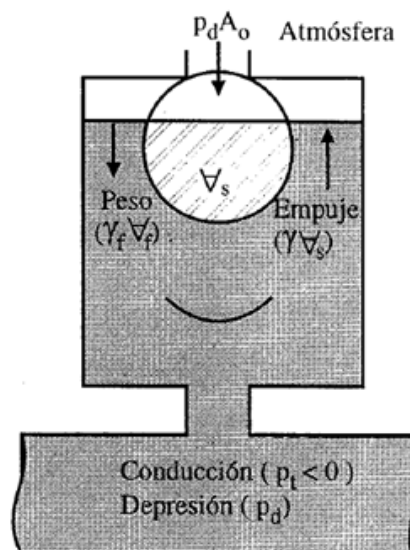


Figura 2.4. Ventosa cerrada ($p_t < 0$: depresión) (Fuertes, 2001).

En cualquier caso, una vez la ventosa ha abierto, desaparecen la fuerza originada por el desequilibrio de presiones y la fuerza de adherencia, con lo que la ventosa permanecerá abierta y admitiendo aire hasta que cambien las condiciones de funcionamiento.

Así pues, el funcionamiento de las ventosas en los procesos de llenado y vaciado de la instalación es muy sencillo (Fuertes, 2001).

En el proceso de llenado de la conducción, puesto que inicialmente la tubería está completamente llena de aire, el flotador se encuentra sobre su apoyo liberando así el orificio de salida posibilitando la expulsión del aire hasta que la columna de agua llega a la posición de la ventosa y el empuje sobre el flotador propicia que éste ascienda cerrando la ventosa.

Durante el vaciado de la instalación, se genera una depresión en la tubería al abrir las válvulas de desagüe provocando el descenso del flotador, por lo que la ventosa se abre y permite la entrada de aire al mismo tiempo que el agua va saliendo de la misma.

2.2.- Clasificación de las ventosas.

El proyectista de una instalación debe seleccionar el tipo de ventosa más adecuado a cada situación en concreto atendiendo a la función que se desempeñe, a su tamaño, etc.

De forma general, la estructura común de una ventosa se basa en un cuerpo en forma de copa, cuya parte superior posee una tapa con un orificio y en la parte inferior una brida que conecta con la tubería. En el interior de la misma, se encuentra el flotador cuya morfología suele ser esférica o cilíndrica dependiendo del fabricante y de su función a desempeñar, el cual obstruye el orificio de la tapa cerrando así la ventosa.

Como afirma Fuertes (2001) las ventosas se pueden clasificar dentro de dos grandes tipos, las ventosas de gran orificio y las de pequeño orificio o purgadores.

Por una parte, las ventosas de gran orificio (diámetro $> 25 \text{ mm}$) son las encargadas de permitir la entrada o salida de aire durante el vaciado o llenado de la conducción. Por otra parte, las ventosas de pequeño orificio o purgadores son las encargadas de expulsar al exterior el aire durante el funcionamiento normal del sistema. En la Figura 2.5 se observa un ejemplo gráfico de cada una de ellas.

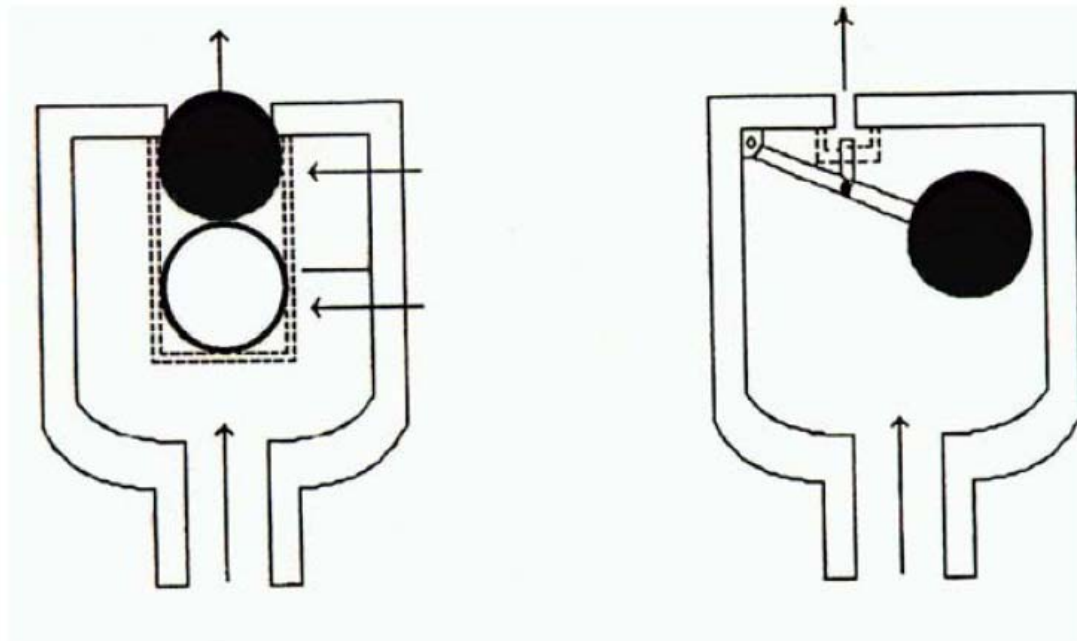


Figura 2.5. Ventosas de gran y pequeño orificio (Fuertes, 2001).

Además, para poder realizar el mantenimiento de la ventosa en óptimas condiciones, todas las válvulas de aire sean del tipo que sean, deben colocarse con una llave de aislamiento para prevenir problemas como puede ser el agarrotamiento del flotador, por ejemplo. Asimismo, en la selección de la ventosa, se debe tener en cuenta la presión máxima que debe de soportar.

En los dos subapartados siguientes se desarrollan con más profundidad estos dos tipos de ventosa.

2.2.1.- Ventosas de gran orificio.

Las ventosas de gran orificio (Figura 2.6), también llamadas de efecto cinético, tienen como característica común que los orificios de entrada y salida son de un tamaño grande donde el orificio de salida es, en la mayoría de los casos, del mismo diámetro que la conexión a la tubería para permitir el paso de grandes cantidades de aire. Fundamentalmente, se utilizan durante el llenado y vaciado de la conducción.

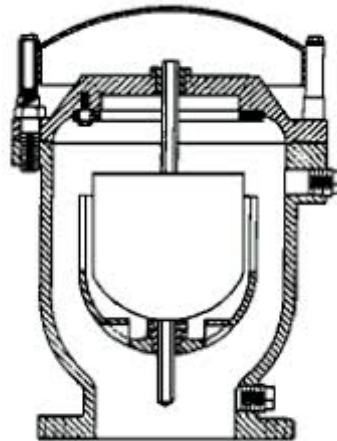


Figura 2.6. Ventosa de gran orificio (Fuentes, 2001).

En el caso de necesitar de una ventosa de un tamaño mayor, se pueden colocar varias ventosas de este tipo en paralelo cumpliendo así, las mismas funciones que una única ventosa de dimensiones mucho más grandes. Esta situación puede llegar a ser muy interesante para la seguridad de la instalación, ya que, el agarrotamiento o fallo de una de ellas no supone perder la capacidad total de admisión y/o expulsión.

Obviamente, el flotador del que dispone la ventosa posee un menor peso específico que el agua para poder realizar la función de descender por gravedad en el interior del cuerpo principal cuando la tubería presenta presión negativa o cuando la ventosa se llena de aire, siempre que se verifique el balance de fuerzas visto en el apartado 2.1.

En cambio, cuando se procede al llenado de la ventosa con agua, el flotador asciende y tapona el orificio de salida. Una vez la ventosa se ha cerrado y la conducción se encuentra en las condiciones adecuadas de presión (instalación presurizada), hasta que no se vuelva a producir una caída de presión, la válvula no se vuelve a abrir. Así pues, las ventosas únicamente son válidas como elemento de expulsión de aire cuando se produce el llenado de la instalación.

Durante el funcionamiento normal del sistema, es decir, cuando la instalación se encuentra presurizada, la ventosa no se puede abrir debido al gran tamaño del orificio y de las dimensiones del flotador. Para poder extraer grandes masas de aire se debería tener un flotador de enormes dimensiones, ya que, la fuerza $p_t A_0$ es muy elevada y no es posible de otra forma.



Desde el punto de vista contrario, se puede definir un diámetro máximo del flotador y del orificio de salida, que junto al peso específico del flotador, se define la presión máxima a la cual la ventosa puede abrir.

Es por este tipo de situaciones, por las que se aconseja, además de la ventosa de gran orificio, colocar algún tipo de dispositivo capaz de evacuar el aire acumulado cuando la instalación se encuentra presurizada. Además, como la válvula de aire de gran orificio no es de validez para la expulsión del aire durante el funcionamiento normal de la instalación, se debe recurrir a purgadores o ventosas de pequeño orificio para cumplir con esta misión.

Como se comenta en el apartado 2.3 es de vital importancia seleccionar de manera adecuada el tamaño de la ventosa a fin de evitar problemas graves de funcionamiento. Generalmente, se pretende una capacidad de admisión lo suficientemente elevada para limitar la caída de presión y una controlada capacidad de expulsión, ya que, en el caso de ser ésta última muy elevada, la velocidad de expulsión aumenta; y cuando el flotador cierre la ventosa, el flujo se detiene bruscamente generando el fenómeno indeseado del golpe de ariete.

Por lo tanto, controlando la expulsión del aire se comprueba que la velocidad de llenado de la tubería es la correcta, actuando el aire existente en la conducción como colchón. Para reducir la capacidad de expulsión respecto de la de admisión, se puede proceder a la adición de una serie de dispositivos adicionales a la ventosa o bien instalando ventosas capaces de ralentizar la velocidad de expulsión cuando el flotador se disponga a cerrar el orificio.

En definitiva, el caudal que será capaz de trasegar la ventosa es función de la forma de la ventosa, del tamaño del orificio y de la diferencia de presiones.

2.2.2.- Ventosas de pequeño orificio o purgadores.

En las ventosas de pequeño orificio a las que también se les llaman automáticas o purgadores (Figura 2.7), tienen unas dimensiones muy pequeñas, para poder abrir cuando el sistema está presurizado, como no pueden hacer las válvulas de gran orificio. Es de vital importancia no confundir el diámetro del orificio de salida, el cual es el verdaderamente importante en lo referido a la cantidad de aire expulsado por el purgador, con el diámetro de la unión a la tubería (normalmente $\frac{1}{2}$ " como mínimo) ni tampoco con el diámetro del conducto conectado a la salida de la ventosa. En definitiva, la función principal de este tipo de ventosas radica en expulsar las pequeñas cantidades de aire acumuladas en las conducciones durante el funcionamiento normal de la instalación.

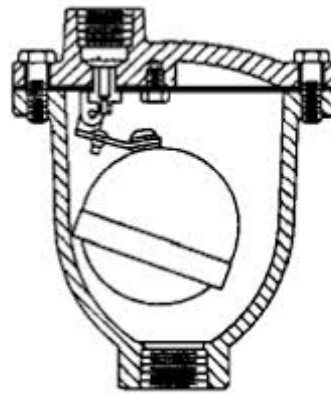


Figura 2.7. Ventosa de pequeño orificio o purgador (Fuertes, 2001).

Si se desea utilizar flotadores de un tamaño menor aumentando la fuerza generada por el peso del flotador, existen algunos tipos de purgadores que disponen de una palanca que une el flotador con el elemento que cierra el orificio de salida (Figura 2.7).

El empuje que realiza el agua sobre el flotador va disminuyendo a medida que el aire se acumula en el purgador. Cuando la cantidad de aire introducido en la ventosa es la suficiente, el peso del flotador es superior al peso del agua y al desequilibrio de presiones:

$$\gamma_f V_f > \gamma V_s + p_t A_0 \quad (2.3)$$

Así pues la ventosa se abre y comienza a expulsar el aire a la presión de trabajo.

En el momento en que el aire sale al exterior, el purgador se vuelve a llenar con agua y cuando el empuje del agua supera al peso del flotador se produce el cierre del purgador.

$$\gamma V_s > \gamma_f V_f \quad (2.4)$$

Si se procura que el purgador se abra a la presión de trabajo y que el flotador no sea excesivamente grande, el orificio de salida deberá ser muy pequeño.

Fuertes (2001) comenta que un orificio de dimensiones tan pequeñas restringe considerablemente la cantidad de aire que se va expulsar por la ventosa. La utilización de la palanca puede incrementar la fuerza del flotador en un rango de 4 y 6 veces en condiciones normales, así como la sección mínima del orificio se incrementa en la misma proporción, si bien es posible trabajar con palancas de forma combinada para conseguir valores de fuerza mucho mayores.



En cambio, con una ventosa de menores dimensiones que resulta más barata y manejable, dotada de este sistema de palanca, se pueden llegar a lograr prestaciones iguales a las de una ventosa mucho mayor.

A medida que aumentemos la presión de trabajo p_t , el tamaño del orificio debe ser menor. Otra alternativa se encuentra en colocar un flotador de grandes dimensiones, ya que, el peso específico del flotador está limitado por el peso específico del agua en estas condiciones:

$$\gamma_f < \gamma \quad (2.5)$$

En definitiva, las condiciones necesarios para escoger el purgador más adecuado son la presión de trabajo p_t y la cantidad de aire a expulsar. Una vez estos parámetros son fijados, se dimensiona el orificio de salida y se selecciona la ventosa más adecuada.

Otra clasificación muy común de ventosas es según el número de funciones a realizar dentro de la instalación. Entre las posibles funciones están:

- La expulsión del aire durante el llenado de la tubería.
- La aireación, admisión o aducción del aire durante el vaciado.
- La expulsión del aire, bajo presión, cuando el agua en la tubería está circulando.

2.2.3.- Ventosas monofuncionales.

Este tipo de ventosas (Figura 2.8) son las que únicamente realizan una de las tres funciones descritas anteriormente. Los purgadores y las ventosas unidireccionales se encuentran en este grupo.

2.2.3.1.-Ventosas unidireccionales.

Son aquellas ventosas que únicamente permiten el paso del aire en una sola dirección. Son muy similares a las ventosas de gran orificio ya comentadas, siendo una variante de éstas. Existen básicamente dos tipos: ventosas de vacío y abductores (Fuertes, 2001).

Por una parte, las ventosas de vacío se utilizan en aquellas situaciones en que debe existir una presión negativa en la tubería, como por ejemplo, en la aspiración de una bomba centrífuga de eje horizontal o en el punto más elevado de un sifón en los que para su cebado, el aire debe ser expulsado. Su construcción es muy parecida a las de gran orificio, sólo que en este caso el flotador obstruye el orificio de entrada desde la conducción en el momento en que la ventosa se vacía, evitando que el aire se introduzca en la instalación.

En cambio, el funcionamiento de los abductores es el contrario al de las ventosas de vacío. Éstos son capaces de admitir grandes cantidades de aire pero imposibilitan su salida, impidiendo así los transitorios que pueden producirse cuando se provoca una rápida extracción de aire y un cierre violento de la ventosa. También tiene la misma estructura que las ventosas de gran orificio, en cambio, aquí un muelle fuerza al flotador a permanecer en posición cerrada. Se utiliza para prevenir el fenómeno del golpe de ariete admitiendo aire a lo largo de la fase de presiones negativas pero impidiendo su expulsión. Otra función de este tipo de ventosas es expulsar una cierta cantidad de aire cuando en algún punto de la instalación se precisa para evitar un golpe de ariete indeseado y a la vez es necesario admitir una cantidad de aire mayor para evitar depresiones pronunciadas durante el vaciado. En esta situación puede colocarse un abductor junto a la ventosa principal para que éste sea el encargado de admitir el exceso de aire necesario.



Figura 2.8. Ventosa monofuncional.

2.2.4.- Ventosas bifuncionales.

Este tipo de ventosas (Figura 2.9) están provistas de un orificio de gran tamaño el cual es capaz de realizar dos funciones, evacuar grandes cantidades de aire durante el proceso de llenado de la conducción y admitir aire, también en grandes cantidades, durante el proceso de vaciado de la misma o cuando se produce cualquier fenómeno capaz de generar una depresión en el sistema. En cambio, no realizan la función de expulsar el aire cuando la instalación se encuentra presurizada.



Figura 2.9. Ventosa bifuncional.

2.2.5.- Ventosas trifuncionales.

Las ventosas trifuncionales son las que desempeñan las tres funciones antes mencionadas. Este tipo de ventosas pueden encontrarse con un único cuerpo o con dos cuerpos conectados entre sí (combinación de una de gran orificio y un purgador).

Generalmente se fabrican en un solo cuerpo (Figura 2.10), es decir, el flotador grande y el flotador pequeño del purgador se encuentran alojados en un mismo cuerpo compacto.



Figura 2.10. Ventosa trifuncional con un único cuerpo.

También es posible encontrar ventosas trifuncionales en las cuales los dos flotadores se encuentran en cuerpos separados (Figura 2.11). Este tipo de ventosas son las llamadas de doble cuerpo.



Figura 2.11. Ventosa trifuncional con doble cuerpo.

Son una combinación de dos de las ventosas anteriormente expuestas, esto es, constan de una ventosa bifuncional y de un purgador. Por lo tanto, dichas ventosas pueden expulsar pequeñas o grandes cantidades de aire durante el funcionamiento normal y el llenado de la instalación respectivamente, al mismo tiempo que son capaces de admitir grandes cantidades de aire en los procesos de vaciado de la instalación.

2.3.- Dimensionado de ventosas.

Como explica Mateos (2011), para el dimensionado de una ventosa hay que tener en cuenta las siguientes tres condiciones:

- Presión máxima deseable al llenar la tubería.
- Presión mínima deseable al vaciar la tubería.
- Presión de trabajo para calcular el purgador y las partes internas de las ventosas bifuncionales.

El dimensionado de las ventosas resulta de extremada facilidad. Se fija una presión interna en una tubería y se mide el aire que sale por la ventosa que se esté evaluando.



Posteriormente, se va cambiando la presión y se van obteniendo puntos que nos dan las cantidades de aire que se evacúan para cada presión en la conducción.

Se realiza el mismo proceso para los purgadores, es decir, se va cambiando la presión y se va midiendo el aire que se evacúa por el purgador que se esté ensayando.

Con los datos del caudal de evacuación de aire a través de una ventosa, para unos determinados valores de presión, se puede decidir técnicamente cual sería la ventosa que se encuentra en óptimas condiciones de llenado sin la necesidad de verse sobredimensionada.

Cabe tener en cuenta que el dimensionamiento de una ventosa se garantiza como criterio válido para cada modelo de la misma y no es extrapolable para cualquier ventosa del mercado.

Además, hay que tener en cuenta que el diámetro del orificio de gran tamaño de una ventosa no se debe confundir con el diámetro nominal de la misma. El diámetro nominal de la ventosa hace referencia al diámetro de entrada que conecta la ventosa con la tubería mientras que el orificio de gran tamaño condiciona la forma en la que el aire entra en la instalación o escapa directamente a la atmósfera.

Por tanto, puede ser que dos ventosas con el mismo diámetro nominal no presenten un mismo comportamiento actuando bajo las mismas condiciones.

2.4.- Localización de las ventosas.

La situación exacta de los diferentes tipos de ventosas es una tarea que requiere de gran experiencia. En primer lugar, hay que saber qué hay que colocar y posteriormente dónde colocarlo.

Los lugares donde es necesario analizar la posible colocación de las ventosas son:

- En puntos altos de la conducción.
- En gran parte de los cambios de pendiente de la tubería.
- En lugares donde se produce un cambio de la sección de las tuberías.
- Después de las válvulas reductoras de presiones, las anti-inundaciones, las de retención en bombeos, las mantenedoras y las válvulas de retención en medio de una conducción.
- Después de un colador.
- En los tramos horizontales donde no hace falta forzar puntos altos.

- En los tramos de bajada.
- En tramos de subida con poca pendiente.
- En algunas pendientes con pendiente fuerte.
- En captadores especiales del aire.
- En la parte alta de una bomba centrífuga.
- En la superficie de la toma de un pozo profundo.
- A las proximidades de aparatos de medida.

El perfil idóneo para el manejo del aire es el perfil irregular, con puntos altos y bajos bien definidos, como se observa en la Figura 2.12. Es conveniente que las pendientes ascendentes no sean menores del 0,2% y las descendentes no sean inferiores al 0,4%. Así el aire avanza hasta los puntos elevados y permanezca allí, desde donde podrá evacuarse mediante el uso de purgadores.

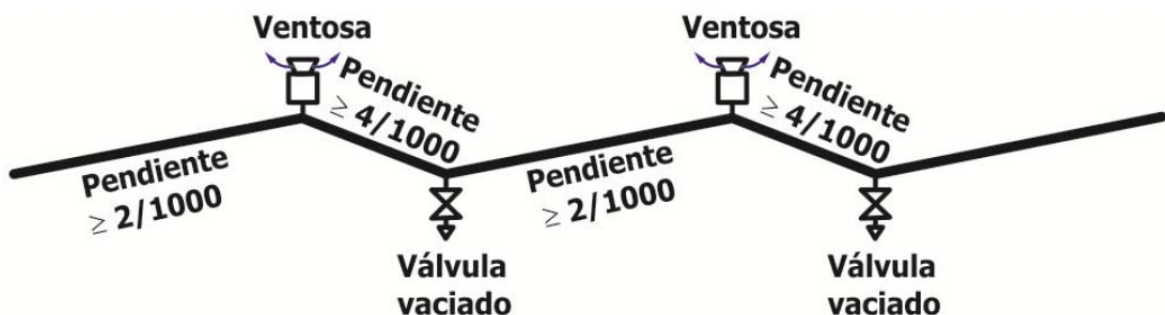


Figura 2.12. Pendientes mínimas recomendadas para la mejora del uso de las ventosas (García Mares, 2012).

Colocar ventosas en todos los puntos altos es condición necesaria pero no suficiente, ya que, como se ha enumerado antes existen otras zonas críticas con la necesidad de extraer el aire acumulado en las conducciones. En estos puntos elevados del perfil irregular de la tubería se debe instalar una o varias ventosas de admisión y expulsión de aire en paralelo, mientras que en los puntos bajos deben colocarse las válvulas de vaciado del sistema (válvulas de desagüe). En ocasiones se presentan perfiles donde no se encuentran bien definidos tanto los puntos altos como los bajos e incluso incluyen tramos inclinados u horizontales rectilíneos de la conducción. En estos casos deberá colocarse ventosas más o menos equidistantes, separadas entre sí del orden de 500 y 1000 m donde a mayor pendiente las distancias entre ventosas pueden ser mayores.

Estas pautas son muy básicas y no consideran, por ejemplo, la colocación de ventosas de admisión y expulsión en aquellos puntos en los cuales puede encontrarse acumulación de



aire durante el llenado de la instalación debido a la presencia de válvulas u otros elementos colocados en la conducción.

Deben instalarse ventosas trifuncionales o purgadores en cambios de pendiente de la tubería, no únicamente respecto al eje horizontal sino también respecto al gradiente hidráulico de la conducción, así como en aquellas zonas donde la tubería se eleve por encima del nivel del suelo o para evitar un accidente geográfico.

También es recomendable la instalación de ventosas de gran orificio a la salida de los grupos de bombeo y antes de la válvula de retención, con el fin de evacuar el aire acumulado en las bombas a lo largo del período de tiempo en que la instalación está parada, haciendo énfasis en instalaciones de pozo profundo.

A fin de impedir daños mecánicos y evitar la influencia negativa del aire sobre la precisión de los instrumentos de medida tales como caudalímetros, manómetros, etc. es recomendable colocar una ventosa trifuncional antes del aparato.

Se considera necesario instalar purgadores después de válvulas reductoras y en los estrechamientos de la tubería para evacuar el aire liberado al disminuir la presión.

Cuando se reduce la presión en la instalación, una cierta cantidad del aire disuelto en el agua puede liberarse formando pequeñas burbujas que, por acumulación, pueden llegar a formar bolsas de aire de gran tamaño.

Se recomienda instalar un purgador antes o después del cono reductor y en la tubería de mayor tamaño en los cambios de sección de la conducción, para eliminar las pequeñas concentraciones formadas de aire disuelto en el agua debido a las variaciones de presiones producidas. Estos cambios de sección se traducen en una pérdida de carga adicional que provoca un menor caudal de tránsito a lo largo de la instalación.

A fin de evitar el fenómeno de la cavitación o para evitar las depresiones formadas por golpes de ariete se deben instalar ventosas en aquellas zonas críticas donde se pueden producir estos efectos adversos.

En resumen, en todas aquellas zonas de la instalación que sean susceptibles de acumular aire deben instalarse ventosas para su eliminación impidiendo así una fuente mayor de problemas.



2.5.- Conclusiones.

En los apartados anteriores se han analizados con detalle las ventosas (o válvulas de aire), siendo éstas unos elementos que permiten la entrada y salida de aire en las conducciones evitando así los graves problemas que ocasiona la presencia de bolsas de aire atrapado en la instalación.

Como principales conclusiones de todo lo visto en este capítulo hay que resaltar las siguientes:

- La presencia de aire en las conducciones es, en muchos casos, inevitable. El aire se introduce en las tuberías por motivos muy diversos y es la causa de numerosos problemas. Una buena solución para evitar los problemas que genera la presencia de bolsas de aire atrapado es la utilización de ventosas, las cuales permiten que el aire almacenado pueda escapar libremente a la atmósfera.
- En la gran mayoría de las ventosas, superado un cierto caudal de aire, se produce el cierre del flotador antes de la llegada de la columna de agua, es decir, cuando todavía no ha salido la totalidad del aire. Este hecho se produce porque la velocidad de expulsión del aire genera una “fuerza de sustentación” sobre el flotador y, a partir de una cierta velocidad, esta fuerza es capaz de levantar el flotador cerrando así la ventosa (lo que se conoce como “cierre dinámico”) y dejando una peligrosa bolsa de aire en el interior de la tubería que puede originar sobrepresiones importantes. El fabricante no suele dar datos al respecto y hay que tener presente que la presión diferencial a la que se alcanza la velocidad que provoca el cierre dinámico es, en ocasiones, muy pequeña. Una presión diferencial pequeña significa que el cierre dinámico de la ventosa se produce con un caudal de aire expulsado muy pequeño.
- El diámetro nominal de la ventosa hace referencia al diámetro de conexión de la misma. Sin embargo, la dimensión realmente significativa es la sección mínima del orificio por el que entra o sale el aire. Es esta sección, junto con las características constructivas propias de cada ventosa, la que determina su curva característica. Como consecuencia de ello, dos ventosas con idéntico diámetro nominal pueden tener curvas características muy diferentes.



Como conclusión final puede decirse que la presencia de ventosas es una solución muy extendida y aceptable para resolver los problemas derivados de la presencia de aire atrapado, pero no garantiza completamente la seguridad de la instalación. Una selección incorrecta, un funcionamiento defectuoso o un emplazamiento que no permita la salida de toda la masa de aire atrapado, pueden ser el origen de serios problemas que se suponían resueltos precisamente con la colocación de las ventosas.

3. CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DE LAS VENTOSAS.

3.1.- Introducción.

Para la correcta selección y modelado de las ventosas necesarias en un sistema es preciso disponer de una adecuada caracterización de las mismas. Existen diferentes modelos de caracterización del comportamiento de las ventosas, todas ellas tomando como punto de partida el comportamiento del aire como fluido compresible en su interior. A partir de dicho comportamiento se pueden realizar diferentes hipótesis sobre el comportamiento del aire, obteniéndose expresiones diferentes.

Independientemente de la expresión matemática empleada en la caracterización de la ventosa, es necesario determinar siempre los parámetros característicos de la ventosa. Dichos parámetros son diferentes dependiendo de la formulación empleada para determinar el comportamiento de la ventosa. Es muy común hacer una analogía entre el flujo de aire que pasa a través de una ventosa y el flujo isoentrópico en toberas (Iglesias y otros, 2008) para la modelación del comportamiento de las ventosas.

3.2.- Flujo isoentrópico en toberas.

En la gran mayoría de los casos, se suele considerar adiabático el flujo de cualquier gas que pasa a través de una tobera (Figura 3.1), ya que, podemos despreciar la pequeña transferencia de calor producida a lo largo de su trayectoria, puesto que el tiempo que pasa a través de ésta es muy pequeño.

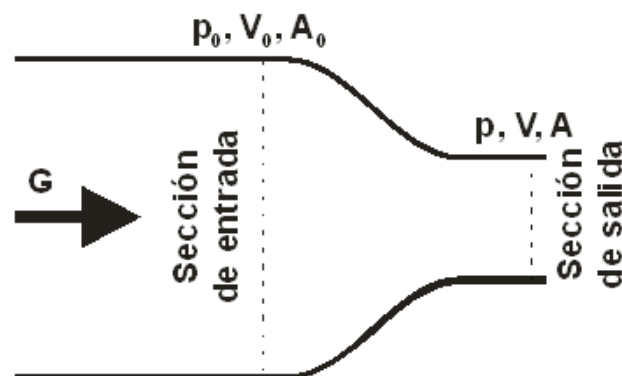


Figura 3.1. Esquema de una tobera convergente (Iglesias y otros, 2013).



Se considera el aire como gas ideal, verificando la ecuación de los gases perfectos:

$$p^* = \rho RT \quad (3.1)$$

Siendo p^* la presión absoluta, ρ la densidad del gas, $R = 287 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}$ la constante del aire y T la temperatura absoluta.

Llamaremos p_0^* , v_0 , T_0 y ρ_0 a las condiciones de presión absoluta, velocidad, temperatura absoluta y densidad a la entrada de la tobera con sección A_0 , respectivamente y p^* , v , T y ρ a las condiciones en la boquilla.

Se considera una expansión isoentrópica, por lo tanto, se puede relacionar las variables justo antes de la boquilla con las de la propia boquilla mediante las siguientes expresiones:

$$\frac{p_0^*}{\rho_0^k} = \frac{p^*}{\rho^k} \quad (3.2)$$

$$\frac{T_0}{(p_0^*)^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{T}{(p^*)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (3.3)$$

$$\frac{T_0}{\rho_0^{k-1}} = \frac{T}{\rho^{k-1}} \quad (3.4)$$

Siendo $k = 1.4$, el exponente adiabático del aire.

Llamaremos c a la velocidad del sonido en el aire que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$c = \sqrt{kRT} \quad (3.5)$$

Se hará dos clasificaciones del flujo. Cuando $v < c$ el flujo será subsónico y cuando $v > c$ el flujo será supersónico. En el caso de que $v = c$ se dominará flujo sónico.

En primer lugar, se fija la presión a la salida p_1^* y se va variando los valores de la presión en el interior de la tobera p_0^* , se puede encontrar diferentes situaciones dependiendo de los valores que vayan adoptando las variables mencionadas.

Si $p_0^* = p_1^*$, la diferencia de presiones será cero, por lo que no existirá ningún flujo.



Si $p_0^* > p_1^*$ en la boquilla existirá un flujo subsónico donde la presión continuará siendo $p^* = p_1^*$, donde la velocidad v vendrá definida por la siguiente ecuación:

$$v = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT \left(\left(\frac{p^*}{p_0^*} \right)^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right)} \quad (3.6)$$

Si se continúa aumentando la presión $p_0^* v = c$, cuya expresión viene definida al igualar las ecuaciones (3.5) y (3.6).

$$\sqrt{kRT} = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT \left(\left(\frac{p^*}{p_0^*} \right)^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right)} \quad (3.7)$$

De donde se obtiene la relación siguiente:

$$\frac{p^*}{p_0^*} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0.528 \quad \leftrightarrow \quad \frac{p_0^*}{p^*} = 1.893 \quad (3.8)$$

Una tobera convergente no puede presentar flujo supersónico, por lo tanto, para valores de p_0^* la relación anterior se mantendrá constante existiendo flujo sónico ($v = c$) en la boquilla. Si se mantiene la relación de presiones pero se sigue aumentando p_0^* , obviamente también lo hará la p^* produciéndose así lo que se denomina “bloqueo sónico”, es decir, $p^* > p_1^*$ puesto que p^* es directamente proporcional a p_0^* y si ésta aumenta también lo hará p^* . Por esto, el flujo sufrirá una expansión desde la boquilla p^* hasta el exterior p_1^* verificándose:

$$p^* = 0.528 \cdot p_0^* > p_1^* \quad (3.9)$$

El caudal másico de salida de la boquilla es:

$$\frac{dm}{dt} = \rho_0 v_0 A_0 = \rho v A \quad (3.10)$$

Si se combina la ecuación del caudal másico con la ecuación (3.2) se obtendrá la expresión de la velocidad a la entrada v_0 .

$$v_0 = \left(\frac{p^*}{p_0^*} \right)^{\frac{1}{k}} \frac{A}{A_0} v \quad (3.11)$$

En el caso de que se suponga constante una temperatura T_0 , el aumento de la presión p_0^* también provocará un aumento de la densidad ρ_0 . Por lo tanto, cuando nos encontremos en la fase subsónica el caudal volumétrico aumentará de la misma forma que lo haga el másico.

En el momento en el que se alcance las condiciones sónicas ($p^*/p_0^* = 0.528$), como la velocidad v queda fijada debido a que la temperatura T_0 es constante, el caudal volumétrico en la boquilla se mantendrá constante ($Q = v \cdot A$), así:

$$v = \sqrt{kRT} = \sqrt{kR} \sqrt{\left(\frac{p^*}{p_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} T_0} = \sqrt{kR} \sqrt{0.833 \cdot T_0} = cte \quad (3.12)$$

La ecuación (3.9) para flujo sónico en la boquilla quedará:

$$v_0 = 0.634 \frac{A}{A_0} v \quad (3.13)$$

Como la velocidad en la boquilla de la tobera $v = cte$ (3.12), también lo será la velocidad a la entrada de la misma v_0 . A pesar de ello, el caudal másico seguirá aumentando siempre que también lo haga la presión p_0^* y, por tanto, la densidad en el interior ρ_0 .

Ya se ha fijado la presión a la salida p_1^* variando la presión en el interior de la tobera p_0^* . Ahora se realizará de manera inversa, es decir, se fijan las condiciones en la sección de entrada (p_0^*, ρ_0 y T_0) y se va variando la presión a la salida de la boquilla.

Si $p_1^* = p_0^*$, la diferencia de presiones será cero, por lo que no existirá ningún flujo.

Si disminuimos p_1^* aumenta la diferencia ($p_0^* - p_1^*$), así como también lo hará el caudal. Hay que tener en cuenta que siempre que no se alcancen las condiciones sónicas, se verificará $p^* = p_1^*$.



Sin embargo, para valores menores o iguales de p_1^* tal que $p_0^* = 1.893 \cdot p_1^*$ nos encontraremos en condiciones sónicas. En estas situaciones, la presión en la boquilla p^* será:

$$p^* = 0.528 \cdot p_1^* = cte. \quad (3.14)$$

En cuanto a los caudales, en la zona donde el flujo es subsónico, tanto el caudal volumétrico como el másico aumentan cuando disminuye la presión exterior p_1^* , ya que, aumenta la diferencia de presiones $p_0^* - p_1^*$.

Cuando el flujo es sónico, es decir, a partir de valores de $p_1^* < 0.528 \cdot p_0^*$. Se puede deducir que la velocidad $v = cte$ (3.12), por lo tanto, también lo será el caudal volumétrico, así la presión en la boquilla es:

$$p^* = 0.528 \cdot p_0^* = cte \quad (3.15)$$

El caudal másico también se mantendrá constante puesto que de la expresión (3.10) se deduce que $v_0 = cte$ así como también lo es la densidad ($\rho_0 = cte$).

El comportamiento del flujo a lo largo de la tobera y, por analogía en ventosas, puede resumirse en la Tabla 3.1:

| | | |
|----------------------|----------------------------|--|
| | Flujo subsónico | Q aumenta cuando p_0^* aumenta |
| Presión a la salida | $(p_0^* < 1.893 p_1^*)$ | dm/dt aumenta cuando p_0^* aumenta |
| $p_1^* = cte$ | Flujo sónico | Q se mantiene constante |
| | $(p_0^* \geq 1.893 p_1^*)$ | dm/dt aumenta cuando p_0^* aumenta |
| | Flujo subsónico | Q aumenta cuando p_1^* disminuye |
| Presión a la entrada | $(p_1^* > 0.528 p_0^*)$ | dm/dt aumenta cuando p_1^* disminuye |
| $p_0^* = cte$ | Flujo sónico | Q se mantiene constante |
| | $(p_1^* \leq 0.528 p_0^*)$ | dm/dt se mantiene constante |

Tabla 3.1. Comportamiento del flujo en una tobera.

3.3.- Analogía entre el flujo en toberas y el flujo en ventosas.

Ya se tienen las expresiones que permiten definir las características del flujo circulante por una tobera convergente. Ahora es cuando se realizará la analogía entre el flujo en toberas y el flujo en ventosas (Wylie y Streeter, 1982), tanto para la fase de admisión como para la de expulsión.

3.3.1.- Admisión de aire ($p_t^* < p_{atm}^*$).

Durante la fase de admisión, se debe suponer las siguientes condiciones para poder realizar la analogía.

$$p_0^* = p_{atm}^* \quad \rho_0 = \rho_{atm} \quad T_0 = T_{atm} \quad p_1^* = p_t^* \quad (3.16)$$

Siendo las variables con subíndice “*atm*” referidas a las condiciones atmosféricas mientras que las que tienen subíndice “*t*” se asignan a las variables referidas al interior de la tubería.

En este apartado, el objeto de estudio es la presión en la tubería, por lo que ésta podrá variar. Así pues, nos encontramos en la situación en la que cuando la presión aguas arriba se mantiene constante, entonces $p_0^* = p_{atm}^* = cte$.

Si $p_t^* > 0.528 \cdot p_{atm}^*$, nos encontramos ante un flujo subsónico donde el caudal, ya sea el volumétrico como el másico, aumenta a medida que la presión en la tubería p_t^* disminuye.

Si $p_t^* \leq 0.528 \cdot p_{atm}^*$, los caudales (volumétrico y másico) se mantendrán constantes puesto que la ventosa ya no admite más aire, por lo tanto, el flujo se bloqueará.

Si mantenemos un valor constante de $p_{atm}^* = 1.013 \text{ bar}$ y llamando $\nabla p = p_{atm}^* - p_t^*$ a la diferencia de presiones entre el exterior y el interior, nos encontramos en los siguientes límites:

| | | |
|-----------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Flujo subsónico | $p_t^* > 0.535 \text{ bar}$ | $(\Delta p < 0.48 \text{ bar})$ |
| Flujo sónico | $p_t^* \leq 0.535 \text{ bar}$ | $(\Delta p \geq 0.48 \text{ bar})$ |

Tabla 3.2. Fase de admisión en una ventosa.

Si llamamos A_{adm} a la sección de admisión de la ventosa y C_{adm} al coeficiente de admisión característico de la misma, se determinará el caudal másico que admite la ventosa con $C_{adm} < 1$, mediante las siguientes expresiones:

Cuando $p_{atm}^* > p_t^* > 0.528 \cdot p_{atm}^*$, entonces:

$$\frac{dm}{dt} = C_{adm} A_{adm} \sqrt{7 p_{atm}^* \rho_{atm} \left(\left(\frac{p_t^*}{p_{atm}^*} \right)^{1.4286} - \left(\frac{p_t^*}{p_{atm}^*} \right)^{1.714} \right)} \quad (3.17)$$

Cuando $p_t^* \leq 0.528 \cdot p_{atm}^*$, entonces:

$$\frac{dm}{dt} = C_{adm} A_{adm} \frac{0.686}{\sqrt{RT_{atm}}} p_{atm}^* = cte \quad (3.18)$$

3.3.2.- Expulsión de aire ($p_t^* > p_{atm}^*$).

Durante la fase de expulsión, se debe suponer las siguientes condiciones para poder realizar la analogía.

$$p_0^* = p_t^* \quad \rho_0 = \rho_t \quad T_0 = T_t \quad p_1^* = p_{atm}^* \quad (3.19)$$

Como ocurría en la fase de admisión, las variables con subíndice “*atm*” se refieren a las condiciones atmosféricas mientras que las que tienen subíndice “*t*” se asignan a las variables referidas al interior de la tubería.

Así pues, nos encontramos en la situación en la que cuando la presión aguas abajo se mantiene constante, entonces $p_1^* = p_{atm}^* = cte$, teniendo la opción de variar la presión aguas arriba, es decir, la presión en el interior de la tubería ($p_0^* = p_t^*$).

Si $p_t^* < 1.893 \cdot p_{atm}^*$, nos encontramos ante un flujo subsónico donde el caudal, ya sea el volumétrico como el másico, aumenta a medida que la presión en la tubería p_t^* aumenta.

Si $p_t^* \geq 1.893 \cdot p_{atm}^*$, el flujo pasa a ser sónico. En esta situación, el caudal volumétrico será constante siempre que la temperatura en la tubería sea también constante, y esto es así porque se adopta como hipótesis de partida. No ocurre lo mismo con el caudal másico que se incrementa cuando aumenta tanto la presión en la tubería p_t^* como la densidad ρ_t .

Si se mantiene un valor constante de $p_{atm}^* = 1.013 \text{ bar}$ y llamando $\nabla p = p_t^* - p_{atm}^*$ a la diferencia de presiones entre el interior y el exterior, nos encontramos en los siguientes límites:

| | | |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Flujo subsónico | $p_t^* < 1.918 \text{ bar}$ | $(\Delta p < 0.9 \text{ bar})$ |
| Flujo sónico | $p_t^* \geq 1.918 \text{ bar}$ | $(\Delta p \geq 0.9 \text{ bar})$ |

Tabla 3.3. Fase de expulsión en una ventosa.

Siendo A_{exp} la sección de expulsión de la ventosa y C_{exp} al coeficiente de expulsión característico de la misma, se determinará el caudal másico que expulsa la ventosa con $C_{exp} < 1$, mediante las siguientes expresiones:

Cuando $p_{atm}^* < p_t^* < 1.893 \cdot p_{atm}^*$, entonces:

$$\frac{dm}{dt} = C_{exp} A_{exp} p_t^* \sqrt{\frac{7}{RT_t} \left(\left(\frac{p_{atm}^*}{p_t^*} \right)^{1.4286} - \left(\frac{p_{atm}^*}{p_t^*} \right)^{1.714} \right)} \quad (3.20)$$

Cuando $p_t^* \geq 1.893 \cdot p_{atm}^*$, entonces:

$$\frac{dm}{dt} = C_{exp} A_{exp} \frac{0.686}{\sqrt{RT_t}} p_t^* \quad (3.21)$$

3.3.3.- Ajuste propuesto por Boldy.

Boldy (1992) propuso el ajuste de las ecuaciones tanto para la admisión como para la expulsión de aire por medio de una curva continua que analizaba el comportamiento global de la ventosa.

Las ecuaciones propuestas por Boldy para modelar el comportamiento de cualquier ventosa sea cual sea su zona de funcionamiento son las siguientes:

Para la admisión de aire ($p' < 1$):

$$\text{Si } p' \leq 0.53 \quad \rightarrow \quad \dot{m} = \text{CON} \quad (3.22)$$

$$\text{Si } p' > 0.53 \quad \rightarrow \quad \dot{m} = \text{CON} \cdot 3.8568 \cdot \sqrt{(p')^{1.4286} - (p')^{1.714}} \quad (3.23)$$

Para la expulsión de aire ($p' > 1$):

$$\text{Si } p' < 1.89 \quad \rightarrow \quad \dot{m} = -\text{COU} \cdot 3.8568 \cdot \sqrt{(p')^{1.4286} - (p')^{1.714}} \quad (3.24)$$

$$\text{Si } p' \geq 1.89 \quad \rightarrow \quad \dot{m} = -\text{COU} \cdot p' \quad (3.25)$$

Siendo \dot{m} el caudal másico ($\dot{m} > 0$: (admitido) ó $\dot{m} < 0$: (expulsado)), $p' = p_t^*/p_{atm}^*$ la presión adimensionalizada y CON y COU las constantes características de cada ventosa.

Las expresiones anteriores quedan reflejadas gráficamente mediante las curvas de la Figura 3.2:

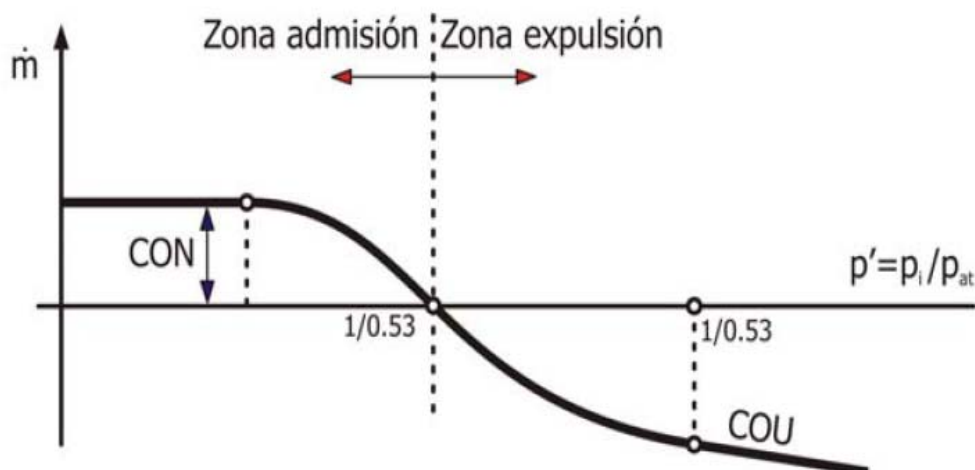


Figura 3.2. Ajuste del comportamiento de una ventosa según Boldy (García Mares, 2012).

A modo de resumen el caudal a admitir o expulsar en una ventosa es función de:

$$\dot{m} = \varphi(p_t^*, CON, COU) \quad (3.26)$$

3.4.- Interpretación de las curvas características de una ventosa.

En el mercado existen una gran cantidad de tipos y formas constructivas de ventosas, todas ellas muy diferentes entre sí. Es muy importante conocer las diferencias existentes entre unas y otras, así como también las especificaciones técnicas (curva característica, diámetro del orificio de salida, diámetro de conexión, presión de trabajo, etc.), ya que, una selección inadecuada de la ventosa puede generar problemas más graves que los que se pretendían resolver.

La curva característica de una ventosa es aquella obtenida a partir de ensayos experimentales que relacionan el caudal de aire admitido o expulsado y la diferencia de presiones entre el interior y el exterior de la ventosa. A partir de dicha curva se pueden obtener, para cada ventosa, una serie de expresiones matemáticas que relacionan los parámetros anteriormente mencionados.

Dependiente del tipo de ventosa, las fases de admisión y/o expulsión de aire adquieren mayor o menor importancia. Por ejemplo, en una ventosa de gran orificio (Figura 3.3) tanto la fase de admisión como la de expulsión son de interés para diferencias de presiones pequeñas.

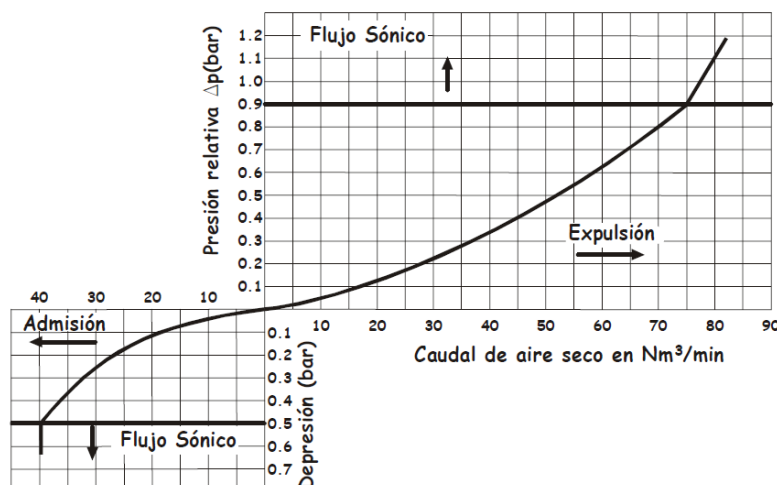


Figura 3.3. Curva característica de una ventosa de gran orificio (Fuentes, 2001).

Sin embargo, en ventosas de pequeño orificio (Figura 3.4) únicamente presenta interés la curva característica en la fase de expulsión y para diferencias de presiones grandes.

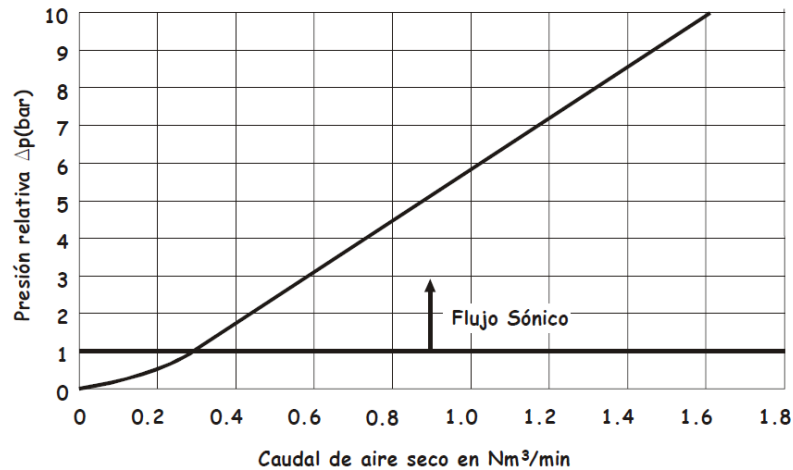


Figura 3.4. Curva característica de una ventosa de pequeño orificio (Fuertes, 2001).

En el eje de abscisas se representa el caudal volumétrico en condiciones normales, es decir, medido a temperatura ambiente y presión atmosférica. Además, el caudal volumétrico es directamente proporcional al caudal másico, únicamente multiplicando por la densidad del aire ρ_{atm} en condiciones normales.

Por otra parte, en el eje de ordenadas se representa la diferencia de presiones Δp existente entre la entrada y salida de la ventosa.

Para admisión:

$$\Delta p = p_{atm}^* - p_t^* \quad (3.27)$$

Para expulsión:

$$\Delta p = p_t^* - p_{atm}^* \quad (3.28)$$

Estas curvas se obtienen mediante ensayos de la misma en todas las posibles regiones de funcionamiento. A partir de dichas curvas es posible obtener unas sencillas expresiones matemáticas que, para cada ventosa, relacionen el caudal de aire con la diferencia de presiones.



En la Universidad Politécnica de Valencia se han realizado ensayos experimentales de un gran número de ventosas, encontrándose grandes discrepancias cuando se comparan los resultados obtenidos con los datos proporcionados por los fabricantes. Esta circunstancia puede originar graves problemas. Si, para seleccionar una ventosa, se utilizan las gráficas facilitadas en los catálogos y las curvas características que allí aparecen se alejan notablemente de la realidad, seguramente se estará realizando un dimensionado totalmente incorrecto.

Además, el dimensionado y la selección de las ventosas deben realizarse con sumo cuidado. El sobredimensionamiento de las mismas, en su etapa de expulsión, puede dar origen a golpes de ariete indeseados y elevadas sobrepresiones que pueden dañar la instalación. Por supuesto, tampoco es acertado dimensionar la ventosa por debajo de sus valores nominales porque, en este caso, no será capaz de admitir o expulsar la cantidad de aire requerida. Así pues, una ventosa tanto si es demasiado pequeña como demasiado grande puede ser la causa de importantes problemas. Si a este hecho se le une la dificultad a la hora de estimar con cierta exactitud el caudal de aire que debe admitir o evacuar una ventosa, se confirma la enorme complejidad que tiene la selección correcta de la ventosa más adecuada para una instalación correcta.

Las condiciones en las que se realizan estos ensayos no suelen estar referenciadas en los catálogos, lo cual hace que sea imposible reproducir los mismos en un laboratorio. Además, el fabricante no suele dar casi nunca las condiciones para las cuales el flujo de aire expulsado puede llegar a cerrar la ventosa antes de tiempo, fenómeno también conocido como cierre hidráulico o dinámico.

Como se vio en el capítulo 2, éste es el cierre indeseado producido antes de tiempo debido a “la fuerza de sustentación” generada por un exceso de velocidad del aire pudiendo llegar a vencer el peso del flotador. Al cerrar la ventosa, se puede originar una bolsa de aire en su interior que al comprimirse, incrementa su presión.

Como se puede apreciar en la Figura 3.5, se muestra para dos ventosas diferentes los puntos en los que se produce el “cierre dinámico” para diferentes diferencias de presiones en unos ensayos realizados por el *Council for Scientific and Industrial Reserach*.

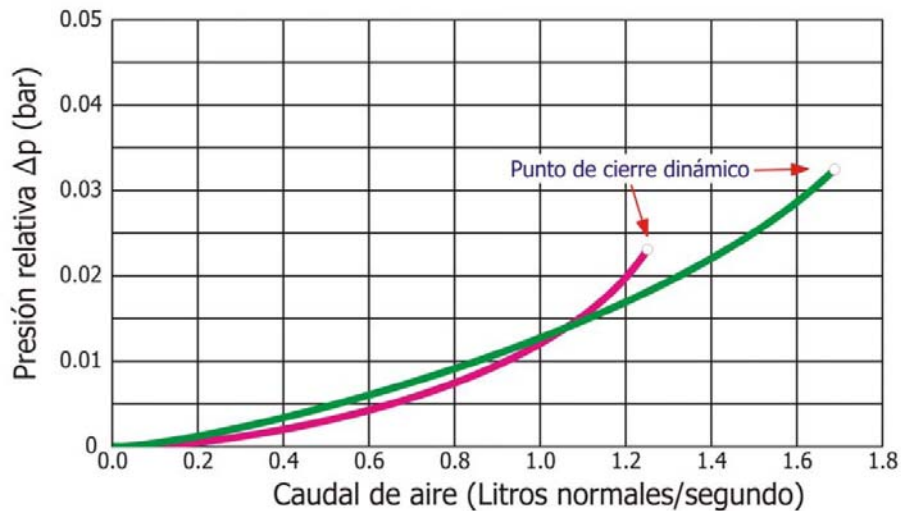


Figura 3.5. Ensayos realizados por el Council for Scientific and Industrial Research, indicando el “punto de cierre dinámico” para dos ventosas de gran orificio DN 80 (García Mares, 2012).

Otra consideración a tener en cuenta respecto a las curvas características de las ventosas es que el caudal volumétrico proporcionado en las gráficas y tablas por los fabricantes suele encontrarse en condiciones normales, y es por este motivo por el cual no coincide con el caudal volumétrico experimental o real.

Además, no hay que cometer el error de que si se tienen las curvas características de diferentes ventosas con el mismo diámetro nominal, éstas serán las mismas. En la Figura 3.6 se muestra para un grupo de ventosas de DN 50, las curvas características de cada una de ellas y se observa que son muy diferentes y pueden abarcar diferencias de presiones muy diferentes para un mismo caudal volumétrico, a pesar de tener el mismo diámetro de entrada.

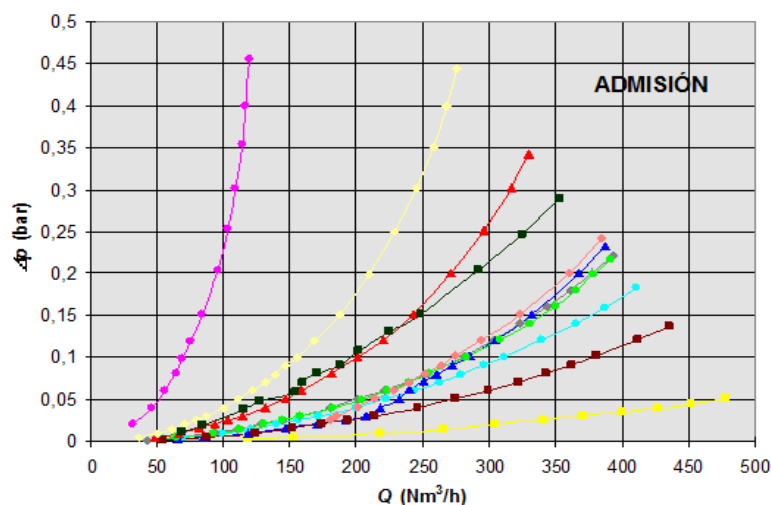


Figura 3.6. Curvas características de diferentes ventosas de DN 50 en la fase de admisión (Fuertes, 2001).

3.5.- Flujo compresible e incompresible.

En el siguiente capítulo se propone la alternativa de realizar los ensayos de laboratorio con agua en vez de con aire. Para ello se debe considerar el aire como fluido compresible y el agua como fluido incompresible.

Por tanto, se quiere estudiar en este apartado la diferencia existente entre considerar compresible el aire o no (Fuertes y otros, 2009), así como la posibilidad de extrapolación de resultados entre agua y aire.

Partimos de la ecuación de la energía aplicando como hipótesis de partida que la diferencia de cotas entre la entrada y la salida de la ventosa sea despreciable, la expresión queda:

$$RT \frac{dp^*}{p^*} + v \cdot dv = 0 \quad (3.29)$$

$$\frac{dp^*}{\rho} + v \cdot dv = 0 \quad (3.30)$$

El siguiente paso es integrar la expresión anterior entre la sección de entrada y el orificio de salida, asumiendo la incompresibilidad del flujo, es decir, se considera una densidad constante ρ_{ref} .

$$\frac{p^* - p_0^*}{\rho_{ref}} + \frac{v^2 - v_0^2}{2} = 0 \quad (3.31)$$

Si despreciamos el término cinético a la entrada de la ventosa y despejamos la velocidad la expresión queda:

$$\frac{v_0^2}{2} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{p^* - p_0^*}{\rho_{ref}} + \frac{v^2}{2} = 0 \quad (3.32)$$

$$v = \sqrt{2 \frac{p_0^* - p^*}{\rho_{ref}}} \quad (3.33)$$



Se sustituye la velocidad en la ecuación de continuidad ($Q = Av$) y en la expresión del caudal másico ($dm/dt = \rho_{ref}Av$) queda:

$$Q = Av = A \sqrt{2 \frac{p_0^* - p^*}{\rho_{ref}}} \quad (3.34)$$

$$\frac{dm}{dt} = \rho_{ref}Av = \rho_{ref}A \sqrt{2 \frac{p_0^* - p^*}{\rho_{ref}}} = A \sqrt{2(p_0^* - p^*)\rho_{ref}} \quad (3.35)$$

La ecuación del caudal másico no refleja la realidad, ya que, considera que la evolución isoentrópica del aire es totalmente reversible. Por lo tanto, se emplea un coeficiente C para expresar la relación entre el caudal másico “real” y el caudal másico “teórico”, y queda:

$$C < 1 \quad \rightarrow \quad \frac{dm}{dt} = CA \sqrt{2(p_0^* - p^*)\rho_{ref}} \quad (3.36)$$

Para la fase de expulsión de aire, la expresión del caudal másico queda:

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{exp} = C_{exp}A_{exp} \sqrt{2(p_t^* - p_{atm}^*)\rho_{ref}} \quad (3.37)$$

Siendo $\rho_{ref} = \frac{\rho_t + \rho_{atm}}{2}$ la media de densidades del aire en el interior de la tubería y en condiciones atmosféricas.

Por último, en el caso particular de no haber considerado despreciable el término cinético en la sección de entrada, la expresión del caudal másico en la fase de expulsión de aire, queda:

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{exp} = \frac{C_{exp}A_{exp}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_{exp}}{A_t}\right)^2}} \sqrt{2(p_t^* - p_{atm}^*)\rho_{ref}} \quad (3.38)$$

En la Figura 3.7 se comparan las curvas características de una ventosa analizada con las expresiones correspondientes a flujos compresible e incompresible, respectivamente. Podemos observar que hasta presiones relativas en torno a 0,3 *bar*, que es realmente el rango en el que suelen trabajar las ventosas, la diferencia entre utilizar un flujo u otro son muy pequeñas, siendo igualmente válidos cualquiera de los dos.

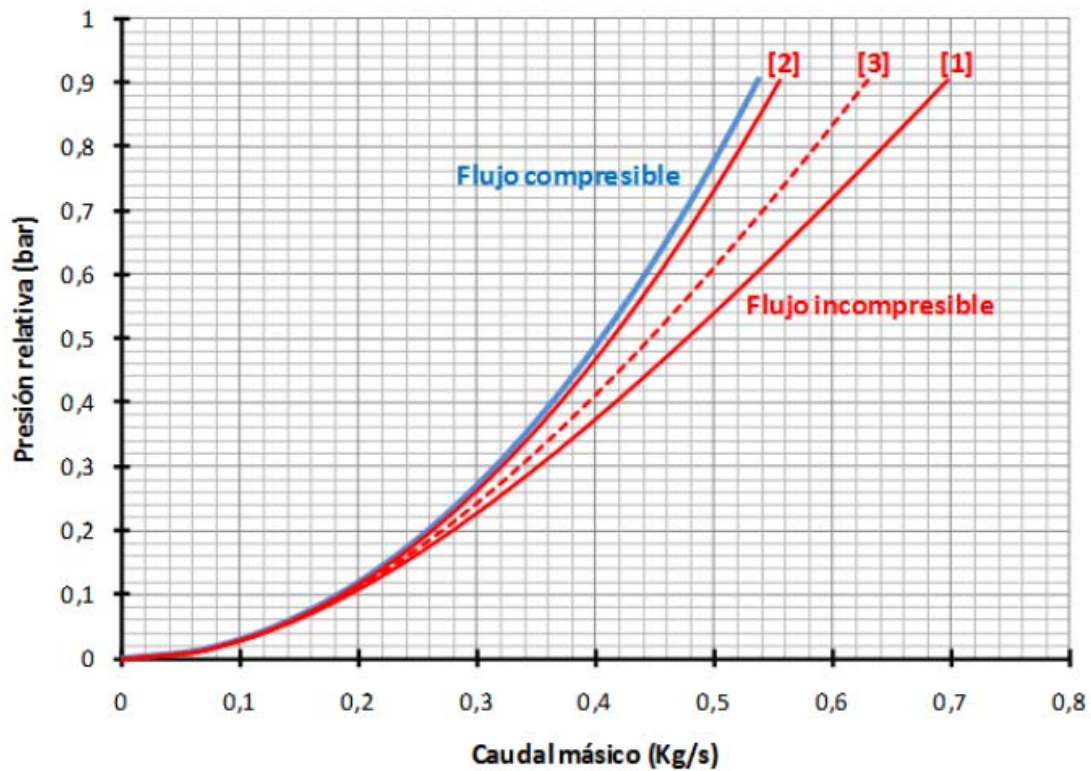


Figura 3.7. Comparación entre flujo compresible e incompresible (Iglesias y otros, 2013).

4. VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE VENTOSAS.

4.1.- Introducción.

El principal problema en la caracterización de las ventosas es que la gran mayoría de los fabricantes de las mismas ofrecen unas curvas y unos valores asociados a éstas que no suelen concordar con la realidad (Figura 4.1) y, por tanto, no llegan a ser fiables.

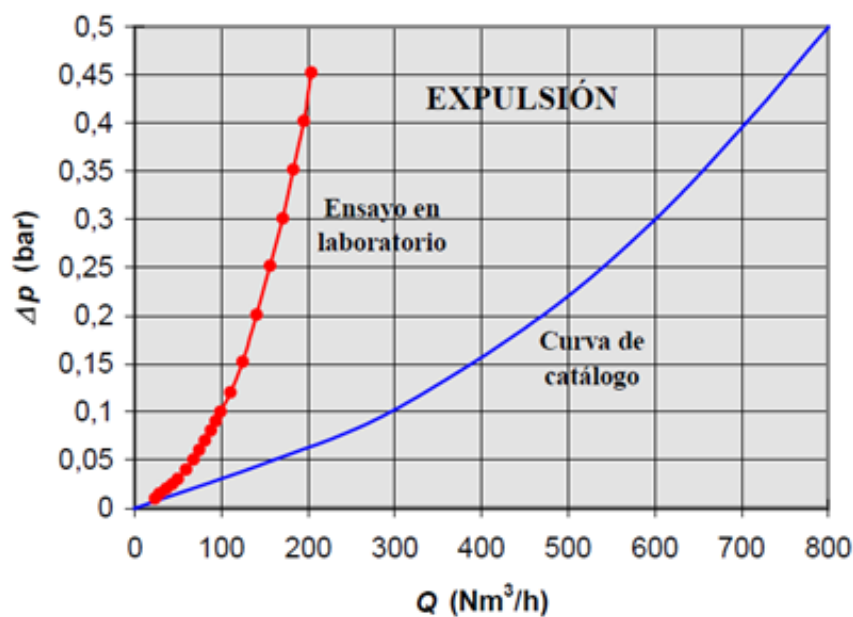


Figura 4.1. Comparación entre los ensayos de expulsión de aire con las curvas del fabricante de una ventosa de DN 50 en fase de expulsión (Fuertes y otros, 2006).

Es por ello la necesidad de comprobar la fiabilidad de los datos aportados por el fabricante realizando ensayos experimentales del comportamiento de la ventosa. Para realizar estos ensayos, cabe tener en cuenta la normativa actual aplicable a las ventosas (UNE-EN 1074-4, 2000) la cual se comenta en el siguiente apartado.

Además, para comprobar que nuestros ensayos son correctos, se puede extrapolar dichos resultados mediante la aplicación de técnicas de semejanza hidrodinámica en unas condiciones diferentes a las de funcionamiento y compararlas con los resultados obtenidos mediante técnicas CFD, como se verá en los siguientes capítulos.



4.2.- Normativa aplicable: Norma UNE-EN 1074.

A pesar de que años atrás las normas de tipo americano eran las únicas de las cuales teníamos referencia en España, desde julio de 2000 ya se dispone de una norma europea de producto en cuanto a ventosas se refiere.

Se trata de la norma UNE-EN 1074 (Válvulas para el suministro de agua. Requisitos de aptitud al uso y ensayos de verificación). Dicha norma consta de 6 partes:

- Parte 1: Requisitos generales.
- Parte 2: Válvulas de seccionamiento.
- Parte 3: Válvulas de antirretorno.
- Parte 4: Purgadores y ventosas.
- Parte 5: Válvulas de control.
- Parte 6: Hidrantes.

La parte 1, junto con las partes subsiguientes, establece los requisitos generales y los procedimientos de ensayo a llevar a cabo durante el proceso de producción, y la verificación de la conformidad de estas válvulas (ensayos de tipo). Los requisitos detallados que dependen de los tipos de válvulas, se definen en las partes 2 a 6 de esta norma.

Concretamente la norma que se va a aplicar en el presente trabajo es la UNE-EN 1074-4 (parte 4: Purgadores y ventosas).

Esta norma europea especifica los requisitos mínimos de la idoneidad para el uso en válvulas a utilizar en, o conectadas con, sistemas de tuberías de suministro de agua, aéreos o enterrados que transporten agua destinada al consumo humano. Además, esta norma establece los requisitos generales de diseño, los requisitos de funcionamiento, así como los métodos de evaluación de la conformidad de válvulas, cualesquiera que sean su tipo y sus materiales.

De dicha norma se pueden extraer una serie de conclusiones:

- Las características facilitadas por el fabricante debe ser el caudal de aire en función de la presión.
- Cuando el caudal se mida según las condiciones predefinidas para una determinada presión de admisión o expulsión de aire, éste no debe ser inferior al 90% del valor indicado por el fabricante, en dos puntos de la curva, siendo estos dos puntos indicativos del rango de utilización de la válvula y de sus funciones.

Estos dos puntos podrían ser el punto de diseño en el cual se desee que trabaje la ventosa (presión o sobrepresión aproximada de 0.3 bar) y el caudal máximo (antes del bloqueo sónico, explicado en el capítulo anterior) que pueda admitir o expulsar la ventosa.

- La norma sólo recoge como preceptivo el ensayo de ventosas hasta DN 100 tanto para la salida como la entrada de aire según se indican en los anexos correspondientes.
- La función de desgasificación de los purgadores (expulsión de aire) se debe verificar mediante la medición de la sección del orificio de salida, independientemente del recorrido que el aire realice por el interior del purgador antes de ser expulsado. Calculando así, el caudal que lo atraviesa en condiciones sónicas, y comparando el resultado con el valor facilitado en los catálogos del fabricante.
- De acuerdo con el apartado 6.2 de la norma UNE-EN 1074-1 (Requisitos Generales) para la validación de una gama de válvulas con el mismo diseño, fabricadas siguiendo los mismos procesos y con los mismos materiales, o equivalentes, los ensayos de tipo se pueden realizar en un número limitado de DN's (Diámetros Nominales), aplicando la siguiente regla: cuando los ensayos de tipo en un DN hayan dado resultados conformes con la norma, se considera que los dos DN's inmediatamente superiores, y los dos DN's inmediatamente inferiores, satisfacen los mismos ensayos.

Por otra parte, la metodología de ensayo aplicable para validar los ensayos de las curvas características de una ventosa se recogen en los anexos A (flujo de salida de aire) y B (flujo de entrada de aire) de la citada norma UNE-EN 1074-4.

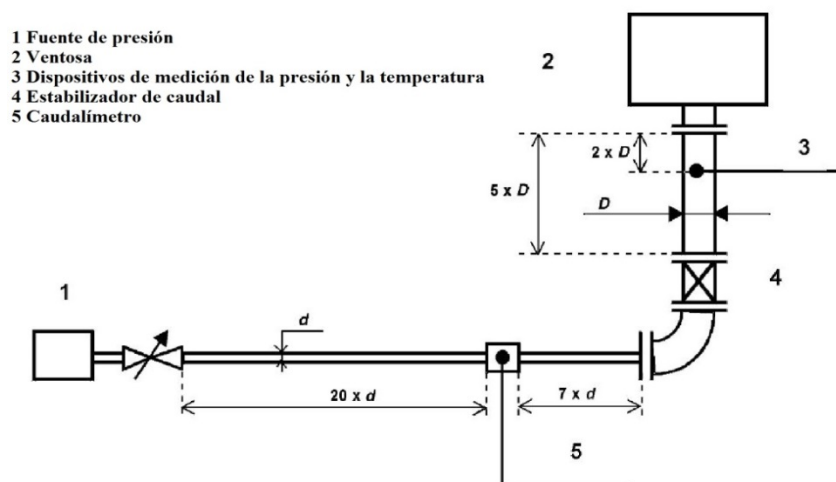


Figura 4.2. Instalación de ensayo con función de salida de aire (UNE-EN 1074-4, 2000).

Los anexos A y B recogen tanto aspectos generales como una breve descripción de la instalación de ensayo y rango en el cual pueden variar las magnitudes a medir (procedimiento de ensayo). De forma genérica el equipo de ensayo para analizar la capacidad de expulsión de la ventosa debe ser como el mostrado en la Figura 4.2. Así para la realización del ensayo según la norma se deben tener en cuenta algunas generalidades:

- El fluido de ensayo debe ser aire. El ensayo de presión de aire debe ser conforme con todas las reglamentaciones de seguridad correspondientes y debe adoptar medidas de seguridad en el caso de que fuese necesario.
- El ensayo se debe realizar en una válvula en las condiciones en las que se suministra (punto de funcionamiento) montada verticalmente. El ensayo debe comenzar con la válvula y el aire a temperatura ambiente.
- En el punto de medición del caudal de aire, la temperatura del aire debe mantenerse entre 5°C y 45°C a lo largo de todo el ensayo.
- Las válvulas con varias funciones (salida de aire, entrada de aire o desgasificación) se deben ensayar sin aislar las partes que aseguran las diferentes funciones.

Durante el procedimiento de ensayo de la capacidad de expulsión de la ventosa, una vez abierta la válvula de seccionamiento para que se alcance el caudal del primer punto de medición deben verificarse los siguientes requisitos en cuanto a rangos de trabajo:

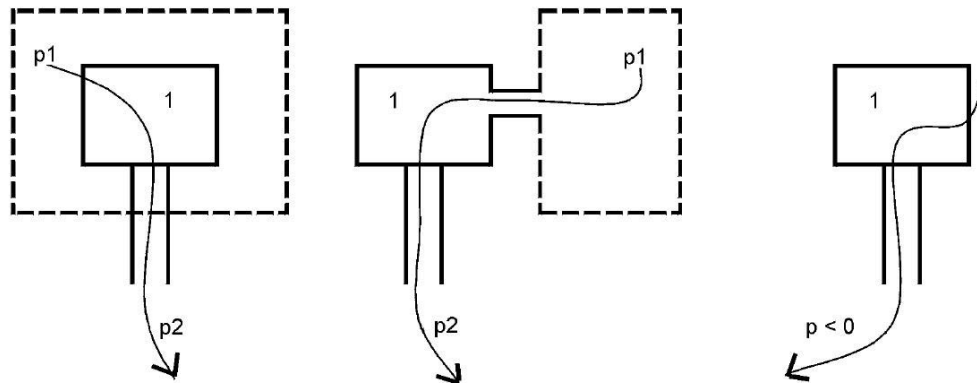
- El valor del caudal debe estar dentro del rango de $\pm 4\%$ durante todo el ensayo.
- El valor de la presión debe estar dentro del rango de $\pm 5\%$ durante todo el ensayo.
- El valor de la temperatura debe estar dentro del rango de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante todo el ensayo.

Además, a partir de las inspecciones realizadas se calcula el caudal medio en m^3/h y se registrarán las condiciones y los resultados de ensayo de los valores medios de caudal másico, presión y temperatura del ensayo en condiciones normales.

Este procedimiento se repetirá abriendo la válvula de aislamiento para que se alcance el caudal del segundo punto de medición.

La generación de un caudal constante de aire con presión manométrica negativa (depresión) en la entrada de la ventosa resulta ser un procedimiento más complejo tecnológicamente. Por ello, la norma UNE-EN 1074-4 recoge diferentes configuraciones para poder facilitar la realización de este ensayo (Figura 4.3). Se utilizarán las mismas generalidades y el mismo procedimiento de ensayo que para la salida de aire partiendo de la hipótesis de que la densidad del aire no varía de forma significativa durante el ensayo (flujo incompresible).

En resumen, la instalación de ensayo a la entrada de aire debe ser capaz de crear un caudal de aire del exterior al interior de la válvula, bien mediante una presión negativa bajo la válvula o mediante una presión positiva alrededor o dentro de la válvula.



NOTA - $p_1 > p_2$

Leyenda

1 Válvula

Figura 4.3. Ejemplos de instalación de ensayo con función de entrada de aire (UNE-EN 1074-4, 2000).

El ensayo correcto para la fase de admisión de una ventosa (entrada de aire) únicamente se puede llevar a cabo con la tercera de las configuraciones de la Figura 4.3 siendo el rango de validez y aplicación de las otras dos bastante cuestionable.

4.3.- Estudios con aire.

4.3.1.- Introducción.

Como afirman Iglesias y otros (2014) el principal problema relacionado con las pruebas de ensayo de las ventosas es el volumen de aire que es necesario trasegar para realizar el ensayo correctamente. Una ventosa de diámetro nominal de 80 mm (DN 80: 3") como la ensayada, puede requerir un caudal volumétrico de aproximadamente 3000 Nm³/h. Este caudal crece mucho con tamaños más grandes de diámetro de entrada de la ventosa. Por ejemplo, una válvula de 100 mm puede requerir alrededor de 8000 m³/h, mientras que una de 300 mm puede requerir un caudal de hasta 72000 m³/h.

En la actualidad, hay dos técnicas principales para estudiar las características neumáticas de una ventosa.



La primera de ellas está basada en el almacenamiento de grandes cantidades de aire en los vasos de aire de alta presión. Posteriormente, el aire se libera gradualmente a través de un sistema que reduce la presión a la de funcionamiento de la ventosa. Incluso teniendo en cuenta que el mínimo tiempo para cada ensayo es de un minuto, el volumen mínimo requerido para estas pruebas seguirá siendo grande.

La segunda alternativa para probar las ventosas con aire es disponer de un soplante de aire con capacidad suficiente para suministrar el aire necesario durante los ensayos. El problema radica en el tamaño y la potencia del ventilador.

Ambas tecnologías son muy eficaces para el ensayo de expulsión de aire, pero el primero es muy ineficiente para el ensayo de presiones por debajo de la atmosférica. Por lo tanto, este método no es muy adecuado para el estudio de admisión de aire.

4.3.2.- Montaje experimental de las ventosas.

Para el desarrollo de la fase experimental de este trabajo se utiliza un banco de ensayos de ventosas construido por la empresa Bermad CS en su fábrica de Evron (Israel).

Éste posee un soplante de 315 *KW* de potencia con una capacidad máxima de 16320 m^3/h para una presión de 52 *kPa* a 20°C. El control de dispositivos del banco de pruebas permite contrastar las ventosas con diámetros nominales de entrada de entre 2” a 12” donde se mide los flujos de aire en todo el rango de presión adecuado. Por encima de 0.5 *bar*, para el llenado de tuberías y por debajo de 0.5 *bar*, para condiciones de vacío y durante el drenaje de la tubería.

Esquemáticamente, el banco de ensayos utilizado (Figura 4.4) cumple con los requisitos de las normas europeas, en concreto de la norma UNE-EN 1074-4. La fuente de presión es formada por el ventilador y por las válvulas de control de la conexión. La configuración de la válvula es diferente para los ensayos de expulsión y admisión de aire. En el caso de la liberación de aire, el soplante se encuentra al principio de la instalación y la ventosa en su extremo. En el caso de admisión o entrada de aire, el sistema se invierte con la ventosa al principio y el ventilador en el extremo.



Figura 4.4. Banco de ensayos con aire del laboratorio.

Para hacer este estudio de válvulas de aire se seleccionaron 19 modelos diferentes de ventosas incluida la ventosa modelo IRUA 930 a caracterizar. Estos modelos están cubiertos por 13 fabricantes de 9 países diferentes, entre ellos España. Para ser capaces de comparar las diferentes ventosas, no era necesario seleccionar un tamaño común de referencia. En algunos estudios preliminares un diámetro nominal de entrada de 50 mm se consideró como valor de referencia inicial. En cambio, resultados posteriores se recomendó aumentar el tamaño del estudio a 80 mm (3") como es el caso de la ventosa.



Figura 4.5. Ensayo de aire con la ventosa modelo IRUA 930.

4.3.3.- Resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos tras el estudio de aire de la ventosa en la fase de expulsión de aire (Tabla 4.1) son los siguientes:

| Q_{min} (Nm ³ /h) | Q_{max} (Nm ³ /h) | Q_{med} (Nm ³ /h) | Δp (bar) | T (°C) |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|----------|
| 294 | 307 | 300.5 | 0.0078 | 38.0 |
| 599 | 617 | 608.0 | 0.0195 | 37.1 |
| 833 | 849 | 841.0 | 0.0312 | 37.5 |
| 988 | 1003 | 995.5 | 0.0429 | 38.0 |
| 985 | 1110 | 1047.5 | 0.0546 | 38.8 |
| 1281 | 1295 | 1288.0 | 0.0703 | 40.5 |
| 1495 | 1511 | 1503.0 | 0.0976 | 43.1 |
| 1724 | 1740 | 1732.0 | 0.1289 | 46.7 |
| 1829 | 1849 | 1839.0 | 0.1445 | 48.8 |
| 2011 | 2029 | 2020.0 | 0.1757 | 52.8 |
| 2247 | 2256 | 2251.5 | 0.2226 | 56.9 |
| 2366 | 2387 | 2376,5 | 0.2500 | 60.2 |
| 2502 | 2512 | 2507.0 | 0.2773 | 63.8 |
| 2681 | 2688 | 2684.5 | 0.3201 | 68.2 |
| 2902 | 2921 | 2911.5 | 0.3750 | 74.1 |
| 289 | 299 | 294.0 | 0.0000 | 41.7 |

Tabla 4.1. Resultados obtenidos tras el ensayo de expulsión de aire.

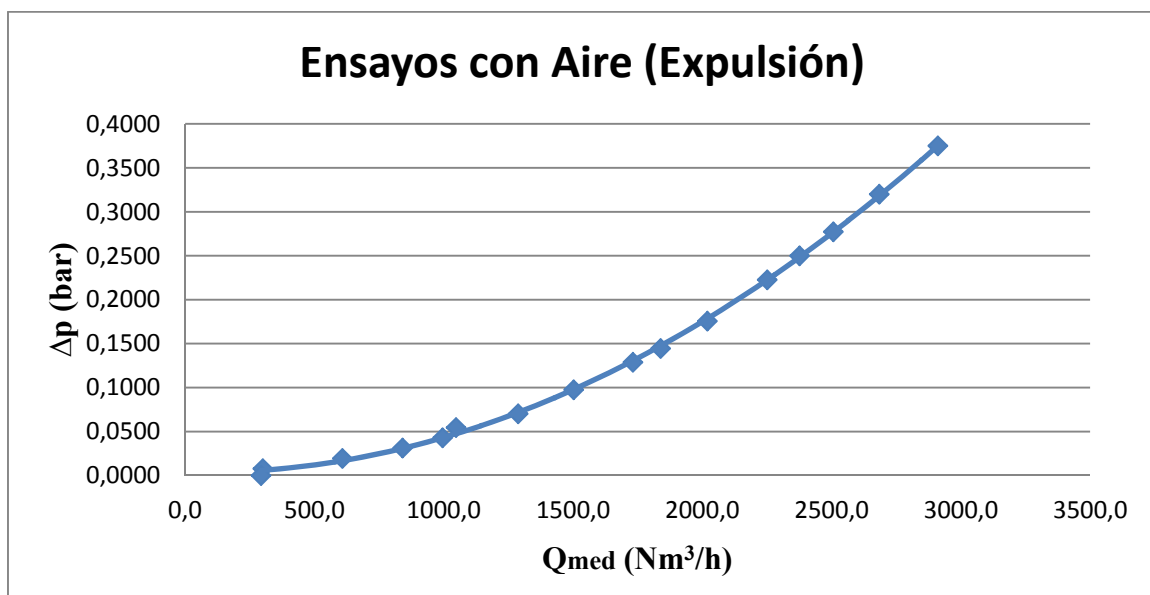


Figura 4.6. Ensayo de expulsión de aire de la ventosa modelo IRUA 930.

Puesto que los ensayos de admisión de aire presentan una gran complejidad, únicamente se estudia los ensayos de aire realizados en la fase de expulsión. De todas formas, los resultados obtenidos en el ensayo de aire en la fase de admisión (Tabla 4.2) son los siguientes:

| Q_{min} (Nm^3/h) | Q_{max} (Nm^3/h) | Q_{med} (Nm^3/h) | Δp (bar) | T ($^{\circ}C$) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------|---------------------|
| -538 | -550 | -544.0 | -0.0429 | 38.2 |
| -671 | -687 | -679.0 | -0.0937 | 36.3 |
| -785 | -794 | -789.5 | -0.1484 | 35.0 |
| -839 | -858 | -848.5 | -0.1953 | 34.3 |
| -910 | -927 | -918.5 | -0.2460 | 33.8 |
| -982 | -1009 | -995.5 | -0.3085 | 33.5 |
| -1024 | -1041 | -1032.5 | -0.3984 | 33.2 |
| -1075 | -1081 | -1078.0 | -0.4882 | 32.8 |
| -1080 | -1112 | -1096.0 | -0.5273 | 32.5 |
| -278 | -294 | -286.0 | 0.0000 | 33.1 |
| -537 | -551 | -544.0 | -0.0507 | 32.7 |
| -667 | -688 | -677.5 | -0.1015 | 32.7 |
| -760 | -775 | -767.5 | -0.1484 | 32.6 |
| -838 | -874 | -856.0 | -0.1953 | 32.4 |
| -917 | -930 | -923.5 | -0.2500 | 32.4 |
| -963 | -984 | -973.5 | -0.2968 | 32.3 |
| -979 | -994 | -986.5 | -0.3476 | 31.9 |
| -1008 | -1029 | -1018.5 | -0.4101 | 31.9 |
| -1070 | -1098 | -1084.0 | -0.5078 | 31.8 |

Tabla 4.2. Resultados obtenidos tras el ensayo de admisión de aire.

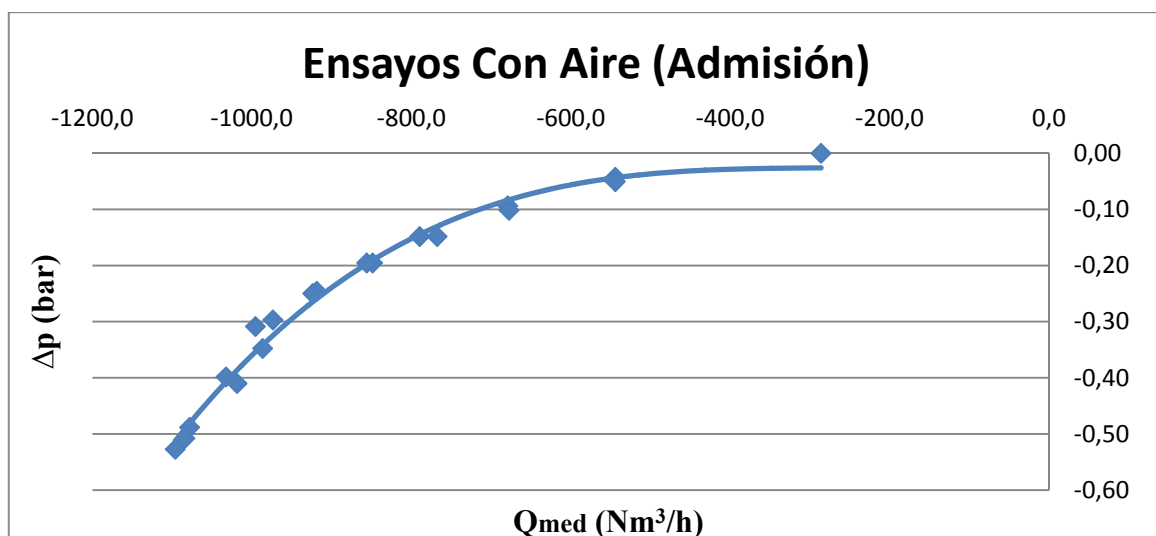


Figura 4.7. Ensayo de admisión de aire de la ventosa modelo IRUA 930.



4.3.4.- Análisis de los resultados.

El análisis comparativo del comportamiento de las diferentes ventosas ha supuesto la realización de más de 100 ensayos. Aunque el número de los modelos considerados en este estudio fue de 19, las pruebas de cada uno de los modelos se repitieron varias veces a fin de verificar que los resultados obtenidos son correctos.

Debido a las particularidades del sistema, se han establecido unos límites de prueba de ventosas. Estos límites se establecen por las restricciones del sistema: presión máxima, potencia máxima y el par máximo en el soplador. Sin embargo, el rango definido permite analizar a fondo las zonas de operación normal del conjunto de las ventosas.

El límite de caudal volumétrico se ha fijado en $3000 \text{ Nm}^3/\text{h}$, mientras que los niveles más altos de presión diferencial en la ventosa deber ser de 0.5 bar tanto para la entrada como para la salida de aire.

El análisis de los datos experimentales se ha centrado en los siguientes aspectos:

- La diferencia entre los datos técnicos proporcionados por el fabricante y los datos experimentales.
- La determinación del cierre dinámico en las ventosas.
- Los efectos de las diferentes cubiertas de las ventosas en el comportamiento de las mismas.
- La validez de los modelos matemáticos para representar el comportamiento de las ventosas.

4.3.5.- Conclusiones.

Las principales conclusiones que podemos extraer de este estudio son las siguientes:

- A pesar de que todos los elementos analizados tienen el mismo diámetro nominal de entrada, hay grandes diferencias entre la admisión y expulsión de aire. Esto muestra claramente que no es suficiente para especificar el tamaño de una ventosa para caracterizarla. Las especificaciones de diseño que proporcionan los proyectos de este tipo no debe incluir únicamente el tamaño de la ventosa sino también el flujo de aire y la presión diferencial.
- El cierre dinámico es un parámetro crítico para la selección de la ventosa. Los modelos probados presentan comportamiento muy diferentes. Algunos modelos disponen de cierres dinámicos extremadamente bajos, lo que puede influir en las condiciones de llenado de la instalación.



En cualquier caso, es un parámetro que debe ser conocido por los técnicos en realizar dichos ensayos y que no es, por lo general, similar a la información aportada por el fabricante.

- Es necesario revisar con detalle la información que los fabricantes ofrecen de sus ventosas. Como se ha comentado en apartados anteriores, es muy común encontrar discrepancias entre los datos técnicos del fabricante y su comportamiento real. Además, la documentación técnica de algunos fabricantes no refleja la información sobre el cierre dinámico o el diferente comportamiento que presenta la ventosa con diferentes tapas o cubiertas (laterales, parte inferior, etc).

Puesto que los ensayos de ventosas con aire tienen un coste energético elevado, así como una cierta complejidad de realizarlos de manera eficiente, existen otras opciones viables para caracterizar el comportamiento de la ventosa. La alternativa que se desarrolla en el siguiente apartado es la aplicación de la semejanza hidrodinámica a los ensayos con aire obteniendo los resultados con agua y así éstos últimos poder compararlos con una simulación mediante técnicas CFD con agua.

4.4.- Alternativas en la Caracterización de ventosas. Estudios con agua.

En el presente trabajo se plantea la alternativa a los ensayos de aire debido al elevado coste energético de éstos. Esta nueva forma de caracterizar nuestra ventosa no es más que la aplicación de la semejanza hidrodinámica a partir de ensayos realizados con agua.

Debido a que el tamaño de la ventosa a caracterizar es de dimensiones superiores a las realizadas en proyectos anteriores (García-Mares, 2012), las calibraciones a realizar en el laboratorio no se han logrado llevar a cabo de manera óptima, por lo tanto, no se mostrarán los ensayos con agua de la ventosa.

A pesar de ello, en los siguientes apartados se explica con detalle los medios a utilizar, así como las diferentes adaptaciones que se llevarían a cabo antes de proceder al ensayo.

4.4.1.- Medios a utilizar.

En la Figura 4.8 se muestra el esquema simplificado de la instalación donde se realizan los ensayos con agua.

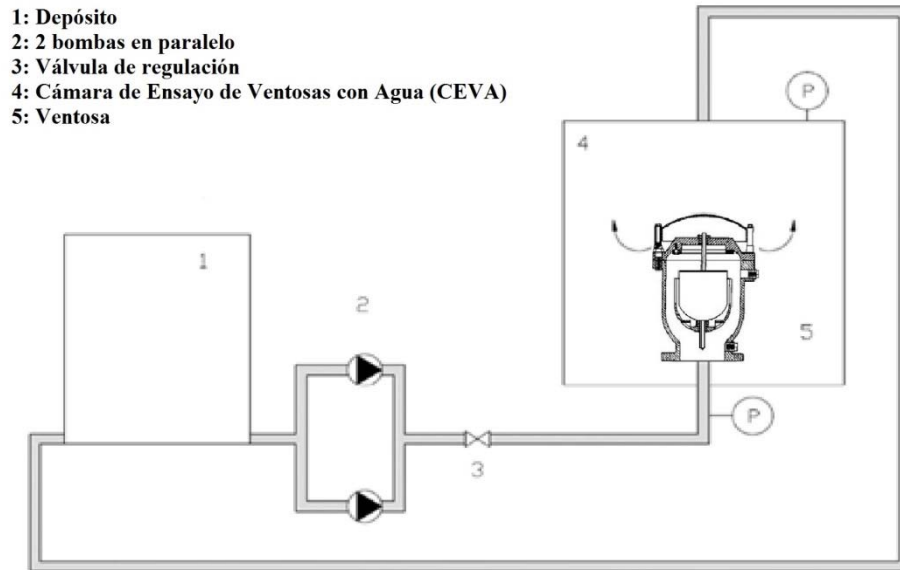


Figura 4.8. Instalación del ensayo con agua en el laboratorio.

A continuación, se muestra cada uno de los elementos principales del ensayo con agua:

- **Depósito:** Este elemento almacena agua de consumo con una doble finalidad:
 1. Disponer de una reserva de agua para que en el caso de corte de la instalación por una avería o rotura, se disponga de autonomía para consumo de agua durante un tiempo.
 2. Suministrar agua a un grupo de presión o sobreelevación para que en caso de bajada de presión, el agua pueda llegar a todas las zonas de la instalación.



Figura 4.9. Depósito.

- **Dos bombas situadas en paralelo:** Son los elementos de la instalación que impulsan el caudal. Van ligadas al variador de frecuencia, ya que, conforme se aumenta la frecuencia, el caudal impulsado por las bombas es mayor.



Figura 4.10. Instalación con dos bombas en paralelo.

- **Variador de frecuencia:** Es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del registro de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. En nuestro caso, cada una de nuestras bombas tiene un motor. Así, las bombas impulsarán con mayor a menor fuerza el caudal de agua dependiendo de la frecuencia a la que se realice el ensayo en cada punto. La frecuencia máxima a la que puede funcionar cada bomba es de 50 Hz.



Figura 4.11. Variador de Frecuencia.

- **Válvula de regulación del caudal:** Este tipo de válvulas regulan a un caudal fijo independientemente de la fluctuación de las presiones de trabajo y caudales de inicio. Previene, por ejemplo, el funcionamiento de bombas a un rendimiento demasiado elevado por lo que regula el rendimiento de todos los sistemas e instalaciones e incluso se utiliza para mantener la presión por encima de la manométrica en toda la instalación.



Figura 4.12. Válvula de regulación del caudal.

- **Caudalímetro electromagnético:** Es el elemento de medida del caudal volumétrico (en l/h) que varía conforme aumentemos o disminuyamos la frecuencia en la instalación. Junto con la diferencia de presiones forman cada punto de la curva del ensayo.



Figura 4.13. Caudalímetro electromagnético.

- **Cámara de Ensayo de Ventosas con Agua (CEVA):** Es el elemento donde se encuentra alojada la ventosa. Trata de evitar que el agua que se pierde (caudal de fugas) tanto a la entrada como a la salida de la ventosa no se disperse por el laboratorio y así evitar errores de medida significativos. A la salida de la misma encontramos un codo que reconduce el agua al comienzo de la instalación.



Figura 4.14. Cámara de Ensayo de Ventosas con Agua (CEVA) donde se aloja la ventosa modelo IRUA 930.

- **Manómetros:** Es el instrumento de medición de la presión. Colocaremos uno a la entrada de la cámara y otro a la salida de la misma donde obtendremos la diferencia de presiones de la siguiente forma:

$$\Delta p \text{ (bar)} = P_{ent} \text{ (bar)} - P_{sal} \text{ (bar)} \quad (4.1)$$

Se ubican a la misma altura para que no haya diferencia de cotas entre ambos.



Figura 4.15. Manómetros.

- **Transductor de presión diferencial:** Es también un instrumento de medición de la presión. Este elemento proporciona directamente la diferencia de presiones entre dos puntos siendo éstos la entrada y salida de la cámara donde se aloja la ventosa. Esto es posible gracias a la conexión mediante unos tubos de plástico desde las tomas de entrada y salida conectadas directamente al transductor diferencial.



Figura 4.16. Transductor de presión diferencial.

4.4.2.- Bloqueo del flotador.

La caracterización de la ventosa con agua resulta sumamente sencilla y no es distinta a la realizada para otros elementos hidráulicos comunes en las redes de abastecimiento de agua tales como bombas, válvulas, bocas de riego, etc.

La única dificultad en la realización de la caracterización con agua reside en el hecho de que en el interior de la ventosa existe un flotador. Por este motivo, mediante algún tipo de mecanismo se garantiza que la ventosa no va a cerrar por flotación y va a mantenerse completamente abierta durante el ensayo. Dicho mecanismo debe garantizar la ausencia de flotación en la ventosa al mismo tiempo que el flujo en el interior de la misma debe verse perturbado lo menos posible.

Algunos de los mecanismos empleados para la sujeción del flotador son:

- Rellenar el flotador con un material que evite su flotación, como por ejemplo, de arena.
- Sujetar mecánicamente el flotador mediante tornillos, soldaduras, pegamentos, etc. (Figura 4.17).
- Sustituir el flotador por otro de las mismas dimensiones y acabado superficial, pero de densidad mucho mayor.

En el caso que concierne a este trabajo, el flotador se ha sujetado mediante un tornillo impidiendo así que se produzca flotación.



Figura 4.17. Bloqueo realizado al flotador de la ventosa modelo IRUA 930.



4.4.3.- Calibración de los manómetros.

El envejecimiento de los componentes, los cambios de temperatura, el estrés mecánico que soportan los equipos, etc., deteriora poco a poco las funciones de los elementos de medida. Cuando esto sucede, las medidas y los ensayos comienzan a perder confianza y con ello se resienten tanto el diseño como la calidad del producto. Por lo tanto, es fundamental contar con los equipos de medida y calibración técnicamente adecuados para cubrir las necesidades existentes.

Para garantizar que los ensayos de agua en el laboratorio sean realizados correctamente, se calibran los dos manómetros digitales, tanto el de la entrada como el de la salida. Estos elementos de medida de presión son fundamentales en la extracción de datos del ensayo, ya que necesitamos el incremento de presiones entre la entrada y la salida de la ventosa, por lo que si dicho aparato presenta un error considerable, los resultados no estarán acordes con la realidad.

El manómetro utilizado como patrón (Figura 4.18) es del tipo “Controlador de presión” que es aquel que tienen integrado un sistema de regulación y control de la presión. En algunos casos los fluidos utilizados por el patrón y el instrumento a calibrar son incompatibles, por lo que se hace necesario disponer de un medio para separar ambos, en nuestro caso, de aceite. De esta forma se procede al calibrado de los manómetros.

Con el generador o bomba manual se irá generando presión hasta alcanzar un valor cercano al primer punto definido de presión, a continuación con el volumen variable se ajustará la presión hasta que la lectura del patrón o instrumento sea la deseada. Se recomienda fijar la indicación del patrón cuando el manómetro a calibrar sea digital.

La medida será válida siempre que el sistema sea estable y no se observen saltos o variaciones en las indicaciones del patrón e instrumento.

Se repetirá este paso con los siguientes puntos de calibración, siempre aumentando la presión hasta llegar al valor máximo definido (5 bar).

El mismo proceso se realizará, pero ahora en sentido de presiones decrecientes hasta llegar al cero del manómetro.

Se realizará la lectura del cero, siempre que sea posible, y se volverá a iniciar el ciclo.

Una vez finalizada la calibración y antes de quitar el montaje conviene analizar los datos obtenidos por si fuese necesario repetir algún punto de valor dudoso.



Figura 4.18. Calibrador de manómetros.

4.3.3.1.- Resultados obtenidos tras la calibración de los manómetros.

Los resultados obtenidos (Tabla 4.3) para el manómetro de entrada son:

| Peso (bar) | Manómetro entrada (bar) | Error absoluto (bar) | Error relativo (%) |
|------------|-------------------------|----------------------|--------------------|
| 1 | 1.03 | 0.030 | 2.91 |
| 1.5 | 1.53 | 0.033 | 2.15 |
| 2 | 2.03 | 0.029 | 1.43 |
| 2.5 | 2.53 | 0.031 | 1.22 |
| 3 | 3.03 | 0.031 | 1.02 |
| 3.5 | 3.54 | 0.036 | 1.02 |
| 4 | 4.03 | 0.031 | 0.77 |
| 4.5 | 4.53 | 0.033 | 0.73 |
| 5 | 5.03 | 0.032 | 0.64 |
| 4.5 | 4.53 | 0.032 | 0.71 |
| 4 | 4.03 | 0.033 | 0.82 |
| 3.5 | 3.54 | 0.036 | 1.02 |
| 3 | 3.04 | 0.037 | 1.22 |
| 2.5 | 2.54 | 0.036 | 1.42 |
| 2 | 2.04 | 0.036 | 1.77 |
| 1.5 | 1.54 | 0.035 | 2.28 |
| 1 | 1.03 | 0.027 | 2.63 |

Tabla 4.3. Resultados obtenidos tras la calibración del manómetro de entrada.

Los resultados obtenidos (Tabla 4.4) para el manómetro de salida son:

| Peso (<i>bar</i>) | Manómetro salida (<i>bar</i>) | Error absoluto (<i>bar</i>) | Error relativo (%) |
|---------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| 1 | 0.99 | -0.003 | -0.30 |
| 1.5 | 1.50 | 0.002 | 0.13 |
| 2 | 2.01 | 0.006 | 0.30 |
| 2.5 | 2.54 | 0.042 | 1.65 |
| 3 | 3.01 | 0.014 | 0.46 |
| 3.5 | 3.61 | 0.107 | 2.97 |
| 4 | 4.02 | 0.020 | 0.50 |
| 4.5 | 4.60 | 0.100 | 2.17 |
| 5 | 5.02 | 0.016 | 0.32 |
| 4.5 | 4.52 | 0.020 | 0.44 |
| 4 | 4.02 | 0.021 | 0.52 |
| 3.5 | 3.52 | 0.020 | 0.57 |
| 3 | 3.02 | 0.021 | 0.70 |
| 2.5 | 2.52 | 0.016 | 0.64 |
| 2 | 2.01 | 0.010 | 0.50 |
| 1.5 | 1.50 | 0.002 | 0.13 |
| 1 | 1.00 | -0.002 | -0.20 |

Tabla 4.4. Resultados obtenidos tras la calibración del manómetro de salida.

Analizando los datos, se observa que los manómetros están calibrados correctamente, puesto que el error relativo (%) que se produce en algún punto se encuentra dentro del rango de incertidumbre necesario, así pues, se puede garantizar que los manómetros se encuentran en las condiciones óptimas para su ensayo.

4.4.4.- Ensayo con agua en el laboratorio.

El ensayo se realiza en el laboratorio Justo Nieto de la Universidad Politécnica de Valencia perteneciente al departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.

El prototipo en sí se asemeja mucho al esquema de la instalación que aparece en la Figura 4.8 del apartado 4.4.1. En ella el fluido entra por la parte inferior de la cámara después de haber sido impulsado por las bombas donde se encuentra instalada la ventosa y sale a través de ésta.

La instalación funciona gracias a un variador de frecuencia el cual mientras variamos dicha frecuencia, las bombas conectadas a dicho variador hacen pasar cada vez más caudal.



Debido a las limitaciones del laboratorio se trabaja en un rango de frecuencia de entre 20 a 100 Hz. Se irá aumentando la frecuencia de 5 en 5 hercios anotando para cada punto los valores de caudal volumétrico (en l/h) por medio de un caudalímetro electromagnético, así como su presión de entrada y salida (*bar*) y, por consiguiente, su valor diferencial (*bar*) mediante el uso de varios manómetros. Estos dos parámetros forman un punto de la curva de ensayo de agua con la ventosa.

Se opera de la misma forma hasta llegar a la frecuencia máxima permitida obteniendo así 14 puntos en función del caudal y de la diferencia de presiones.

4.5.- Aplicación de la semejanza hidrodinámica.

Este apartado se centra en presentar una nueva metodología de caracterización de ventosas basada en la caracterización de la misma en unas condiciones diferentes a las de funcionamiento y extrapolar dichos resultados mediante la aplicación de técnicas de semejanza hidrodinámica (Iglesias y otros, 2013).

Como primer paso, se parte de la hipótesis de incompresibilidad. Entonces, la diferencia de presiones entre la entrada y salida de la ventosa es:

$$h_m = \frac{\Delta p}{\gamma} = k \frac{v^2}{2g} \quad (4.2)$$

Siendo k el coeficiente adimensional de pérdidas de la ventosa, h_m la diferencia de altura de presión entre la entrada y la salida de la ventosa, v la velocidad característica del fluido (obtenida a partir del caudal Q y de una sección con diámetro D), g la gravedad, γ peso específico del fluido y Δp la diferencia de presiones entre la entrada y la salida.

La expresión anterior en función de la velocidad nominal de la ventosa queda:

$$h_m = k \frac{v^2}{2g} = \frac{8k}{\pi^2 D^4 g} Q^2 = RQ^2 \quad (4.3)$$

Por tanto, la resistencia del elemento R es función del caudal y de la diferencia de altura de presión que se obtienen tras el ensayo. Una vez calculado dicho parámetro R y dejando como diámetro de referencia el nominal de la ventosa, se puede despejar de su expresión el coeficiente de pérdidas adimensional de la ventosa, quedando:



$$k_{agua} = \frac{\pi g D_{ventosa}^4}{8} R \quad (4.4)$$

Siendo k_{agua} el coeficiente adimensional de pérdidas de la ventosa a la hora de ensayar con agua. Al aplicar la semejanza hidrodinámica, este coeficiente será el mismo cuando el fluido que pasa a través de la ventosa sea aire.

$$k = k_{agua} = k_{ventosa} = k_0 \quad (4.5)$$

Para poder representar la curva característica de la ventosa se expresan las pérdidas del elemento en función de la diferencia de presiones, en vez de la diferencia de alturas de presión y poder expresarlo en función del caudal másico.

$$h_m = \frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{\Delta p}{\rho g} \quad (4.6)$$

Siendo Δp la diferencia de presiones entre la entrada y la salida de la ventosa, ρ la densidad media del fluido calculada a partir de la ecuación de los gases ideales y considerando una presión de referencia y el aire como gas perfecto.

Como se suele representar la diferencia de presiones respecto al caudal másico y no al volumétrico, se puede establecer una relación entre ellos por medio de la densidad del fluido:

$$Q = \frac{G}{\rho} \rightarrow G = \rho \cdot Q \quad (4.7)$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores (de la 4.3 a la 4.6) en la ecuación (4.7), el caudal másico que expulsa la ventosa es:

$$G = \sqrt{\frac{\pi^2 D_{ventosa}^4}{8 k_0 R_g T}} \sqrt{\Delta p \cdot p_t} \quad (4.8)$$

En el capítulo 7 se recoge de forma comparativa los resultados obtenidos mediante la aplicación de la semejanza hidrodinámica comparados con los obtenidos mediante técnicas experimentales (ensayos) y mediante técnicas computacionales.



4.6.- Conclusiones.

En el presente capítulo se han analizado de forma comparativa tres formas diferentes de caracterizar las ventosas de admisión y expulsión de aire: caracterización directa con aire, caracterización con agua y caracterización mediante la aplicación de semejanza hidrodinámica. Del análisis de los resultados obtenidos pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La bondad de la metodología presentada se acentúa en la zona de funcionamiento habitual de estos dispositivos: normalmente presiones inferiores a 0.3 *bar*.
- Los diferentes modelos de representación de las ventosas son eficaces, quedando en última instancia todos ellos dependientes de un parámetro característico. La determinación de dicho parámetro resultará clave en la representación del comportamiento de estos dispositivos.
- El ensayo de las ventosas utilizando como fluido el agua en lugar del aire se ha mostrado como una alternativa razonable para la caracterización de las ventosas. La aplicación de la semejanza hidrodinámica se muestra válida para ser aplicada de forma general en la caracterización de ventosas.
- Las diferencias que aparecen al aumentar los efectos de compresibilidad del fluido son limitadas. Dichas diferencias en muchas ocasiones son incluso inferiores a las discrepancias existentes entre los datos ensayados y la información suministrada por el fabricante de la ventosa.

La metodología desarrollada puede ser aplicada no sólo a otros tipos de ventosas diferentes a las ensayadas en este trabajo, sino que puede aplicarse al estudio de otros fenómenos como el cierre anticipado de las ventosas, la influencia de los tramos de conexión o las condiciones de instalación.

Por todo ello, primero se tiene en cuenta la normativa actual al respecto, que junto con los estudios físicos en el laboratorio (tanto para aire como para agua) se puede ser capaz de garantizar la viabilidad de los análisis realizados en el software de simulación computacional de CFD.



5. UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS CFD PARA LA CARACTERIZACIÓN DE VENTOSAS.

5.1.- Introducción a la mecánica de fluidos computacional.

Al observar nuestro alrededor es posible contemplar multitud de fenómenos asociados a los fluidos y a las leyes que los rigen. Van desde el vuelo de un pájaro hasta el agua que fluye por una conducción, desde la aerodinámica de un coche de fórmula 1 hasta la fricción del traje de baño de un nadador, desde las emisiones de contaminantes por parte de industrias hasta el comportamiento atmosférico del aire. A partir de la curiosidad y necesidad de comprender el trasfondo del comportamiento de los fluidos, los científicos plantearon formulaciones para su estudio utilizando la formulación matemática.

No fue hasta finales del siglo XIX cuando Claude-Luis Navier y George Stokes formularon lo que a día de hoy conocemos como las ecuaciones de Navier-Stokes. Este conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales describen el movimiento de un fluido y son consecuencia de la ecuación de continuidad y la de cantidad de movimiento, por lo que al solucionar estas ecuaciones, se podría conocer el valor de las variables de un fluido tales como la velocidad, presión, temperatura, etc.

A la rama de la mecánica de fluidos que se ocupa de la obtención de estas soluciones mediante métodos numéricos se la denomina dinámica de fluidos computacional (CFD: *Computational Fluid Dynamics*).

Una definición más detallada podría ser aquella técnica capaz de predecir el flujo de fluidos, su transferencia de masa y energía, sus reacciones químicas y los fenómenos relacionados mediante la resolución de las ecuaciones matemáticas que gobiernan estos procesos, con la ayuda de un método numérico (Munson y otros, 1990). En otras palabras, la dinámica de fluidos computacional es el arte de reemplazar los sistemas de ecuaciones diferenciales parciales en un sistema algebraico de ecuaciones que pueden ser resueltas mediante el uso de ordenadores.

Actualmente el uso de esta herramienta ha cambiado de forma radical. Ha pasado de ser empleado sólo a nivel de investigación a ser utilizado como una potente herramienta en problemas aplicados de ingeniería de carácter industrial centrandolo la atención de los investigadores internacionales desde el auge de los computadores digitales. La atracción es doble:



- El deseo de modelar la realidad física que no puede ser medida o simulada de forma sencilla mediante métodos experimentales (García Mares y otros, 2011).
- El anhelo de investigar los sistemas fluidos de una forma económicamente más efectiva y más rápida que mediante procedimientos experimentales.

Como consecuencia, hay una demanda cada vez mayor de especialistas en la materia capaces de aplicar y desarrollar las técnicas CFD en compañías de ingeniería y organización de investigación.

5.2.- Ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos.

Las ecuaciones que describen el movimiento de un fluido se basan fundamentalmente en la ecuación de la Conservación de la Masa o ecuación de Continuidad y en la ecuación de la Conservación de la Cantidad de Movimiento.

Estas ecuaciones junto con la ecuación de la conservación de la Energía forman un sistema de ecuaciones diferenciales parciales no lineal. Además, estas ecuaciones se desarrollan bajo la hipótesis de que el fluido viscoso se estudia en un medio continuo y se haya en equilibrio termodinámico local.

En este apartado se desarrolla de forma más precisa la base matemática sobre la que se sustenta el análisis computacional.

5.2.1.- Ecuación de la Conservación de la Masa o de Continuidad.

La ley de Conservación de la Masa enuncia matemáticamente el principio según el cual se describe un fenómeno de transporte de partículas que no se crea ni se destruye, donde la variable fundamental es la densidad $\rho(x, t)$. En la formulación lagrangiana la ley dice:

$$\frac{d}{dt}(\rho J) = 0 \quad (5.1)$$

Siendo J el jacobiano de la deformación que sucede entre el momento $t = 0$ y el momento t en la situación de las partículas y d/dt indica la derivada a lo largo de las trayectorias, que tiene como fórmula:



$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \cdot \nabla = \frac{\partial}{\partial t} + \sum_1^3 u_i \frac{\partial}{\partial x_i} \quad (5.2)$$

En función de las derivadas parciales usuales; $u = (u_1, u_2, u_3)$ es la velocidad que va a ser variable fundamental. Así pues, si J es la medida de la expansión de volumen a lo largo de una trayectoria, como la masa se conserva, simplemente se dice que:

$$masa = \rho \cdot \forall = cte. \quad (5.3)$$

Siendo \forall el volumen que ocupa el fluido a lo largo de una trayectoria.

Esta ley se tradujo mediante el cálculo de la derivada en t de J :

$$\frac{dJ}{dt} = J \cdot (div u) \quad (5.4)$$

Se demuestra que la ecuación anterior es la misma que:

$$\frac{d}{dt}(\rho J) = \frac{d\rho}{dt}J + \rho J(\nabla \cdot u) = 0 \quad (5.5)$$

Se escribe $\nabla \cdot u = div u$ y como $J \neq 0$ se tiene la versión en derivada total respecto al tiempo:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot u = 0 \quad (5.6)$$

Aún se puede transformar la derivada total en parcial, llegando así a la fórmula que finalmente resulta:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (5.7)$$

5.2.2.- Ecuación de la Conservación de la Cantidad de Movimiento.

La ley de Conservación de la Cantidad de Movimiento describe la dinámica del medio fluido. Se comienza afirmando que la variación de la cantidad de movimiento se debe a la acción de fuerzas:

$$\rho \frac{du}{dt} = f_e(x, t) + f_c(x, t) \quad (5.8)$$

Siendo f_e el término referido a la fuerza debida a campos externos, como por ejemplo, el gravitatorio. La f_c se trata de la fuerza de contacto.

Por otra parte, la componente de presión se describe como:

$$f_p = -\nabla p \quad (5.9)$$

En los fluidos usuales, llamados newtonianos, el esfuerzo de contacto toma la forma de una fuerza viscosa, de la forma:

$$f_v(x, t) = \lambda \nabla(\nabla \cdot u) + \mu \Delta u \quad (5.10)$$

Siendo λ y μ los parámetros que describen la viscosidad y se pueden suponer en primera aproximación constantes medibles que dependen del fluido. Juntando todo, se llega a la ley:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{dt} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \lambda \nabla(\nabla \cdot u) + \mu \Delta u + f_e(x, t) \quad (5.11)$$

Siendo $u \cdot \nabla u$ el término no lineal que proviene del paso de derivadas totales en el tiempo a derivadas parciales y se le denomina término convectivo o de transporte.

5.2.3.- Las ecuaciones de Navier-Stokes. Fluidos viscosos.

Cuando se impone la incompresibilidad y se supone $\rho = 1$, el sistema de Navier-Stokes, toma la forma:

$$\frac{\partial u}{dt} + u \cdot \nabla u = -\nabla p + \nu \Delta u + f_e(x, t) \quad (5.12)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (5.13)$$

Siendo $\nu = \mu/\rho$ el parámetro que caracteriza la propiedad de viscosidad de cada fluido.



5.3.- Aplicaciones de los CFD.

En la actualidad son múltiples los campos a los que se aplica la dinámica de fluidos computacional. Algunos ejemplos son:

- Generación de energía: células de fuel, sistemas de estratificación térmica, generación hidroeléctrica, calderas y quemadores, sistemas de combustión, reactores nucleares, intercambiadores de calor,...
- Industria Aeroespacial y Militar: perfiles de alas, sistemas de misiles, bombas, sistema de combustión, estudio de salidas y toberas, estudio de rotores en vuelo, aerodinámica externa,...
- Industria Agroalimentaria: procesado y envasado de alimentos, diseño de equipos,...
- Industria de la Automoción: sistemas de aire acondicionado, sistemas refrigeración de motor, sistemas de distribución del aire, aerodinámica, deportes del motor, transporte ferroviario, chimeneas de combustión, confort de pasajeros,...
- Energías: petróleo, gas, nuclear, generación eléctrica, turbomaquinaria, células de combustible,...
- Industria Química: estudios de secado y filtración, control de emisiones, simulación de mezclas, procesado de materiales, reactores químicos,...
- Industria Electrónica: semiconductores, sistemas de refrigeración, almacenamiento magnético, procesamiento de plasmas, equipos de control térmico, controles de motores, hornos, telecomunicaciones,...
- Industria de la Construcción: simulación de incendios, materiales de construcción,...
- Industria Biomédica: equipos de esterilización, dosificación de medicamentos, manejo y separación de sangre, monitores de glucosa,...
- Industria Naval: diseño de proa y popa, vela,...
- Industria del Acero: fundiciones continuas, sistemas de vacío, purificación de aire, filtros de polvo y partículas, combustión, sistemas de producción de acero con atmósferas controladas,...
- Industria Marina y del Medio Ambiente: sistemas de flotación, sistemas de propulsión, diseño de velas, diseño de cascos y quillas, sistemas de decantación, sistemas de aireación,...

En los dos subapartados siguientes se describe con más detalle algún ejemplo donde se puede aplicar el estudio de los CFD.

5.3.1.- CFD en la Industria de la Automoción.

El desarrollo de la tecnología del túnel de viento en la Fórmula 1 se queda pequeño frente al crecimiento de los CFD. En el túnel se experimenta soplando aire contra un objeto real en un ambiente controlado y midiendo las fuerzas aerodinámicas que se generan. En cambio, en el CFD ese mismo experimento se realiza a través de la simulación por ordenador.

La Fórmula 1 ha invertido mucho en el desarrollo de sistemas y programas para CFD, y se sabe que esta herramienta es un requisito indispensable para el éxito. Los equipos han financiado este desarrollo con los mejores sistemas comerciales de CFD y así poder hacer posible una realidad al predecir el comportamiento de todo cuanto fabrican. A pesar de que son varias las industrias que han hecho crecer al CFD, la importancia de la Fórmula 1 ha sido más que significativa.

Los motivos por lo que los equipos emplean esta tecnología son la precisión, la previsión y la eficiencia.

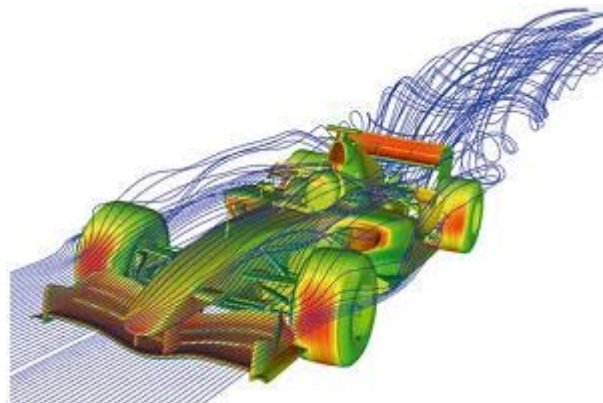


Figura 5.1. Imagen de perfil de líneas de corriente en un coche Fórmula 1.

5.3.2.- CFD en la Industria de la Construcción.

Las herramientas de CFD aplicadas en la Ingeniería de la Construcción a la seguridad de edificios en caso de incendio se utilizan tanto para diseñar los sistemas de protección contra incendios como para investigar fuegos reales. El cálculo computacional nos permite considerar múltiples escenarios de fuego y estimar sus consecuencias sin tener que realizar costosos experimentos para cada caso a analizar, ahorrando tiempo y dinero.

La aplicación de CFD ha experimentado un notable desarrollo en los últimos años, motivado por la creciente viabilidad del uso de estas herramientas por mejoras técnicas y reducción de costes.

Los resultados obtenidos pueden ser de aplicación para comprobar el comportamiento de estructuras, determinar los procedimientos de actuación en caso de incendio, distribución de temperaturas (Figura 5.2), disposición y dimensionamiento de medios de evacuación de humos,...

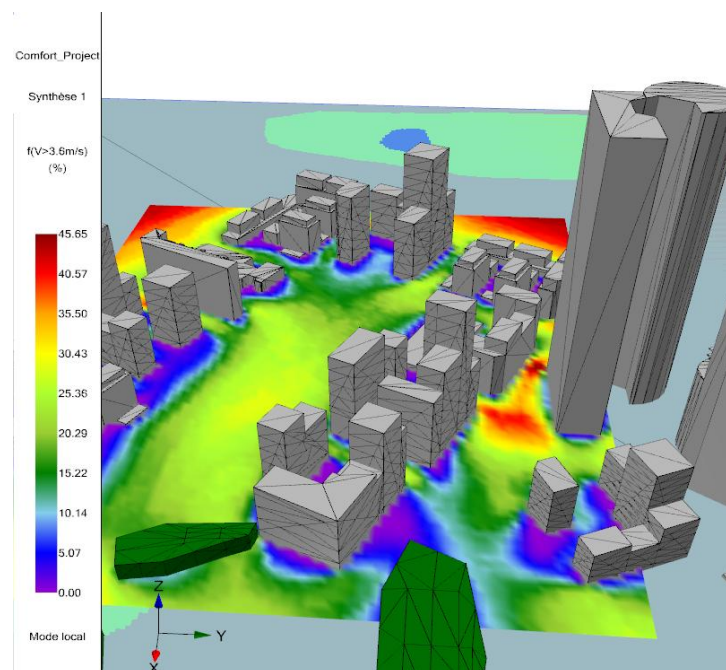


Figura 5.2. Distribución de temperaturas mediante técnicas CFD.

5.4.- Método de trabajo de un modelo CFD.

Los modelos CFD se estructuran en torno a los algoritmos numéricos que pueden hacer frente a problemas de flujo de fluidos. Con el fin de proporcionar un acceso más sencillo para su resolución, todos los paquetes de CFD comerciales incluyen interfaces de usuario sofisticadas para introducir los parámetros de entrada del problema y examinar los resultados (Versteeg y Malalasekera, 1995). Por lo tanto, todas las simulaciones numéricas de CFD están compuestas por tres etapas: Un pre-procesado, un programa de solución (*Solver*) y un post-procesado. En los siguientes subapartados se comenta brevemente la función de cada uno de estas fases dentro del contexto de CFD.



5.4.1.- Pre-procesado.

El pre-procesado consiste en la introducción de datos en un problema de flujo mediante el uso de un programa de CFD. Las acciones que se realizan en esta etapa son las siguientes:

- Definición de la geometría de la región de interés, ya sea en el mismo paquete de modelado de CFD o importándola desde un programa de modelado CAD.
- Generación de la malla: el dominio computacional generado se discretiza o divide espacialmente en celdas para formar una malla.
- Definición de las propiedades físicas del fluido tales como la temperatura o la velocidad, que son calculadas en cada uno de estos volúmenes como solución de las ecuaciones fundamentales.
- Especificación de las condiciones de contorno adecuadas a las celdas que se encuentran dentro del dominio a calcular.

La solución a un problema de flujo (velocidad, presión, temperatura, etc) se define en los nodos dentro de cada una de las celdas. La precisión de una solución de CFD se rige por el número de celdas del mallado del dominio de interés. En general, cuanto mayor es el número de celdas, mejora la precisión de la solución. Tanto la exactitud de una solución como su coste computacional y el tiempo de cálculo dependen de la finura de la malla.

Más del 50% del tiempo empleado en la industria en un proyecto de CFD se dedica a la definición de la geometría de dominio y la generación de una malla adecuada. Con el fin de maximizar la productividad del personal de CFD todos los principales modelos incluyen ahora en su propia interfaz, la opción para importar los datos desde herramientas de modelado CAD.

5.4.2.- Solver.

Es la parte del análisis donde se resuelven las ecuaciones fundamentales en cada una de las celdas del mallado realizado en la fase del pre-procesado. Para que el software de análisis computacional sea capaz de resolver las ecuaciones que describen el comportamiento del flujo, éstas han de ser transformadas en expresiones linealizadas, que posteriormente se resuelvan mediante algoritmos iterativos. La transformación de las ecuaciones diferenciales a ecuaciones lineales es lo que se llama discretización numérica.

A la hora de resolver el problema, puede ser de utilidad visualizar los residuos mientras el programa resuelve las ecuaciones de forma iterativa. El residuo es la medida que nos asegura que la solución calculada cumple las ecuaciones discretizadas.

En resumen el algoritmo numérico incluye los siguientes pasos:

- Integración de las ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos a través de todo el volumen de control del dominio.
- Discretización: conversión de las ecuaciones diferenciales que resultan en una sistema, en ecuaciones algebraicas o lineales.
- Solución de las ecuaciones algebraicas por un método iterativo que respete la condición de convergencia.

5.4.3.- Post-procesado.

Esta última etapa consiste en la interpretación de la solución obtenida en la fase anterior de cálculo. Si consideramos que la solución se acerca a la realidad la podemos adoptar como válida, y por tanto, extraer resultados de salida.

Entre otros, algunos de los resultados obtenidos que se pueden analizar son:

- Visualización de la geometría.
- Representación 2D y 3D de la malla.
- Mapas vectoriales y de contorno.
- Simulación del flujo dinámico.
- Extracción de resultados (presiones, caudales, fuerzas, etc).

Por ejemplo, en la Figura 5.3 se representa la variación de la presión a la entrada de la ventosa modelo IRUA 930 a lo largo de la fase de cálculo.

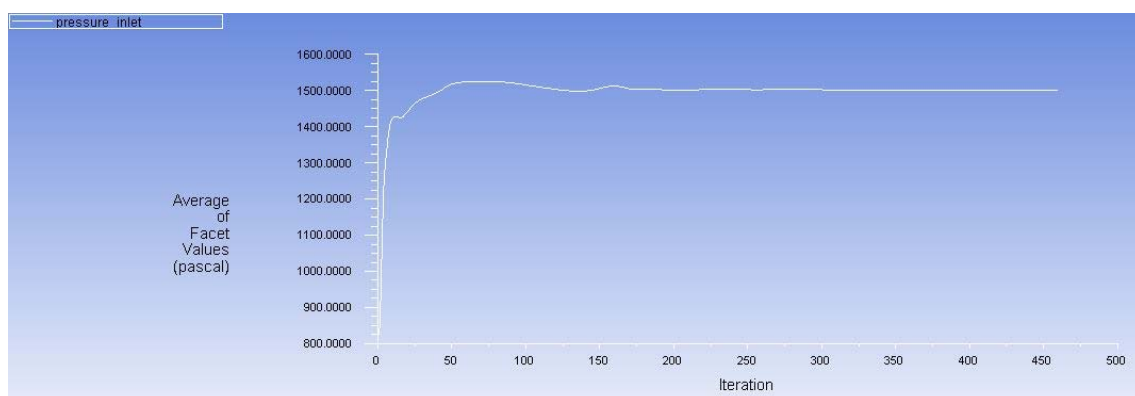


Figura 5.3. Evolución de la presión a la entrada de la ventosa modelo IRUA 930.



5.5.- Ventajas e inconvenientes de los CFD.

Si se cuenta con un dispositivo o un diseño de un sistema el cual presenta dificultades en su prototipo o la hora de realizar pruebas experimentales para comprobar y verificar su diseño, el uso de las herramientas CFD permite conocer virtualmente el comportamiento del funcionamiento interior. Existen muchos fenómenos que se pueden evidenciar a través de CFD, que no se puede apreciar mediante ningún otro método. El CFD ofrece un conocimiento interno más detallado de los diseños.

Las principales ventajas que tiene el uso de la herramienta CFD son:

- **Costes relativamente bajos.** La utilización de modelos físicos y ensayos para obtener datos esenciales en ingeniería puede ser bastante costoso. Las simulaciones mediante CFD son relativamente económicas y los costes disminuyen conforme los computadores se vuelven más potentes.
- **Velocidad.** Las simulaciones CFD pueden ejecutarse en un periodo de tiempo relativamente corto. Se obtiene una visualización y animación del proceso en términos de las variables del fluido obteniendo conclusiones sumamente interesantes.
- **Capacidad de simular condiciones reales.** Muchos flujos y procesos de transmisión de calor no pueden ensayarse fácilmente. Los CFD permiten la posibilidad de analizar el comportamiento teórico bajo cualquier condición física, es decir, predice las propiedades del fluido con gran detalle en el dominio estudiado.
- **Capacidad para simular condiciones ideales.** Los CFD permiten un gran control sobre los procesos físicos y ofrecen la posibilidad de aislar determinados fenómenos para su estudio.
- **Información comprensible.** Los experimentos únicamente permiten obtener datos en un número determinado de puntos del sistema. Los CFD permiten analizar lo ocurrido en un gran número de puntos de la región de interés.

Las principales desventajas que tiene el uso de la herramienta CFD son:

- **Modelos físicos.** Las soluciones de los CFD dependen de procesos reales de la vida real (turbulencia, compresibilidad, química, flujo multifásico, etc.). Las soluciones de los CFD son tan precisas como los modelos físicos en los que se basan.
- **Errores numéricos.** La resolución de las ecuaciones en un computador introduce inevitablemente errores numéricos.



1. Errores de redondeo: están asociados al tamaño de los datos procesados durante el cálculo. Estos errores siempre existen, aunque son pequeños en muchos casos.
 2. Error de truncamiento: debido a las aproximaciones en los modelos numéricos. Los errores de truncamiento tienden a cero conforme la malla es más fina. El refinamiento de la malla es la única forma de tratar con el error de truncamiento aumentando de esta forma el coste computacional (elevado número de celdas).
- **Condiciones de contorno.** Al igual que ocurre con los modelos físicos, la precisión de una solución mediante CFD es únicamente buena si lo son, tanto las condiciones iniciales como las condiciones de contorno del modelo numérico.

5.6.- Estudio de la turbulencia.

El tratamiento de la turbulencia es un problema complejo al que se han dedicado innumerables investigaciones debido a que afecta sensiblemente a la exactitud de los resultados, determinando el comportamiento del flujo de aire y agua. Igualmente el grado de refinamiento de la discretización espacial para la resolución de las ecuaciones fundamentales, afecta sensiblemente a la exactitud de las simulaciones experimentales.

En la mecánica de fluidos, la turbulencia se entiende como el movimiento desordenado del fluido, obligando así a la modificación de las ecuaciones de Navier-Stokes para estimar una solución más exacta con las nuevas condiciones reales.

El parámetro adimensional que permite predecir el carácter turbulento o no del flujo es el número de Reynolds, que se define como:

$$Re = \frac{F_{inerciales}}{F_{viscosas}} = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu} \quad (5.14)$$

Siendo ρ la densidad del fluido, u la velocidad media del fluido, L el largo característico, μ la viscosidad dinámica del fluido y ν la viscosidad cinemática del fluido.

Para valores relativamente bajos del número de Reynolds el flujo es laminar, en cambio, para valores altos de éste el flujo será turbulento como son la gran mayoría de los flujos presentes o estudiados en el ámbito de la ingeniería.

En la Figura 5.4 se muestra la diferencia en la trayectoria dependiendo si el flujo es laminar o turbulento.

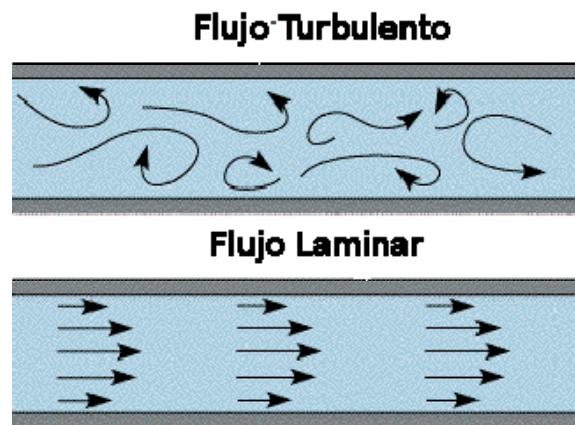


Figura 5.4. Diferencia entre flujo laminar y flujo turbulento.

El desarrollo de las técnicas CFD ha dado lugar a varios modelos de turbulencia que se pueden agrupar en tres categorías que se comentan con más profundidad en los siguientes subapartados.

5.6.1.- Modelos promediados de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS).

Los modelos RANS se basan en la promediación de las ecuaciones del fluido, para el cual todas las magnitudes se sustituyen por la suma de su valor medio y una componente fluctuacional. Después de promediarlas se obtienen términos adicionales que requieren la adición de otras ecuaciones para cerrar el sistema (Capote y otros, 2008). Se presentan dos variantes principales de promediación: la de Reynolds y la de Favre. Esta última emplea magnitudes promediadas por unidad de masa, de tal forma que se transforma en:

$$f = \bar{f} + f'' \quad (5.15)$$

Siendo $\bar{f} = \overline{\rho f} / \bar{\rho}$ la magnitud promediada por unidad másica.

En todos los casos la dificultad para el cierre del sistema de ecuaciones se deriva de la elección de ecuaciones para representar el tensor de tensiones τ_{ij} que representa las tensiones turbulentas de Reynolds. Para ello, se emplea la suposición según la cual:

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}) \right) \quad (5.16)$$



$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (5.17)$$

Siendo μ_t el coeficiente de viscosidad dinámica considerando la densidad promediada.

Existen en la actualidad diferentes métodos o modelos de solución para el RANS encaminados a calcular este coeficiente de viscosidad. Los grandes grupos se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Modelos de cero ecuaciones.
- Modelos de una ecuación.
- Modelos de dos ecuaciones.
- Modelos de más ecuaciones.

5.6.2.- Modelos de Simulación de Grandes Remolinos (LES).

El modelo LES se basa en un filtrado espacial de las ecuaciones de gobierno del fluido de tal manera que se resuelven computándose las grandes escalas (el movimiento turbulento de grandes remolinos), mientras que para escalas más pequeñas se asume un modelo que permite considerar de forma aproximada su influencia en la variación general de los parámetros del flujo.

Teóricamente esto corresponde al filtrado matemático de las ecuaciones de conservación mediante la convolución de éstas con diferentes funciones filtrantes, que pueden ser de dependencia espacial o frecuencial. Comúnmente se emplean dos funciones espaciales, una de tipo rectangular y otra gaussiana y una frecuencial de tipo filtro pasa bajo. Las más empleadas son las de filtrado espacial. Producto de este filtrado todas las variables de las ecuaciones se representan como la suma de una componente de fondo (filtrada) y otra adicional fluctuante. Esto trae como consecuencia la aparición de nuevas variables en el sistema de ecuaciones que obliga a emplear expresiones adicionales para cerrar el sistema. Precisamente estas expresiones de cierre constituyen la modelación de los componentes turbulentos de menor escala espacial.

De acuerdo al método de filtrado y a la forma concreta de las expresiones de cierre se conocen varios submodelos dentro del LES, algunos de los cuales se muestran a continuación.

- Submodelo de Smagorinsky.
- Submodelo de similaridad de escala.
- Submodelo dinámico de Germano.

- Submodelos de función estructural.
- Detached Eddy Simulation (DES).

5.6.3.- Modelos de Simulación Numérica Directa (DNS).

El modelo de simulación numérica directa trata de resolver las ecuaciones de Navier-Stokes de una forma directa, sin emplear más valores promedios o aproximaciones que las discretizaciones numéricas. Por lo tanto, es el más completo en cuanto a la exactitud de los resultados que ofrece.

El problema principal del modelo DNS es que el tamaño de las celdas para la solución de los remolinos en todas las escalas de existencia debe ser tan pequeño que la potencia computacional existente limita las dimensiones de la ventosa a las cuales puede actualmente aplicarse.

5.6.4.- Comparación entre modelos.

El tratamiento que diferentes los modelos dan al movimiento turbulento diferenciando su escala longitudinal puede apreciarse en la figura 5.5, donde se muestra el espectro de la energía cinética de la turbulencia k en función del número de onda $\chi = 2\pi/\lambda$. Este gráfico recoge la esencia de lo expuesto en los apartados precedentes, siendo χ_c el número de ondas a partir del cual los modelos LES modelan los parámetros del fluido.

Aun así, se puede decir que en RANS el objetivo es el de aumentar la resolución espacial por medio de un promedio en el tiempo, la resolución espacial por ende puede ser muy grande, Por el contrario LES sacrifica resolución espacial para obtener resolución temporal y no hay necesidad de un promedio en el tiempo.

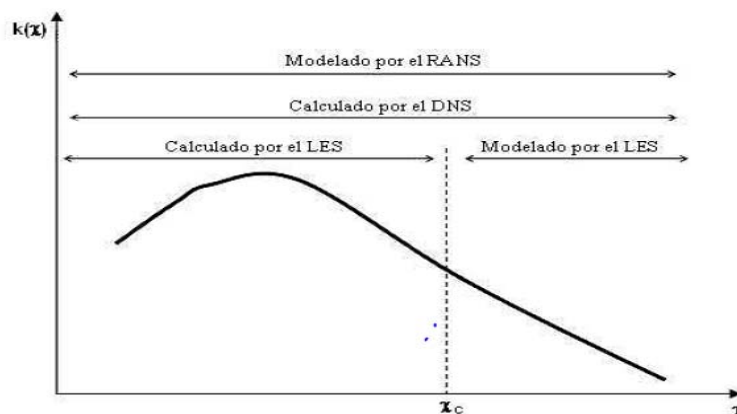


Figura 5.5. Comparativa entre los tres grandes tipos de modelos de turbulencia (Capote y otros, 2008).



5.7.- Softwares comerciales. Ansys Fluent.

Actualmente existen varias empresas que se han dedicado a programar y ofrecer softwares que resuelven problemas de fluidos usando CFD. Algunos de ellos son: *Ansys CFX*, *OpenFOAM*, *Star-CD*, *Ansys Fluent*, *Flow 3D*, *Phoenix*, etc. La diferencia entre ellos son las capacidades adicionales que tienen, es decir, características muy puntuales para resolver problemas.

Para el desarrollo de los cálculos del presente trabajo es necesario un paquete de simulación computacional llamado *Ansys Fluent*, junto con los módulos *Ansys DesignModeler* y *Ansys Meshing*. Se utilizará la versión disponible (Licencia corporativa) de dicho paquete de simulación en la UPV, por lo tanto, se debe adaptar el trabajo a las limitaciones de dicha licencia.

Este programa de CFD está basado en métodos de discretización de volúmenes finitos que permite combinar las ecuaciones tridimensionales del flujo de fluidos (ecuaciones de Navier-Stokes) con modelos de transporte de masa y seguimiento de concentraciones.

El software *Ansys Fluent* contiene las amplias características de modelado físico que se necesitan para modelar flujos, turbulencias, transferencias de calor y reacciones para aplicaciones industriales.

Hoy en día, cientos de empresas de todo el mundo se benefician del uso del software *Ansys Fluent* como parte integral del diseño y de las fases de optimización de su desarrollo de producto. La avanzada tecnología del *Solver* ofrece resultados CFD rápidos y precisos, mallas flexibles, en movimiento y deformables y una escalabilidad en paralelo de primera clase. Las funciones definidas por el usuario permiten la implementación de nuevos modelos de usuario y una amplia personalización de los existentes.

Las características interactivas de ajuste, solución y post-procesado del *Solver* de *Ansys Fluent* facilitan hacer pausas en un cálculo, examinar los resultados con el post-procesado integrado, realizar cambios y ajustes, y luego continuar con el cálculo dentro de la misma aplicación.

La integración de *Ansys Fluent* en *Ansys Workbench* permite a los usuarios crear conexiones bidireccionales de primer nivel con los principales sistemas CAD, una potente herramienta de creación y modificación de geometrías con la tecnología *Ansys DesignModeler* y tecnologías de mallado avanzado con *Ansys Meshing*.



5.8.- Conclusiones.

Podemos pensar que los softwares CFD y más en concreto el *Ansys Fluent* nos ofrezca estas capacidades de predicción y que nos parezcan la panacea, pues pulsamos un botón y obtenemos una solución.

En primer lugar, se puede perder de vista que la solución debe ser acorde a la realidad, es decir, de nada sirve una posible solución si no se aproxima a los experimentos físicos reales. Es por esto, que cualquier simulación numérica debe buscar un método de validación experimental y/o analítica. De nada sirve visualizar campos de presiones y velocidades, si los datos plasmados en la respuesta son falsos.

Por esta razón, es altamente recomendado que cualquier simulación numérica lleve un proceso de validación y control de calidad de resultados. Esto garantiza la confiabilidad de los datos obtenidos.

En definitiva, la tendencia de la industria mundial al utilizar este tipo de herramientas es utilizar siempre ambos métodos de diseño, pruebas experimentales y simulaciones numéricas; las pruebas experimentales necesitan de simulaciones numéricas y viceversa, obteniendo los mismos resultados.



6. ESTUDIOS PRELIMINARES.

6.1.- Geometría.

6.1.1- Introducción al software de modelado CAD en 3D. Autodesk Inventor Professional.

Para el dimensionado de la geometría de un elemento cualquiera existen dos posibles métodos de modelado. Uno de ellos es la realización de la geometría en el propio paquete de simulación computacional *Ansys* mediante el uso de la herramienta *Geometry*. Este paquete se basa en la utilización de operaciones de modelado básicas generando así geometrías relativamente sencillas siendo un diseño completamente paramétrico donde se podrán modificar las dimensiones siempre que se desee. Por otra parte, el otro método de representación sería la utilización de un software de modelado mediante el uso de herramientas CAD más orientado a geometrías complejas.

Éste segundo método es el que se utiliza en el presente trabajo ya que la estructura de la ventosa posee una gran cantidad de elementos de una dificultad gráfica considerable. El gran inconveniente de este método es la poca escalabilidad de los parámetros, es decir, en muy pocos casos se puede modificar alguna de las dimensiones de la ventosa en el propio paquete de simulación de CFD, únicamente pudiendo hacerlo en el paquete de modelado CAD, por lo que habría que volver a importar de nuevo la geometría.

Así pues, se utiliza un paquete basado en técnicas de modelado paramétrico para sólidos en 3D. Entre estos paquetes se puede elegir entre una gran variedad como son el *SolidWorks*, *Pro/ENGINEER*, *Catia*, *Solid Edge*, *Autodesk Inventor*,...

En el caso de estudio del presente trabajo se utiliza el paquete de modelado gráfico *Autodesk Inventor Professional*. Este programa permite modelar la geometría, dimensión y material de manera que si se alteran las dimensiones, la geometría se actualiza automáticamente basándose en las nuevas dimensiones.

Los bloques de construcción esenciales de Inventor son las piezas. Éstos se crean definiendo las características, que a su vez se basan en bocetos o dibujos en 2D (Figura 6.1). La ventaja de este diseño es que todos los bocetos y las características se pueden corregir más adelante, sin tener que hacer de nuevo la partición entera.

Este sistema de modelado es mucho más intuitivo que en softwares antiguos de modelado, en los que para cambiar dimensiones básicas, era necesario generalmente suprimir el archivo entero y comenzar de cero.



Figura 6.1. Menú de selección para el desarrollo de bocetos en Autodesk Inventor Professional.

Como parte final del proceso, las partes se conectan para hacer ensamblajes (Figura 6.2). Los ensamblajes pueden consistir en piezas u otros ensamblajes. Las piezas son ensambladas agregando restricciones entre las superficies, bordes, planos, puntos y ejes. Otras restricciones incluyen: coincidencia, nivelación, inserción, ángulo, tangente, transicional, movimiento, sistema de coordenadas de usuario, entre otros.

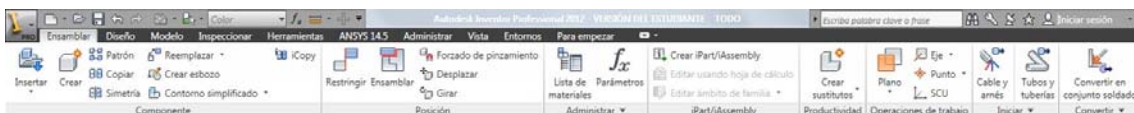


Figura 6.2. Menú de selección para el desarrollo de ensamblajes en Autodesk Inventor Professional.

Este método de modelado permite la creación de ensamblajes muy grandes y complejos como es el caso del modelado de la ventosa modelo IRUA 930 a caracterizar, especialmente porque los sistemas de piezas pueden ser puestos juntos antes de que se ensamblen en el ensamblaje principal. Además, algunos proyectos pueden tener muchos ensamblajes parciales, como también ocurre en el caso de la ventosa a diseñar.

Inventor utiliza formatos específicos de archivo para las piezas (.ipt), ensamblajes (.iam), vista del dibujo (.idw y .dwg) y presentaciones (ipn). A pesar de toda esta cantidad de formatos, *Ansys* no es capaz de leer ninguno de ellos, por lo que tendremos que exportar desde *Inventor* con un formato válido en la herramienta de *Geometry* del paquete *Ansys Fluent*. Entre los formatos disponibles están: los archivos IGES (.igs), los archivos SAT (.sat), Parasolid (.x_b)... Entre todos éstos, se elige el formato Parasolid (.x_b) debido a su gran versatilidad y a la poca memoria ocupada.

6.1.2.- Proceso de modelado de la geometría mediante herramientas CAD.

Una vez introducido el marco de trabajo se pasa al análisis de la ventosa en sí. Lo primero que se ha hecho ha sido desmontar la ventosa en el laboratorio junto con el personal técnico del mismo, resultando un total de 21 piezas indivisibles.

Dichas piezas son: el cuerpo principal, el flotador en forma de esfera, dos almohadillas del mismo diámetro pero diferente grosor alojadas en el flotador, una tapa cuadrada con 4 agujeros roscados que apoya sobre el cuerpo principal, un neumático situado en la tapa cuadrada, 4 tornillos de rosca con cabeza hexagonal cada uno de ellos junto con una arandela (también 4), una tapa superior, 3 tornillos alojados en la tapa superior y 3 cilindros huecos que se encuentran dentro de los tornillos de la tapa superior.

Posteriormente, se han realizado unos pequeños bocetos así como notas de las medidas oportunas (longitudes, ángulos, diámetros,...) para cada una de las piezas mediante la ayuda de instrumentos de medida como son un pie de rey, un compás y un juego completo de reglas. Lo recomendable habría sido disponer de los planos originales de la ventosa para poder trabajar con ellos, evitando así posibles errores en la medición de los elementos que componen la ventosa.

Como se trata de un elemento con una geometría compleja y requiere de una gran precisión a la hora de ajustar su geometría, se ha decidido modelar todas y cada una de las 21 piezas por separado para evitar posibles errores originados por la configuración directa de la ventosa como una única pieza.

Una vez obtenidos los datos necesarios de cada una de las piezas de la ventosa, ya se puede modelar cada una de éstas mediante el software antes introducido: *Autodesk Inventor Professional*. Se abre, y se crea un archivo nuevo (Nuevo, Normal.ipt). Ahora ya somos capaces, junto con las medidas tomadas en el laboratorio, de modelar todas las piezas de la ventosa modelo IRUA 930 (Figura 6.3) por separado.



Figura 6.3. Ventosa modelo IRUA 930 de DN 80 mm (3").

Hay que tener en cuenta, que en la modelización de cada una de las piezas es muy aconsejable establecer ejes de simetría, facilitando así la posterior unión o ensamblaje de todas ellas a fin de evitar desacoplamiento.

Una vez se han modelado las 21 piezas de la ventosa, el objetivo es juntarlas para formar un todo, es decir, la ventosa. Como se ha comentado anteriormente, en gran parte de los proyectos de dificultad considerable, como es este caso, se puede llegar a tener algunos ensamblajes parciales que posteriormente se vuelven a ensamblar entre sí para la consecución del ensamblado total. Esto no afecta en el resultado final puesto que son una serie de pasos intermedios necesarios para la consecución final de la ventosa.

El subsistema de ensamblaje parcial 1 (Figura 6.4) está formado por el flotador en forma de esfera, junto con las dos almohadillas (tanto la grande como la pequeña a pesar de que no se aprecie la separación entre ellas).



Figura 6.4. Ensamblaje parcial 1: Flotador.

El subsistema de ensamblaje parcial 2 (Figura 6.5) es el cuerpo principal junto con el subsistema de ensamblaje parcial número 1.

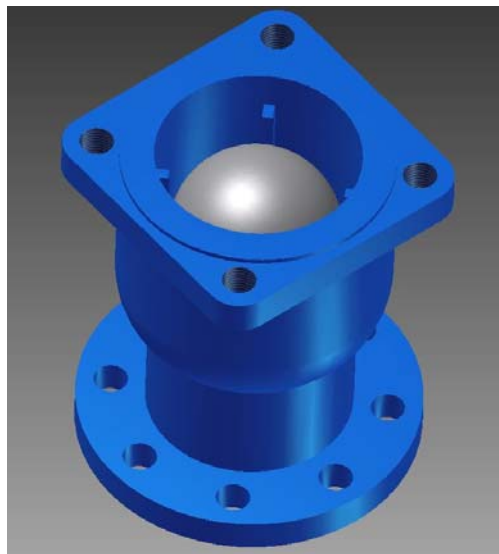


Figura 6.5. Ensamblaje parcial 2: Cuerpo principal y Flotador.

El subsistema de ensamblaje parcial 3 (Figura 6.6) es el formado por el ensamblaje número 2 junto con la tapa cuadrada y sus respectivos cuatro tornillos de cabeza hexagonal, cada uno de ellos con su arandela correspondiente.



Figura 6.6. Ensamblaje parcial 3: Ventosa sin la tapa superior.

Por último, el subsistema de ensamblaje parcial 4 (Figura 6.7) que resulta ser la ventosa completa, está formado por el ensamblaje parcial número 3 y la tapa superior unida a la tapa cuadrada mediante los 3 tornillos, cada uno de ellos introducido en su cilindro hueco correspondiente que hace de unión entre las dos tapas.

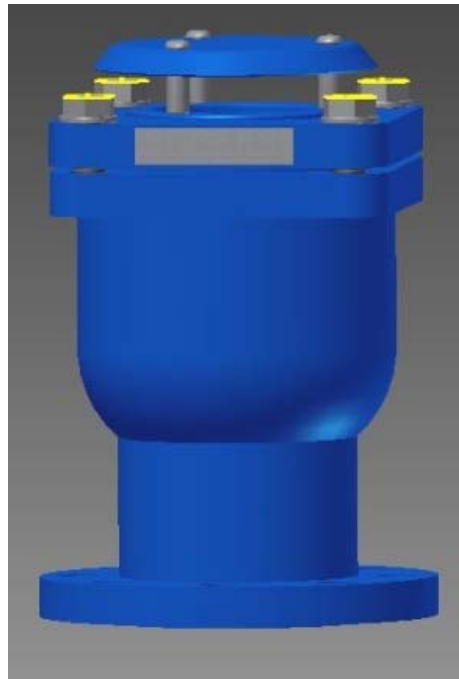


Figura 6.7. Ensamblaje parcial 4: Ventosa completa.

6.1.3- Importación de la geometría.

Ya se tiene la ventosa modelizada en *Autodesk Inventor*. Ahora se pasa el archivo (.iam) a uno de los formatos que lee *Ansys*.

Como bien se ha comentado en el apartado anterior se ha elegido el formato Parasolid (.x_b) para la exportación a *Ansys*. Se efectúa dicho cambio de la siguiente manera: (Exportar, Formato de Cad) y en tipo se pone el formato elegido.

Llega la hora de abrir el programa de modelado mediante CFD, donde se crea un paquete de datos denominado *Fluid Flow (Fluent)*. Este paquete incluye 5 funciones principales a las que se puede acceder y modificar, y son: *Geometry*, *Mesh*, *Setup*, *Solution* y *Results*. Este apartado se centra en la herramienta de *Geometry*.

Antes de importar la ventosa, es necesario definir en el modelo computacional si el flujo es bidimensional o tridimensional, en este caso se aborda el análisis de forma tridimensional.

Para importar directamente la ventosa modelizada, se puede abrir la opción de *Geometry* y se importa el archivo con formato Parasolid (.x_b). Posteriormente se selecciona la opción *Generate* donde aparecerá el modelo de ventosa ya en el programa *Ansys*, cosa que se lleva persiguiendo durante todo este tiempo.

6.1.4.- Creación del volumen del fluido interior.

Pero realmente el interés se centra en el estudio del fluido que se desplaza por el interior de la ventosa y no la ventosa en sí, por lo que para la caracterización de la misma se tiene que efectuar una serie de pasos en el software de análisis computacional de CFD para simular el volumen que el fluido alojaría cuando éste circule por el interior de la ventosa.

El procedimiento a seguir es: en primer lugar, cerrar mediante una superficie ficticia la parte de la entrada de la ventosa mediante la opción *Surfaces From Edges*, aislando por completo el interior de la ventosa, donde posteriormente se hace un llenado mediante la opción *Fill* seleccionando la superficie antes creada, para que así se cree la estructura de la parte interior de la ventosa por la que pasaría el fluido correspondiente.

Así pues se formarán dos partes bien diferenciadas: la parte sólida (*Solid*) que corresponde a la ventosa, la cual se desactiva porque no es de interés en el análisis computacional; y la parte interior (*Fluid*) que será la que se activa para así a la hora de realizar el mallado, únicamente lo haga en el volumen interior.

Una vez se ha generado el llenado de la ventosa y comprobado que era prácticamente simétrico por ser cilíndrico el recorrido del aire, se considera práctico y razonable el simplificar a un cuarto dicha ventosa, con lo que posteriormente se puede realizar un estudio del mallado más preciso, así como la disminución del número de celdas y obtener resultados más exactos en el proceso de cálculo como, por ejemplo, en los análisis de agua y aire a la entrada y salida de la ventosa. Esta simplificación se realiza creando dos planos perpendiculares entre si y seleccionándolos mediante la opción *Symmetry* (Figura 6.8).

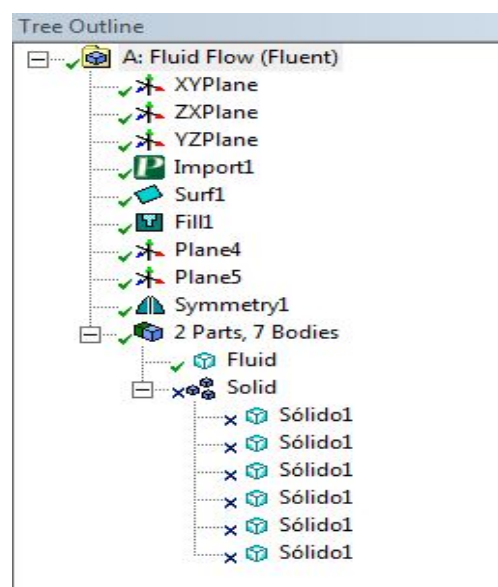


Figura 6.8. Operaciones de la geometría en Ansys Workbench.

Cabe tener en cuenta a la hora de extraer resultados finales, que parámetros como pueden ser el caudal, flujos de aire, etc. tendrán que ser multiplicados por cuatro cuando se quiera conocer los resultados de la ventosa completa, ya que si no se estaría obteniendo únicamente los valores del cuarto de ventosa.

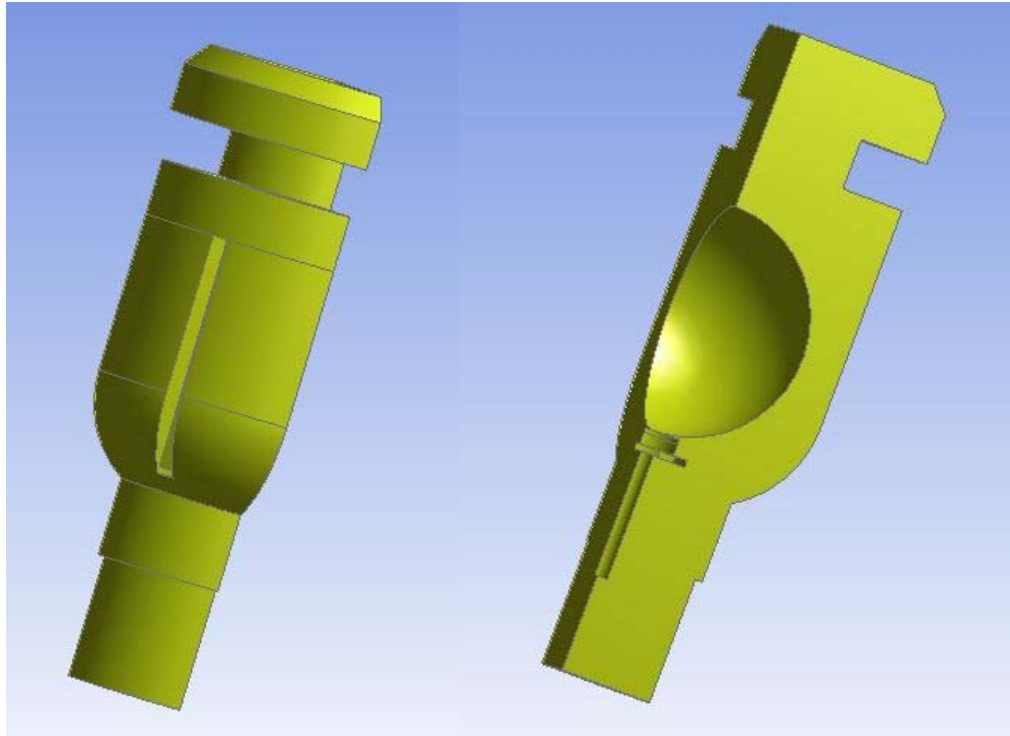


Figura 6.9. Fluido interior de la ventosa modelo IRUA 930 en Ansys Workbench.

6.2.- Mallado.

6.2.1.- Introducción al mallado en el análisis computacional de CFD.

Este apartado se centra en una de las fases más críticas en el diseño del modelo de la ventosa y, por lo tanto, una de las que más tiempo se ha necesitado para su resolución.

La generación de mallas es uno de los aspectos más complejos de simulación en ingeniería. Un gran número de celdas pueden dar soluciones muy largas, y muy pocas pueden llevar a resultados inexactos. La tecnología de *Ansys Meshing* proporciona un medio para equilibrar los requisitos y obtener la malla adecuada para cada simulación de la manera más automatizada.



El dominio se discretiza en una serie de volúmenes de control finitos. Esta discretización es lo que se denomina ‘malla’ (*mesh* o *grid*). Por lo tanto, a cada una de estas mallas se les aplica las correspondientes ecuaciones de conservación (normalmente de carácter diferencial) que se convierten en ecuaciones algebraicas a la hora de extraer resultados.

En el proceso de mallado se pueden encontrar una serie de problemas que se deben evitar para obtener resultados correctos en estudios y análisis posteriores. Algunos de estos errores pueden ser: la generación de una malla demasiado gruesa, la presencia de valores altos de asimetría, grandes saltos de volumen en celdas adyacentes, malla inapropiada en zonas de la capa límite, etc.

Por el contrario, la elección de una malla apropiada puede depender de aspectos como: la complejidad de la geometría, la correcta utilización de la adaptación de la malla, el campo de velocidades en el que se realice el análisis, etc.

6.2.2.- Diseño y generación de una malla inicial.

Una vez se tiene la geometría perfectamente generada, el estudio se centra en la definición del mallado y celdas en las que se van a calcular cada una de las variables discretizadas. Para ello se utiliza la herramienta *Mesh*, que se trata del segundo escalón del paquete *Fluid Flow (Fluent)* del software de simulación computacional.

Al arrancar dicha herramienta ya se es capaz de comenzar a diseñar una posible malla inicial. Antes de presentar las cuatro opciones globales del mallado podemos decir que existen dos tipos de mallado: el estructurado y el no estructurado. Los mallados estructurados están formados por rectángulos o paralelepípedos colocados dentro de la geometría analizada de forma más o menos ordenada. Este tipo de mallados por su disposición resultan de un cálculo más rápido, pero dada la geometría interior de la ventosa con elementos de sujeción del flotador de tamaño pequeño y un recorrido del aire en su interior con bastantes cambios de dirección, puesto que se trata de una esfera, se ha optado por un mallado no estructurado.

Dicho mallado, está formado por hexaedros, lo que permite ajustarse mejor a las complejas formas del interior de la ventosa suponiendo un coste computacional mayor.

Mesh, presenta cuatro opciones generales de mallado:

- *Defaults*: En esta opción no se tiene la opción de variar ningún parámetro puesto que únicamente se fija el proceso físico de análisis que es CFD y el modelo de cálculo que es *Fluent*.



- *Sizing*: En esta opción sí que se va a tener la opción de poder cambiar valores especificando los parámetros de tamaño, como son: curvatura, proximidad, tamaño de malla, tasa de crecimiento, etc.

En primer lugar, se define cómo se tienen que adaptar las celdas en la geometría y debido a que en el interior de la ventosa se aloja el flotador, que se trata de una superficie esférica, se necesita adaptar las celdas en cuanto a la proximidad de cambios de contorno y a las zonas donde se produce una curvatura más pronunciada. Esto es posible mediante la opción *Proximity and Curvature* donde obviamente, el número de celdas es mayor respecto a si únicamente se centra el mallado en una de las dos opciones por separado, o incluso, en ninguna de ellas.

Por otra parte, es muy importante fijar tanto el tamaño mínimo como el máximo de las celdas del mallado puesto que son los parámetros elegidos para decidir en la fase del estudio del mallado nuestra malla final.

Para la geometría a modelar se ha decidido fijar un tamaño mínimo de malla de 1.5 mm y un tamaño máximo de malla de 5 mm.

- *Inflation*: En este apartado se modifica la capa prismática próxima a los contornos, pero se considera que no es necesario puesto que anteriormente se ha definido las zonas de proximidad y de curvatura.
- *Statistics*: Aquí se definen todos los parámetros para identificar la calidad de malla. Siempre que se genere una malla modificando los anteriores parámetros, se viene aquí y en *Elements* se muestra el número de celdas que en ese momento contiene la geometría. En concreto, en la generación de la primera malla inicial el número de celdas es de 98765. En el apartado 6.2.4 se hará un pequeño estudio de la asimetría y la ortogonalidad de malla para comprobar la calidad de ésta.

Existen también una serie de controles locales de malla como son, por ejemplo, el *Refinement* en el que se realiza un mallado más fino en zonas especificadas, *Pinch* que se trata de una herramienta para eliminar defectos del cuerpo durante el mallado, etc. en los que se mejora las opciones generales de malla, pero en la geometría a caracterizar se considera que supondría un mayor coste computacional respecto a la pequeña posible mejora, por lo que se decide prescindir de dichas opciones adicionales.

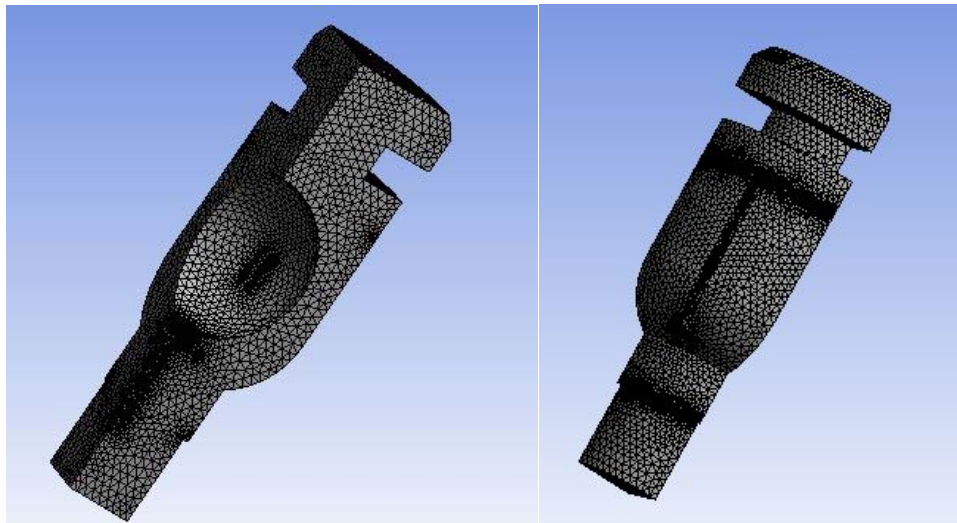


Figura 6.10. Mallado de la ventosa modelo IRUA 930 en Ansys Meshing.

6.2.3.- Condiciones de contorno.

Las condiciones de contorno controlan el valor de las variables o sus relaciones en los límites del dominio analizado. Básicamente consiste en fijar los valores de presión, velocidad y temperatura en cada una de las fronteras del dominio de control diferenciándolos de los valores que controlan todo el continuo. En el caso del modelo realizado sobre la ventosa modelo IRUA 930, hay una única región o volumen de control que está delimitada por las condiciones de contorno que se presentan a continuación, que en *Ansys* se les ha llamado *Named Selections* (Figura 6.11).

- Ejes de simetría: se definen con el nombre de *symmetry1* y *symmetry2*. Presentan dos ejes de simetría equivalentes a las dos paredes del cuarto de ventosa lo que se interpreta como un eje sobre el que aplicar simetría en el modelo de la ventosa, sin añadir ninguna condición más. Con ello se consigue la generación de la malla inicial de un cuarto del total pero a la vez que se pueda calcular todo el modelo de la ventosa.
- Cuerpo y Flotador: se define la opción *wall* pero con el nombre *Fluid*. Son los límites con el cuerpo de la ventosa y el flotador, es decir, son las fronteras de la región con las partes sólidas que la rodean.
- Entrada: se define la opción *velocity_inlet* pero con el nombre *inlet*. Es el lugar por donde se conecta la ventosa con la instalación. Gracias a ella, se puede definir la dirección del flujo, la velocidad, el flujo de aire y agua, etc.

- Salida: se define con el nombre *pressure_outlet*. Es la conexión del volumen de control con la atmósfera. En esta fase se considera la presión atmosférica bajo la hipótesis de que la ventosa no está encerrada dentro de otro volumen de control ni está conducida la salida. En ese caso hipotético se debería contemplar en el diseño del modelo.

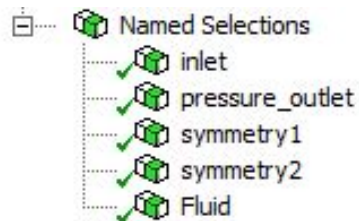


Figura 6.11. Condiciones de Contorno de la ventosa modelo IRUA 930.

6.2.4.- Análisis computacional del mallado inicial.

Se ha generado una malla inicial (Figura 6.12) con las siguientes características principales:

| Details of "Mesh" | |
|---|-----------------------------|
| Defaults | |
| Physics Preference | CFD |
| Solver Preference | Fluent |
| <input type="checkbox"/> Relevance | 0 |
| Sizing | |
| Use Advanced Size Function | On: Proximity and Curvature |
| Relevance Center | Coarse |
| Initial Size Seed | Active Assembly |
| Smoothing | Medium |
| Transition | Slow |
| Span Angle Center | Fine |
| <input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle | Default (18,0 °) |
| <input type="checkbox"/> Proximity Accuracy | 0,5 |
| <input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap | Default (3) |
| <input type="checkbox"/> Min Size | 1,5e-003 m |
| <input type="checkbox"/> Proximity Min Size | 1,5e-003 m |
| <input checked="" type="checkbox"/> Max Face Size | 5,e-003 m |
| <input checked="" type="checkbox"/> Max Size | 5,e-003 m |
| <input type="checkbox"/> Growth Rate | Default (1,20) |
| Minimum Edge Length | 3,4465e-005 m |
| Inflation | |
| Assembly Meshing | |
| Patch Conforming Options | |
| Advanced | |
| Defeaturing | |
| Statistics | |
| <input type="checkbox"/> Nodes | 19699 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Elements | 98765 |
| Mesh Metric | None |

Figura 6.12. Características del mallado inicial de la ventosa modelo IRUA 930.

Antes de pasar al estudio del mallado, se realizan tres comprobaciones esenciales para saber si se puede continuar el análisis por este camino o se debe modificar parte de éste.

En la primera de las comprobaciones se verifica una de las medidas más importantes para establecer si nuestra malla tiene una calidad suficientemente buena. Se mide la posible asimetría existente en nuestro cuarto de ventosa, es decir, evalúa la calidad basada en el equiángulo de desvío y presenta un valor entre 0 y 1 siendo 0 totalmente simétrico y 1 presentando una asimetría inaceptable para la geometría (Tabla 6.1).

En la siguiente tabla aparecen los rangos de valores asignados a su calidad de malla correspondiente.

| Skewness | Calidad de Malla |
|-------------|------------------|
| 0 - 0.25 | Excelente |
| 0.25 - 0.5 | Muy buena |
| 0.5 - 0.8 | Buena |
| 0,8 - 0.94 | Aceptable |
| 0.95 - 0.97 | Mala |
| 0.98 - 1 | Inaceptable |

Tabla 6.1. Diferentes calidades de malla según *Skewness*.

Statistics de **Ansys Meshing** muestra el valor medio de la asimetría o *Skewness* y resultar ser de 0.235, por lo que estamos dentro del rango asignado a una calidad de malla excelente. Por lo tanto, esta primera medida es satisfactoria.

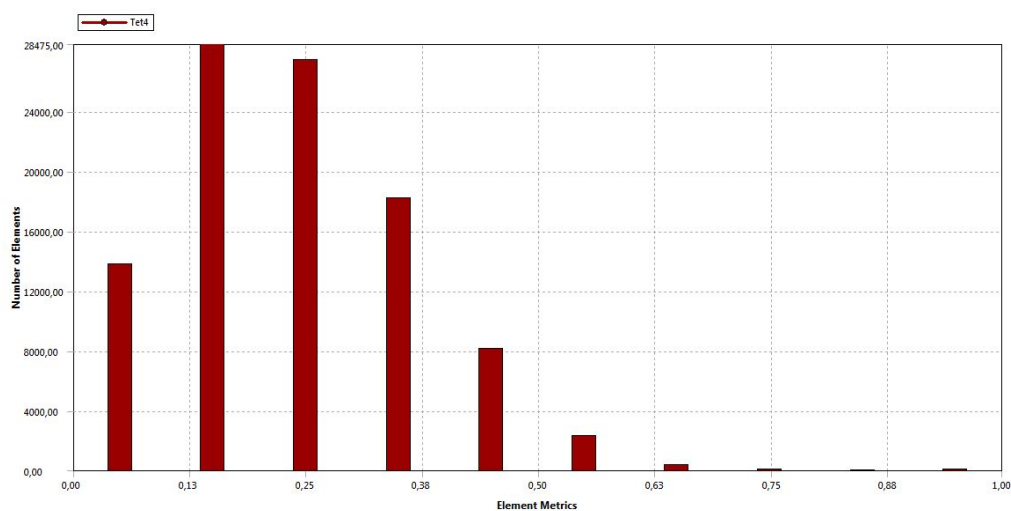


Figura 6.13. Resultados obtenidos (*Skewness*) de la ventosa modelo IRUA 930.

Por otra parte, la siguiente medida para comprobar la calidad de la malla es *Orthogonal Quality*. Está definida como el ángulo existente entre dos vectores consecutivos de nuestra malla y presenta un valor entre 0 y 1 siendo 0 nada ortogonal y 1 presentando una ortogonalidad perfecta (Tabla 6.2).

En la siguiente tabla aparecen los rangos de valores asignados a su calidad de malla correspondiente.

| Orthogonal Quality | Calidad de Malla |
|--------------------|------------------|
| 0.95 - 1 | Excelente |
| 0.7 - 0.95 | Muy buena |
| 0.2 - 0.69 | Buena |
| 0.1 - 0.2 | Aceptable |
| 0.001 - 0.1 | Mala |
| 0 - 0.001 | Inaceptable |

Tabla 6.2. Diferentes calidades de malla según *Orthogonal Quality*.

Statistics de Ansys Meshing nos muestra que el valor medio de la *Orthogonal Quality* es de 0.854, por lo que se encuentra dentro del rango asignado a una calidad de malla muy buena. Por lo tanto, esta segunda medida también resulta satisfactoria.

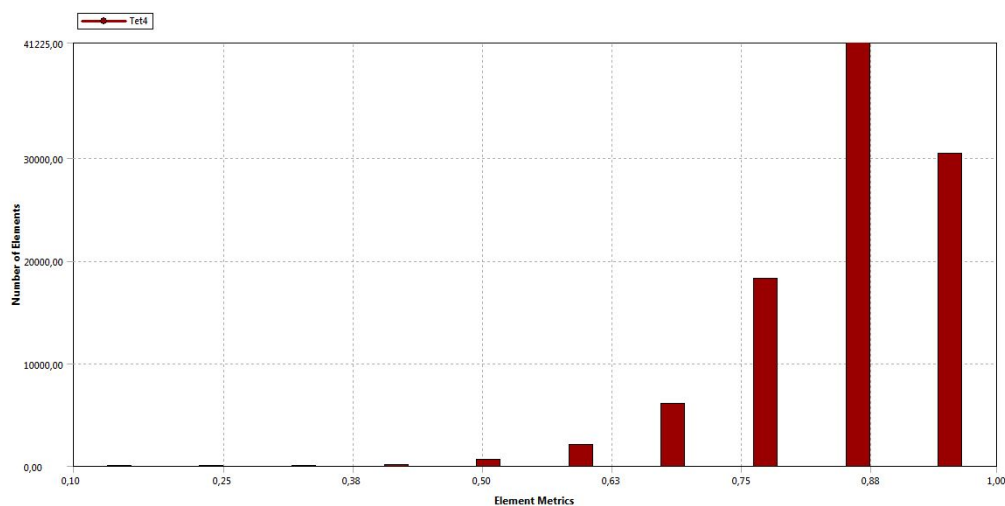


Figura 6.14. Resultados obtenidos (*Orthogonal Quality*) de la ventosa modelo IRUA 930.



En la tercera y más importante de las comprobaciones se verifica si la solución generada inicialmente converge y es una posible solución válida de cara al estudio de malla.

En ella, se utiliza la tercera de las herramientas de nuestro paquete *Fluid Flow Fluent*, es decir, la opción *Setup*. Al abrir esta herramienta se selecciona el número de procesadores que se van a utilizar a la vez para disminuir el tiempo de computación. Para el caso del presente estudio es de 5 procesadores.

Una vez dentro de la herramienta se tienen que ajustar todos los valores de modo que el análisis llegue a buen puerto. Se activa la ecuación de la energía y se define un modelo *k-epsilon* muy utilizado en este tipo de análisis que nos servirá para saber de buena mano si la convergencia es correcta.

El medio con el que se realiza la simulación es aire, coincidiendo con el predeterminado por el programa. En cuanto a las condiciones de contorno, se asigna a *inlet* el tipo *mass-flow-inlet* y un valor típico de 0.05 kg/s . A *pressure_outlet* se le fija un valor de presión a la salida de 0 Pa (presión atmosférica).

Para el método de solución tenemos diferentes vías de selección de datos como, por ejemplo, la adopción de un esquema tipo *Coupled* (uno de los más robustos del software de simulación) y la asignación de ecuaciones de segundo orden a todos los modelos posibles para obtener una discretización espacial óptima.

Otro aspecto que afecta al cálculo de la convergencia son los niveles de turbulencia a imponer donde se adoptan valores comprendidos entre 0.8 y 1 para asegurarnos de un análisis bien ejecutado.

Con estos pequeños cambios, ya se es capaz de inicializar la solución y comenzar el cálculo asignando 1000 iteraciones que son suficientes para comprobar que se está operando de la manera adecuada.

Los resultados que obtenidos tras el cálculo son de lo más positivos, ya que, el residuo ha convergido (la ecuación de la continuidad llega al orden de 10^{-4}) en menos de 500 iteraciones a una velocidad de cálculo considerablemente alta (Figura 6.15).

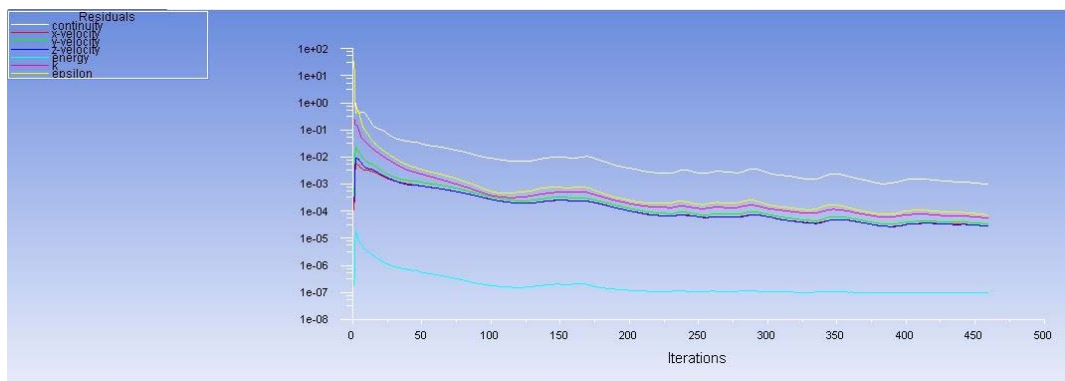


Figura 6.15. Evolución del residuo de la ventosa modelo IRUA 930.

Tras este análisis, aparte de comprobar que la solución ha convergido, también es de claro interés que el comportamiento de algunos de los parámetros sea el correcto tras la simulación como por ejemplo, la estabilidad del flujo de aire a la salida de la ventosa (Figura 6.16).

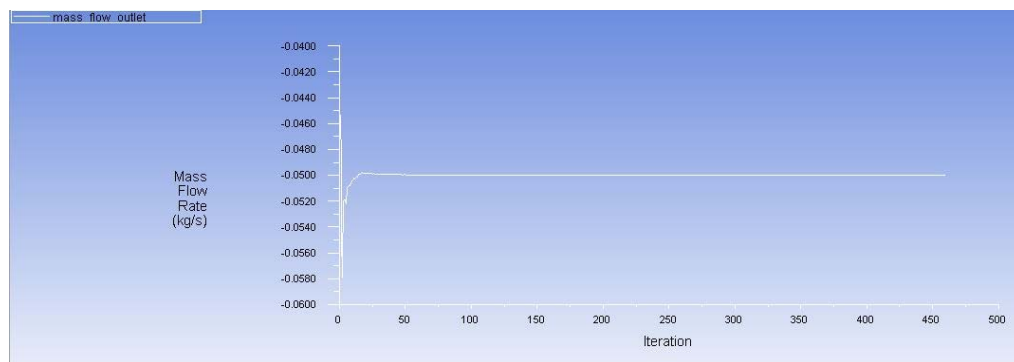


Figura 6.16. Evolución del flujo de aire a la salida de la ventosa modelo IRUA 930.

Otro parámetro que puede aportar la quietud de haber resultado bien en este ensayo previo es la presión a la entrada de la ventosa.

En la Figura 6.17 se puede analizar que las zonas que presentan una presión mayor son aquellas regiones críticas donde se producen cambios bruscos en la dirección del aire.

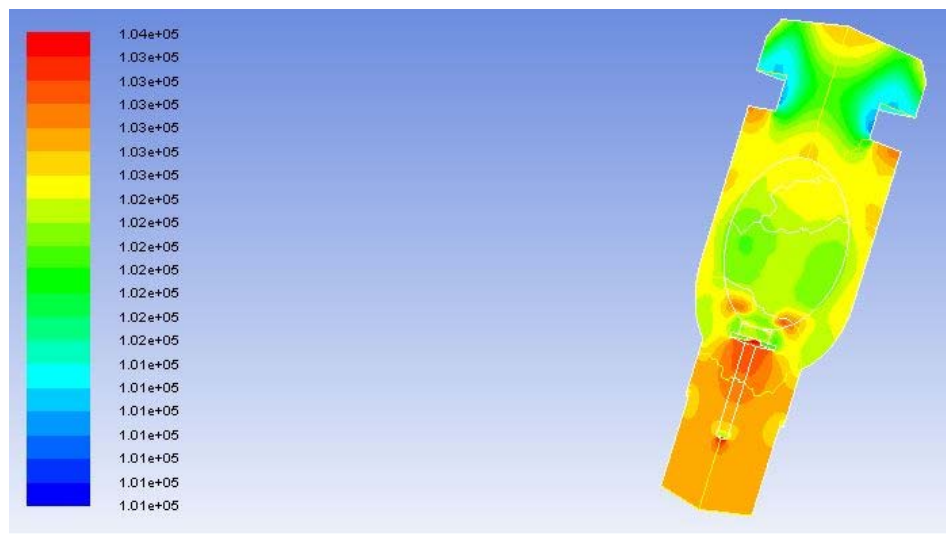


Figura 6.17. Mapa de presiones a lo largo de la ventosa modelo IRUA 930.

En la Figura 6.18 se muestra la turbulencia existente en la ventosa. Como se puede observar, los lugares en los que la turbulencia es mayor son alrededor de la zona de salida del fluido y en las proximidades del flotador.

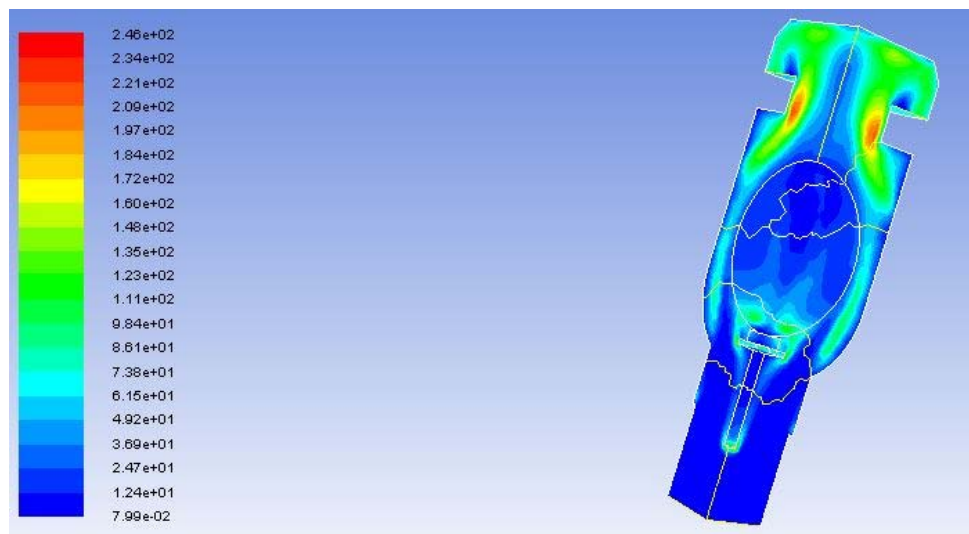


Figura 6.18. Mapa de turbulencia a lo largo de la ventosa modelo IRUA 930.

Se puede concluir, que los resultados previos obtenidos son satisfactorios y coherentes con la realidad. Por lo tanto, ya se puede realizar el estudio del mallado que definirá la estructura definitiva de la malla final.

6.2.5.- Estudio del mallado.

Como se viene diciendo a lo largo del apartado 6.2, para optimizar el resultado respecto al número de celdas se realiza lo que se denomina el estudio de mallado.

En primer lugar, se analizan los resultados obtenidos en la malla inicial y se extraen una serie de parámetros que se varían, obteniendo valores de salida diferentes como son las presiones absolutas a la entrada y salida de la ventosa, y su diferencia de presiones correspondiente, así como el flujo de aire a la salida de la misma. Esto se realiza desde la herramienta de *Setup* creando las variables a obtener desde el apartado de *Parameters* en *Boundary Conditions*.

Los valores de entrada que se fijan como parámetros son: *Max Size* y *Max Face Size*, es decir, los tamaños máximos de malla, así como *Elements* que corresponde con el número de celdas del cuarto de la ventosa. Por lo tanto, el estudio del mallado consiste en ir variando los valores del tamaño máximo de malla y elegir un valor en el cual se ha producido una estabilización en el flujo de aire a la salida, minimizando el número de celdas.

En el apartado 6.1, se comentó que el paquete *Fluid Flow Fluent* presenta cinco herramientas básicas para el análisis de una geometría, pero cuando se sacan como parámetros ciertas variables aparece en dicho paquete una sexta herramienta llama *Parameters* que junto con la aplicación de optimización llamada *Response Surface Optimization* se podrá iterar una serie de valores en cadena, es decir, introduciendo los valores del tamaño máximo de entrada que se quieren variar antes del cálculo y mediante esta aplicación se calcularían los valores de salida uno tras otro, como son: el número de celdas, las presiones a la entrada y salida de la ventosa, así como el flujo de aire a la salida de la misma.

Los resultados que se han extraído variando el tamaño máximo de malla entre 2 y 6 mm son los que aparecen en la Tabla 6.3, marcando en rojo el tamaño con el que se ha generado la malla inicial (5 mm).

| Max Size (mm) | Elements | Mass Flow Outlet (kg/s) | Pinlet (Pa) | Poutlet (Pa) | ΔP (Pa) |
|---------------|--------------|-------------------------|---------------|---------------|-----------------|
| 2 | 670550 | -0.049999 | 102880 | 101320 | 1560 |
| 3 | 226200 | -0.049998 | 102830 | 101320 | 1510 |
| 4 | 128020 | -0.050000 | 102770 | 101320 | 1450 |
| 5 | 99159 | -0.050001 | 102800 | 101320 | 1480 |
| 6 | 90044 | -0.050014 | 102870 | 101320 | 1550 |

Tabla 6.3. Resultados obtenidos tras el estudio del mallado (1).

Si se muestra gráficamente el número de celdas respecto del flujo de aire a la salida (Figura 6.19) se observa que a más tamaño de malla, mayor es el número de celdas y a partir de un cierto valor el número de celdas se estabiliza aumentando su flujo de aire a la salida.

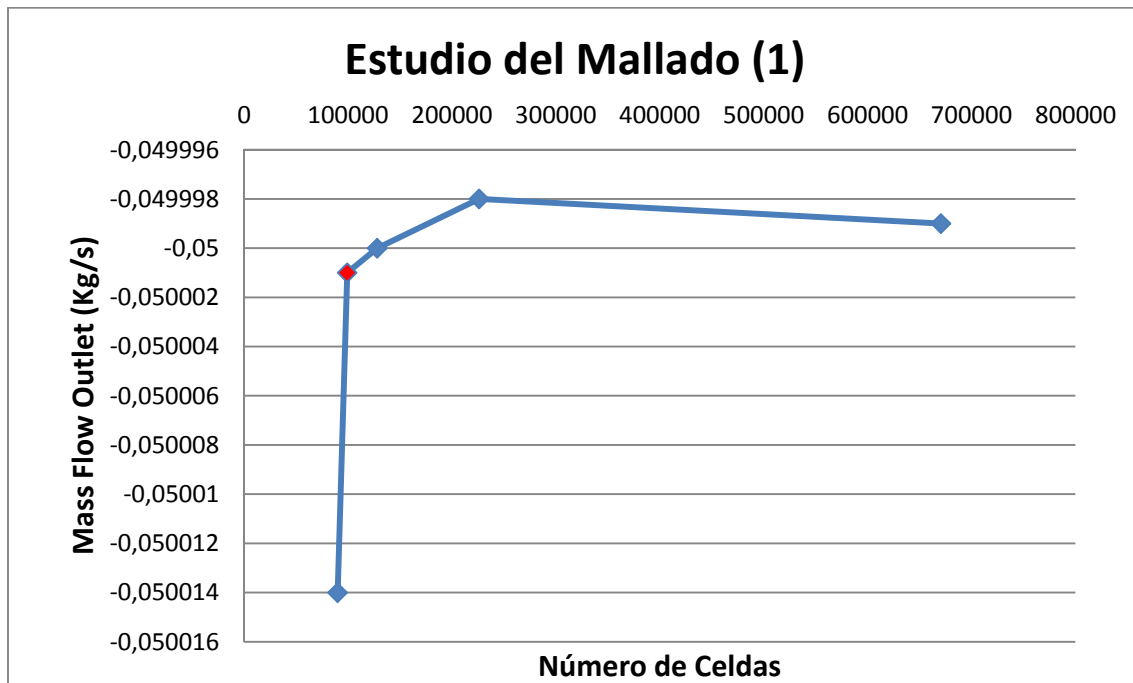


Figura 6.19. Estudio del mallado (1) de la ventosa modelo IRUA 930.

Ahora es el momento de decidir cuál es el tamaño de malla idóneo para nuestro caso y, como se ha marcado en rojo en la Figura 6.19, se ha decidido que el mismo punto con el que se ha generado la malla inicial (5 mm de tamaño máximo de malla) es el punto en el cuál comienza a estabilizarse el flujo de salida y que, entre éstos, presenta un menor número de celdas por lo que quedará definida nuestra malla final.

Para comprobar que el estudio del mallado es correcto se representa esta vez el número de celdas frente a la diferencia de flujo a la salida respecto del punto con el tamaño de malla más pequeño (2 mm), y por lo tanto, con mayor número de celdas (Tabla 6.4).

| Max Size (mm) | Elements | Mass Flow Outlet (kg/s) | Δ MassFlowOutlet (kg/s) |
|---------------|--------------|-------------------------|--------------------------------|
| 2 | 670550 | -0.049999 | 0 |
| 3 | 226200 | -0.049998 | 1E-06 |
| 4 | 128020 | -0.050000 | -1E-06 |
| 5 | 99159 | -0.050001 | -2E-06 |
| 6 | 90044 | -0.050014 | -1,5E-05 |

Tabla 6.4. Resultados obtenidos tras el estudio del mallado (2).

El resultado que se debería obtener tendría que ser muy similar al obtenido en la Figura 6.19 garantizando el correcto análisis del mallado (Figura 6.20).

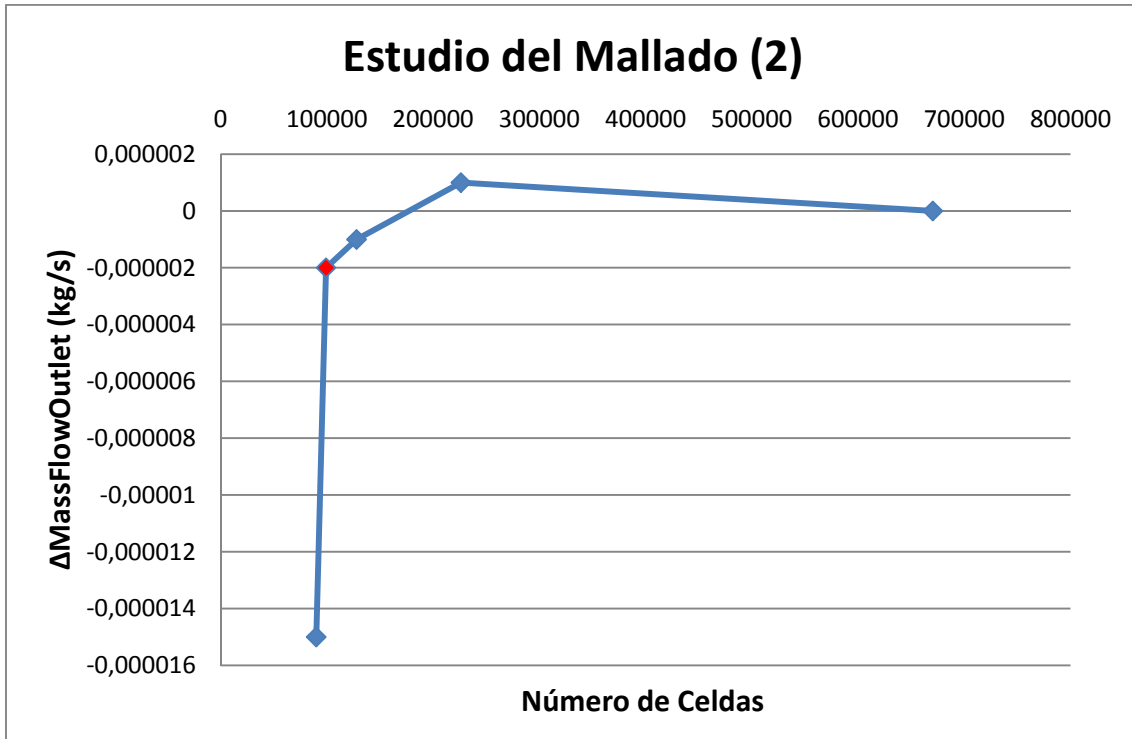


Figura 6.20. Estudio del mallado (2) de la ventosa modelo IRUA 930.



7. ESTUDIOS DE VALIDACIÓN DE LAS TÉCNICAS CFD.

El análisis computacional de una geometría mediante un software de simulación de CFD no garantiza la validez de la misma. Por lo tanto, dichas soluciones tienen que ser validadas mediante ensayos físicos para poder asegurar la autenticidad de los resultados anteriores. Por este motivo, se van a realizar tanto unos estudios de la ventosa modelo IRUA 930 con aire en el Laboratorio de Nahariya (Israel), como otros con agua en el Laboratorio Justo Nieto de la UPV.

Además, se aplicará la semejanza hidrodinámica entre los dos medios fluidos (aire y agua) y se comparará con los modelos simulados mediante técnicas CFD y/o ensayos físicos, según sea el caso.

Antes de mostrar los resultados se muestra de manera teórica la forma de obtener el caudal volumétrico y másico a partir del valor de la velocidad de entrada que variará como parámetro.

Para el diámetro nominal de entrada de la ventosa ($D = 80 \text{ mm} = 0.08 \text{ m}$) el área de entrada es:

$$A_{\text{cuarto ventosa}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot 0.08^2}{4} = 1.2566 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (7.1)$$

$$A_{\text{total}} = 4 \cdot A_{\text{cuarto ventosa}} = 4 \cdot 1.2566 \cdot 10^{-3} = 0.005 \text{ m}^2 \quad (7.2)$$

Por ejemplo, para una velocidad de 10 m/s , el caudal volumétrico sería:

$$\begin{aligned} Q_{\text{cuarto ventosa}} &= v \cdot A_{\text{cuarto ventosa}} = 10 \cdot 1.2566 \cdot 10^{-3} = \\ &= 0.012566 \text{ m}^3/\text{s} = 45.2389 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned} \quad (7.3)$$

$$Q_{\text{total}} = 4 \cdot Q_{\text{cuarto ventosa}} = 4 \cdot 45.2389 = 180.9504 \text{ m}^3/\text{h} \quad (7.4)$$

Para la misma velocidad de 10 m/s , el caudal másico sería:

$$\begin{aligned} m_{\dot{c}uarto\ ventosa} &= Q_{cuarto\ ventosa} \cdot \rho_{aire} = 0.012566 \cdot 1.1749 = \\ &= 0.01476\ Kg/s \end{aligned} \quad (7.5)$$

$$m_{total} = 4 \cdot m_{\dot{c}uarto\ ventosa} = 4 \cdot 0.01476 = 0.059\ Kg/s \quad (7.6)$$

7.1.- Estudios con Aire de la ventosa.

Se realiza la simulación para la expulsión de aire en un intervalo de velocidades de entrada (velocity_inlet) entre 10 y 100 m/s obteniendo la diferencia de presiones para cada una de estas velocidades (Tabla 7.1).

| Velocidad (m/s) | Caudal total (m^3/h) | MassFlowInlet total (Kg/s) | ΔP (bar) |
|---------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------------|
| 10 | 180.9504 | 0.059055745 | 0.0013002 |
| 20 | 361.9008 | 0.118111491 | 0.0051837 |
| 30 | 542.8512 | 0.177167236 | 0.0116246 |
| 40 | 723.8016 | 0.236222981 | 0.0206182 |
| 50 | 904.752 | 0.295278726 | 0.0321305 |
| 60 | 1085.7024 | 0.354334472 | 0.0461351 |
| 70 | 1266.6528 | 0.413390217 | 0.0626186 |
| 80 | 1447.6032 | 0.472445962 | 0.0813814 |
| 90 | 1628.5536 | 0.531501707 | 0.1028226 |
| 100 | 1809.504 | 0.590557453 | 0.1263371 |

Tabla 7.1. Resultados obtenidos tras el ensayo de la ventosa modelo IRUA 930 con aire mediante técnicas CFD.

El incremento de esta diferencia de presiones aumenta de manera exponencial a medida que se aumenta el caudal.

De forma gráfica (Figura 7.1) el caudal volumétrico respecto a esta diferencia de presiones para los ensayos de aire con la ventosa modelo IRUA 930 (CFD) queda:

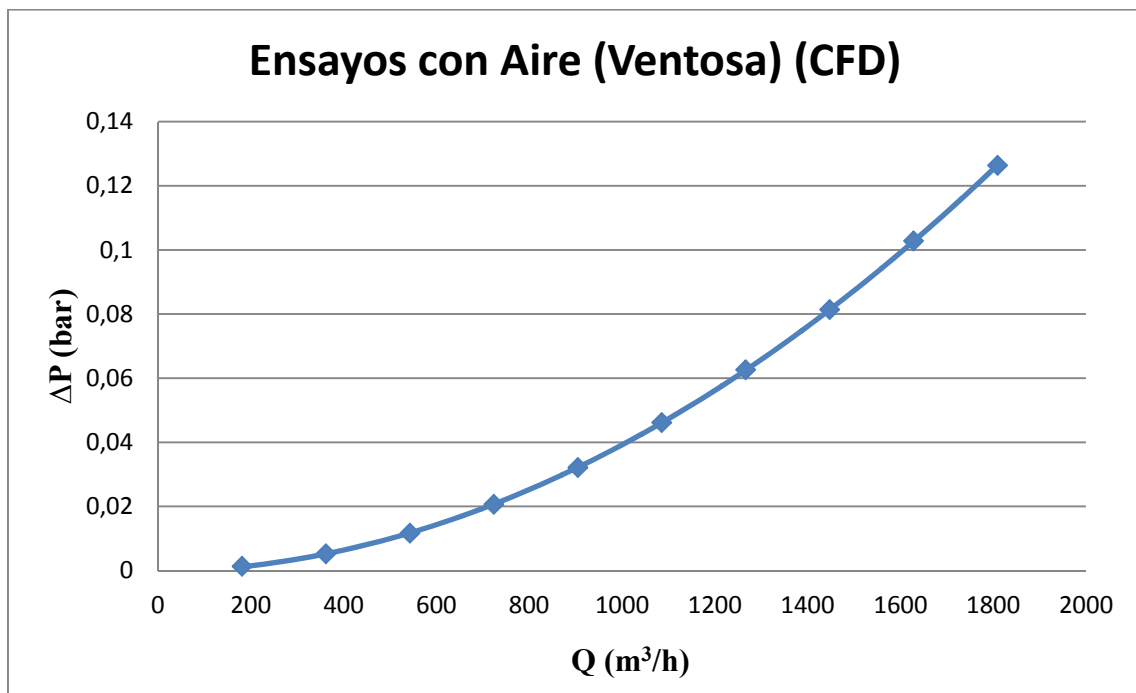


Figura 7.1. Verificación del modelo CFD de la ventosa modelo IRUA 930 mediante el ensayo con aire.

Si se comparan los ensayos realizados en el laboratorio con los resultados obtenidos mediante los CFD (Figura 7.2) queda:

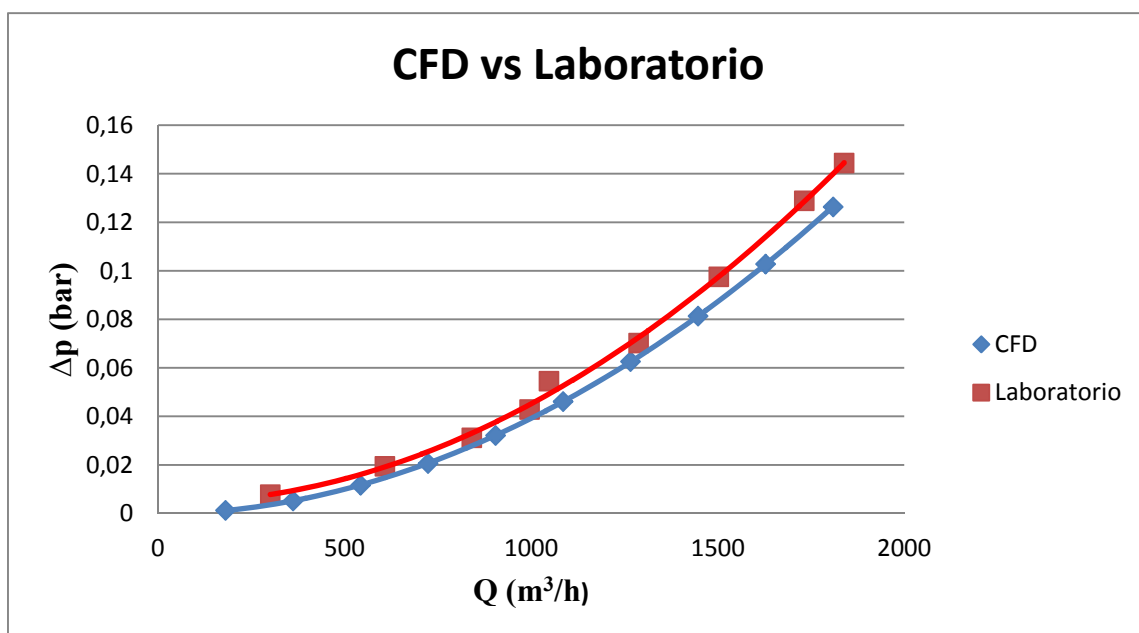


Figura 7.2. Comparativa CFD – ensayo físico con aire.

7.2.- Estudios con Agua de la ventosa.

En este apartado se realiza la simulación para la expulsión de agua en un intervalo de velocidades de entrada (velocity_inlet) entre 0.5 y 6 m/s obteniendo la diferencia de presiones para cada una de estas velocidades (Tabla 7.2).

| Velocidad (m/s) | Caudal total (m ³ /h) | MassFlowInlet total (Kg/s) | ΔP (bar) |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------|-----------|
| 0.5 | 9.04752 | 2.50867624 | 0.0027654 |
| 1 | 18.09504 | 5.01735248 | 0.0110179 |
| 1.5 | 27.14256 | 7.52602872 | 0.0247109 |
| 2 | 36.19008 | 10.03470496 | 0.0438274 |
| 2.5 | 45.2376 | 12.5433812 | 0.0683784 |
| 3 | 54.28512 | 15.05205744 | 0.0983933 |
| 3.5 | 63.33264 | 17.56073368 | 0.1338131 |
| 4 | 72.38016 | 20.06940992 | 0.1744660 |
| 4.5 | 81.42768 | 22.57808616 | 0.2207117 |
| 5 | 90.4752 | 25.0867624 | 0.2723018 |
| 5.5 | 99.52272 | 27.59543864 | 0.3293825 |
| 6 | 108.57024 | 30.10411488 | 0.3920606 |

Tabla 7.2. Resultados obtenidos tras el ensayo de la ventosa modelo IRUA 930 con agua mediante técnicas CFD.

De forma gráfica (Figura 7.3) el caudal volumétrico respecto a esta diferencia de presiones para los ensayos de agua con la ventosa modelo IRUA 930 (CFD) queda:

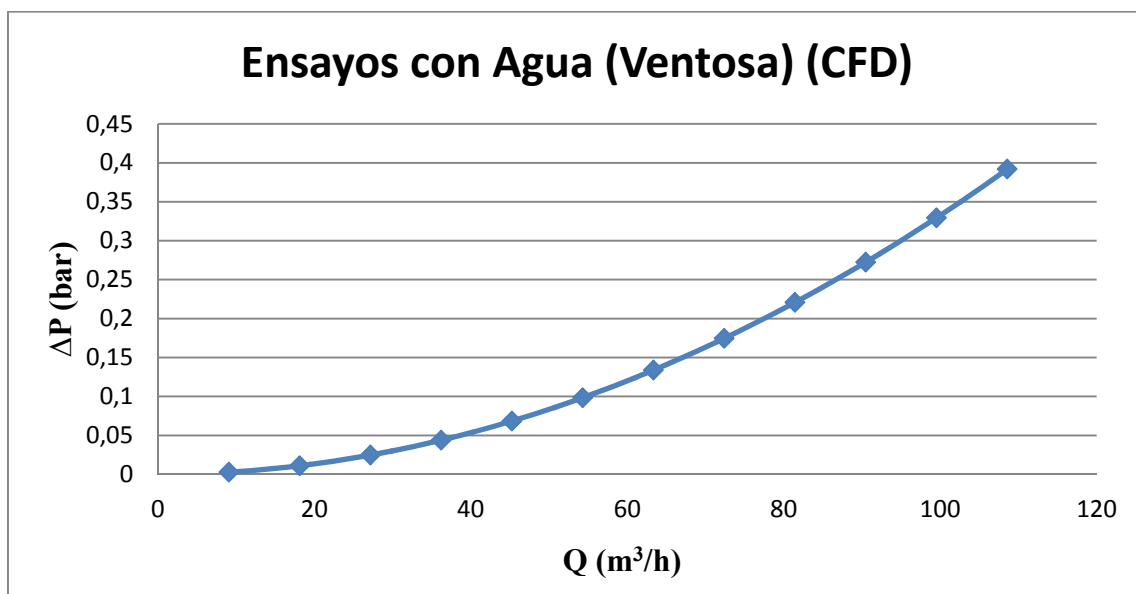


Figura 7.3. Verificación del modelo CFD de la ventosa modelo IRUA 930 mediante el ensayo con agua.

7.3.- Estudios con Agua de la Cámara de Ensayo de Ventosas con Agua (CEVA) con la ventosa en su interior.

Para comparar los resultados realizados en el laboratorio con la simulación computacional con CFD, otra opción es realizar la geometría de la CEVA (Figura 7.4) así como su mallado (Figura 7.5) y simular el conjunto formado (cámara + ventosa).

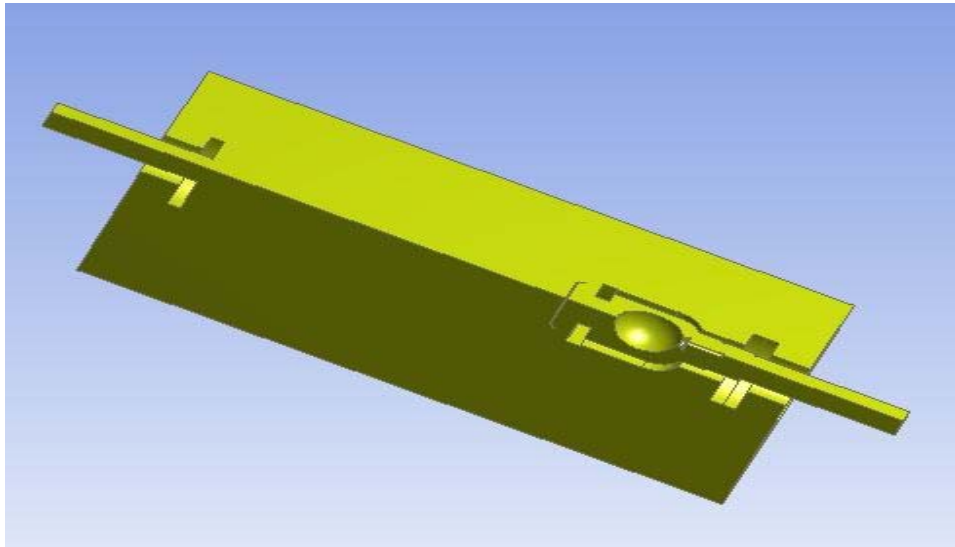


Figura 7.4. Fluido interior de la CEVA en Ansys Workbench.

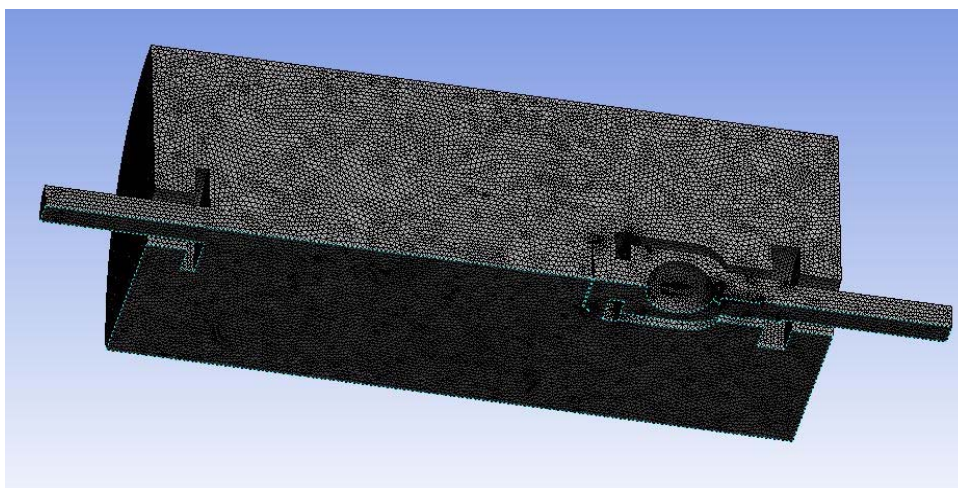


Figura 7.5. Mallado de la CEVA en Ansys Meshing.

Los resultados obtenidos tras esta simulación (Tabla 7.3) son los siguientes:

| Velocidad (m/s) | Caudal total (m ³ /h) | MassFlowInlet total (kg/s) | ΔP (bar) |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------|------------------|
| 0.5 | 9.04752 | 2.50867624 | 0.0068974 |
| 1 | 18.09504 | 5.01735248 | 0.0273183 |
| 1.5 | 27.14256 | 7.52602872 | 0.0604599 |
| 2 | 36.19008 | 10.03470496 | 0.1077798 |
| 2.5 | 45.2376 | 12.5433812 | 0.1674629 |
| 3 | 54.28512 | 15.05205744 | 0.2395741 |
| 3.5 | 63.33264 | 17.56073368 | 0.3248563 |
| 4 | 72.38016 | 20.06940992 | 0.4216948 |
| 4.5 | 81.42768 | 22.57808616 | 0.5341869 |
| 5 | 90.4752 | 25.0867624 | 0.6590500 |

Tabla 7.3. Resultados obtenidos tras el ensayo de la CEVA con agua mediante técnicas CFD.

De forma gráfica (Figura 7.6) el caudal volumétrico respecto a esta diferencia de presiones para los ensayos de agua con la CEVA (CFD) queda:

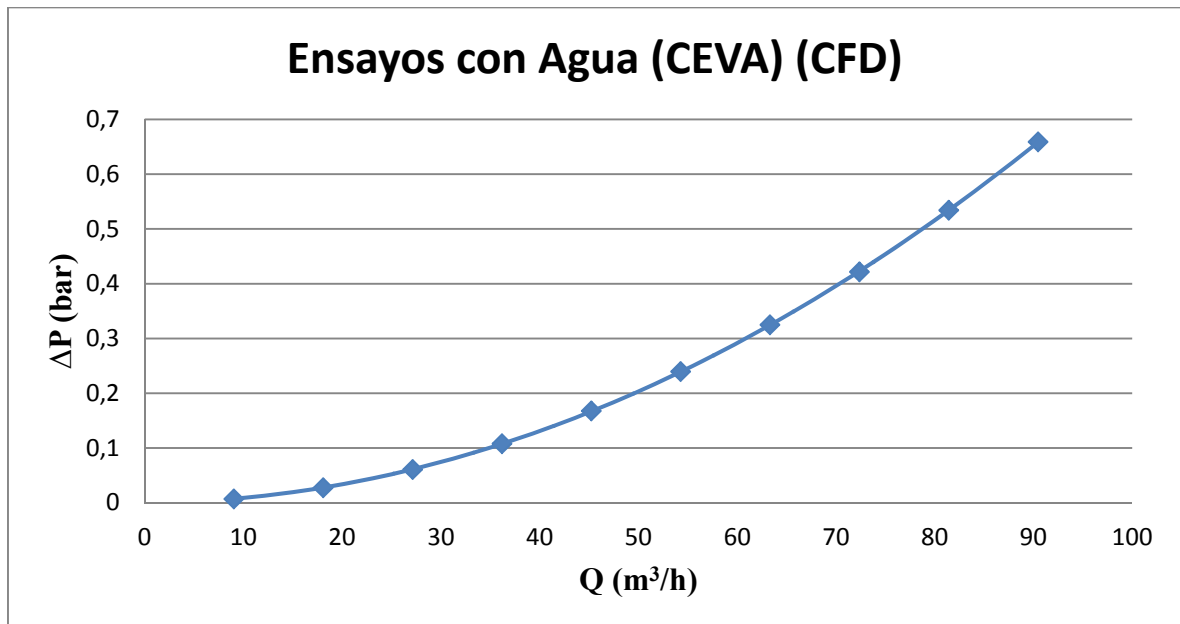


Figura 7.6. Verificación del modelo CFD de la CEVA mediante el ensayo con agua.

7.4.- Estudio de la aplicación de la semejanza hidrodinámica.

En el presente apartado se realiza la comprobación de la semejanza hidrodinámica desde tres enfoques diferentes:

- Partiendo de los resultados de técnicas CFD del ensayo de agua a aire comparándolos con los resultados de CFD del ensayo con aire (Figura 7.7).
- Partiendo de los resultados de CFD del ensayo e aire a agua comparándolos con los resultados de CFD del ensayo con agua (Figura 7.8).
- Partiendo de los resultados del ensayo de aire realizados en el laboratorio a agua comparándolos con los resultados de CFD del ensayo con agua (Figura 7.9).

7.4.1.- Semejanza hidrodinámica de CFD con Agua a Aire.

Los resultados gráficos obtenidos (Figura 7.7) tras aplicar la correspondiente semejanza hidrodinámica son los siguientes:

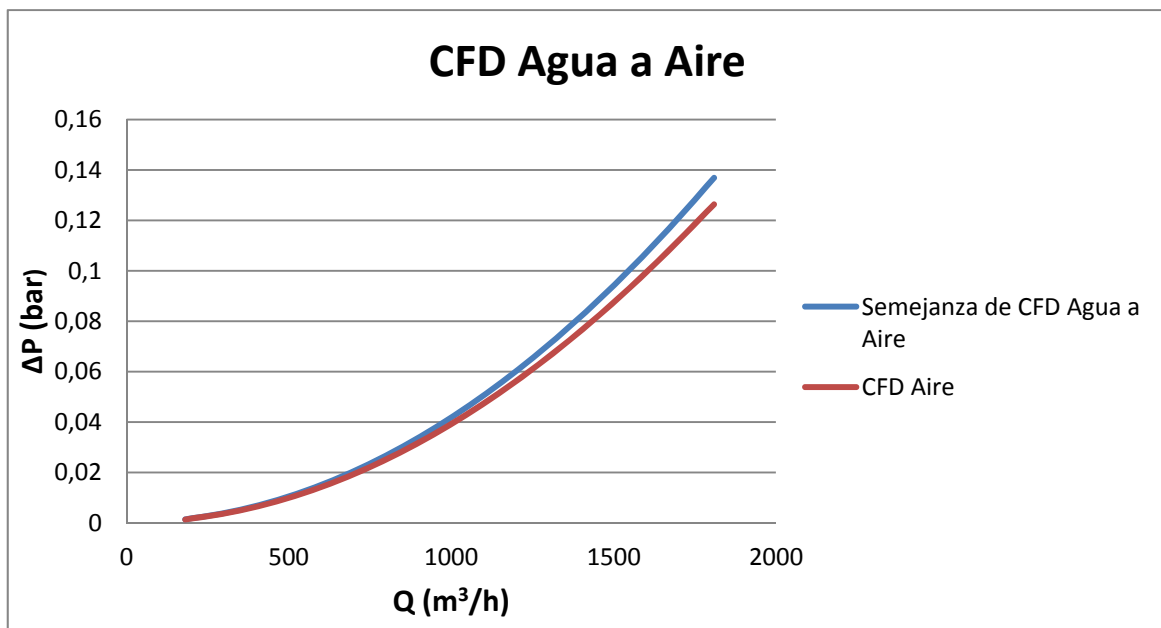


Figura 7.7. Verificación de la semejanza hidrodinámica desde el CFD de Agua a Aire.

7.4.2.- Semejanza hidrodinámica de CFD con Aire a Agua.

Los resultados gráficos obtenidos (Figura 7.8) tras aplicar la correspondiente semejanza hidrodinámica son los siguientes:

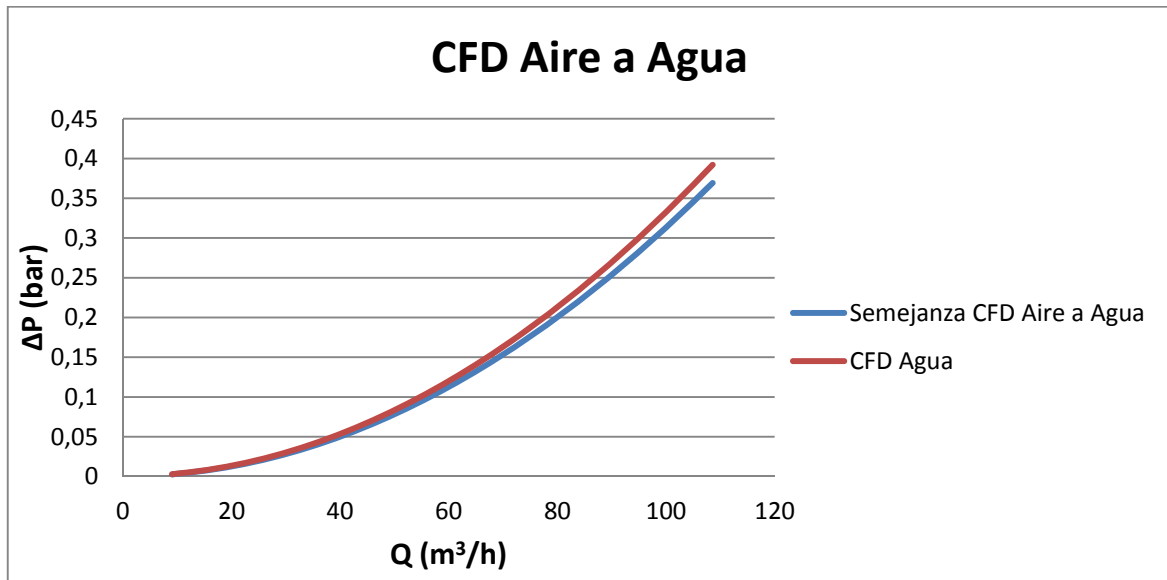


Figura 7.8. Verificación de la semejanza hidrodinámica desde el CFD de Aire a Agua.

7.4.3.- Semejanza hidrodinámica del Ensayo de Aire en Laboratorio a Agua.

Los resultados gráficos obtenidos (Figura 7.9) tras aplicar la correspondiente semejanza hidrodinámica son los siguientes:

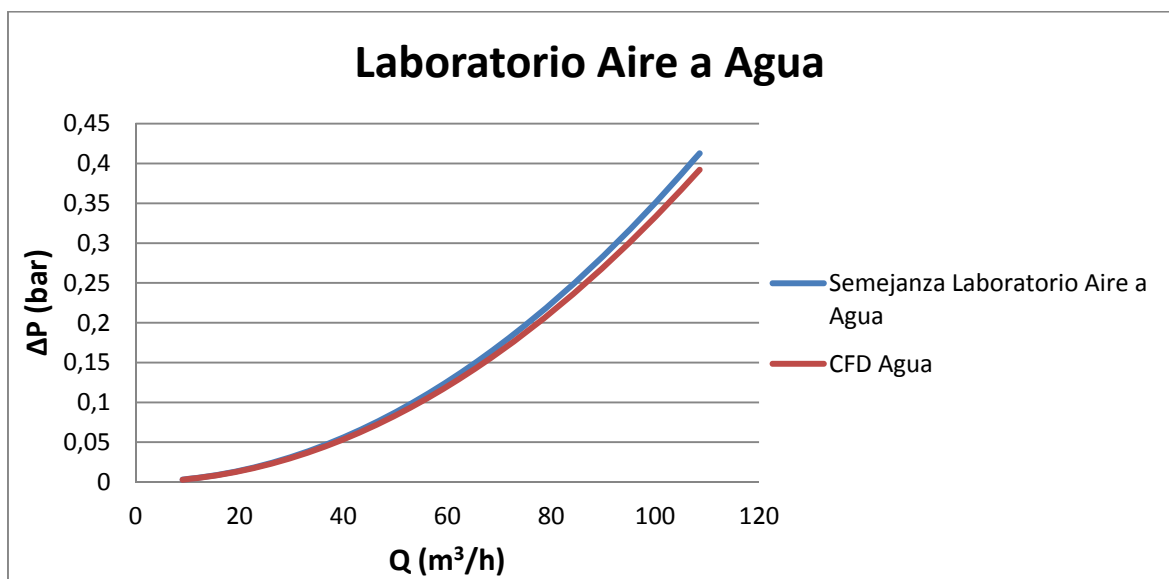


Figura 7.9. Verificación de la semejanza hidrodinámica desde el ensayo de laboratorio con Aire a Agua.



8. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.

La modelización de la ventosa modelo IRUA 930 se ha estructurado en tres partes. En primer lugar, se han analizado las diversas técnicas de caracterización de ventosas mediante el empleo de técnicas experimentales. En la segunda parte se ha presentado la caracterización de ventosas mediante el empleo de técnicas CFD y la aplicación de la semejanza hidrodinámica. Finalmente, en la tercera parte se ha realizado el estudio comparativo de los resultados obtenidos y se ha realizado una propuesta de metodología basada en los estudios previos para la determinación del comportamiento de la ventosa.

Como se ha presentado en el apartado 4.2, la necesidad de caracterización experimental de las ventosas viene recogida, en el caso de Europa, por la norma UNE-EN 1074-4 (2000). Dicha norma recoge algunos aspectos relacionados con la caracterización y validación de la documentación técnica aportada por el fabricante sobre el comportamiento de este tipo de dispositivos. Esta normativa presenta notables limitaciones, fundamentalmente por los requerimientos de caudales que son necesarios para ensayar ventosas de tamaño medio y grande.

Como se viene manifestando a lo largo del trabajo, y más en profundidad en el capítulo 4, la falta de información acerca del comportamiento de las ventosas se ve reflejada en la gran mayoría de los catálogos existentes en el mercado.

Por una parte, es muy común que el fenómeno del cierre dinámico se vea omitido provocando así en algunos casos, que la ventosa pueda cerrar antes de tiempo sin que se pueda intuir con antelación.

Por otra parte, las curvas características proporcionadas pocas veces suelen coincidir con los ensayos realizados en el laboratorio debido a diferentes errores cometidos, tales como:

- El hecho de que dos ventosas tengan el mismo diámetro nominal no implica que éstas sean las mismas (Iglesias y otros, 2009).
- El caudal volumétrico proporcionado en las gráficas y tablas por los fabricantes suele encontrarse en condiciones normales, por lo tanto, en casi ninguno de los casos coincide con el caudal volumétrico real o experimental.

En la Figura 8.1 se muestra claramente la diferencia existente, para una misma ventosa de DN 50, entre los ensayos realizados en el laboratorio en la fase de admisión de aire y la curva proporcionada por el fabricante de la misma.

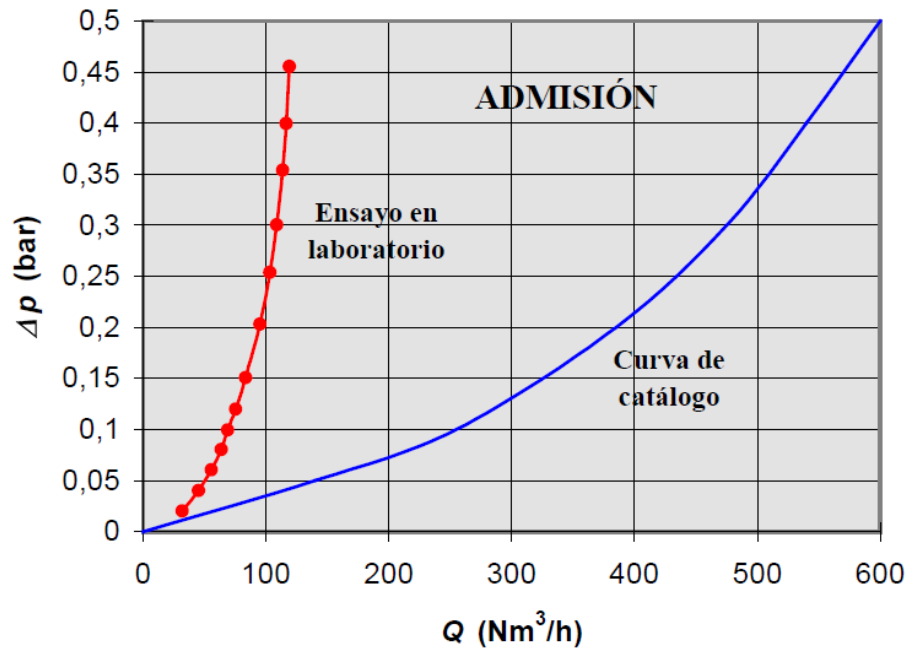


Figura 8.1. Comparación entre los ensayos de admisión de aire con las curvas del fabricante de una ventosa de DN 50 en fase de admisión (Fuertes y otros, 2006).

Es por ello, la necesidad de validar la caracterización de las ventosas mediante diferentes técnicas, ya sean computacionales (CFD) o experimentales. Además se ha aplicado con éxito el uso de la semejanza hidrodinámica como una nueva metodología de caracterización de ventosas basada en el modelado de éstas en unas condiciones diferentes a las de funcionamiento.

8.1.- Conclusiones.

De forma más específica, algunos de los logros o conclusiones extraídos del Trabajo Final de Grado han sido:

- La continuación del estudio de las ventosas (García Mares, 2012), esta vez para una válvula de aireación de DN 80 mm.
- La satisfacción de forma parte del estudio del Proyecto de Investigación OPERAGUA “Mejora de las técnicas de llenado y operación de Redes de Abastecimiento de Agua” y poder validar mediante técnicas computacionales los ensayos experimentales realizados previamente.
- La importancia de realizar un estudio previo sobre el comportamiento de las ventosas distinguiendo los distintos modelos y tamaños existentes en el mercado para lograr un dimensionado óptimo de la instalación.



- La concienciación sobre la caracterización de ventosas debido a la falta de información aportada por los fabricantes teniendo en cuenta, en todo momento, la normativa aplicable (UNE-EN 1074-4, 2000) para cada caso.
- El aumento de los conocimientos en el análisis de técnicas computacionales (CFD) aplicadas a la caracterización de unos elementos presentes en las instalaciones de fluidos como son las ventosas, así como el manejo de forma correcta del software de simulación computacional *Ansys Fluent*.
- El diseño de una geometría y mallado adecuado del elemento a caracterizar teniendo en cuenta las limitaciones y/o restricciones existentes en su modelado.
- La capacidad de analizar los resultados obtenidos en la fase de post-procesado y de ser capaz de interpretarlos de una manera adecuada.

8.2.- Desarrollos futuros.

Las técnicas presentadas a lo largo del presente trabajo no son las únicas empleadas para caracterizar el comportamiento de las ventosas, sino que existen otros tipos de estudios relacionados con las mismas.

Algunos de estos estudios ya han sido brevemente introducidos a lo largo de capítulos anteriores. A modo de resumen, algunas de las posibles técnicas a realizar en un futuro para mejorar el comportamiento de las ventosas son:

- La realización de los estudios con agua en el laboratorio de la Universidad, propuesto en el apartado 4.4, como alternativa a los análisis con aire. Una vez se hayan obtenido los resultados del mismo se validará su aplicación mediante el uso de la semejanza hidrodinámica comparando los valores obtenidos con los resultados computaciones del mismo.
- Los resultados mostrados a lo largo del trabajo han sido realizados únicamente para la fase de expulsión. En ensayos futuros se podría optimizar dichas técnicas analizando también la fase de admisión teniendo en cuenta los fenómenos producidos cuando el flujo es sónico, como se expone en el capítulo 3.
- En estudios anteriores se realizó la caracterización para ventosas de 2” (García Mares, 2012) y en el presente estudio para ventosas de 3”. Por lo tanto, otra posible alternativa de caracterización de ventosas sería analizar el comportamiento de las mismas para diámetros nominales de entrada mayores.



- Un estudio más detallado sobre la problemática existente con el fenómeno del cierre hidráulico como ha sido introducido a lo largo del capítulo 4 y en el apartado anterior. Una propuesta de futuro podría ser el análisis minucioso de las fuerzas producidas en el flotador de la ventosa y las consecuencias que puede tener un cierre anticipado de la misma.
- En el apartado 5.6 se introduce el marco teórico del fenómeno de la turbulencia en elementos complejos de las instalaciones de fluidos. En estudios posteriores se podría centrar el análisis en los lugares más propensos de la ventosa donde se puede producir dicho fenómeno y las soluciones a adoptar para minimizar sus efectos adversos.
- La realización de un estudio de rugosidad para minimizar las pérdidas de carga del elemento de aireación. Las ecuaciones que muestran el cálculo de estas pérdidas son, en la gran mayoría de los casos, de origen experimental ignorándose en su uso habitual debido a las limitaciones y requisitos específicos de aplicación.



9. BIBLIOGRAFÍA.

Boldy, A.P. (1992). *The representation and use of air inlet/outlet valves for pressure surge control.* International conference on unsteady flow and fluid transients, Durham (Inglaterra).

Capote, J.A.; Alvear, D.; Abreu, O.V.; Lázaro, M.; Espina P. (2008). *Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios.* Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 24, Num. 3, 227-245.

Carlos Alberola, M. (2007). *Estudio de la influencia de las ventosas en transitorios hidráulicos con aire atrapado.* Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia.

Fuertes, V.S. (2001). *Transitorios con aire atrapado.* Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia.

Fuertes-Miquel, V.S.; Iglesias Rey, P.L.; García-Mares, F.J.; Mora-Meliá D. (2009). *Air valves behaviour. Comparison between compressible and incompressible flow.* Environmental Hydraulics – Theoretical, Experimental and Computational Solutions: Proceedings of the International Workshop on Environmental Hydraulics, IWEH09, 29 & 30 October 2009, Valencia, Spain.

Fuertes-Miquel, V.S.; Iglesias Rey, P.L.; Izquierdo Sebastián, J.; López Patiño, G. (2006). *Problemática generada por la utilización de ventosas mal seleccionadas a causa de las discrepancias existentes en las curvas características que modelan su comportamiento.* Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua Joao Pessoa, 5 a 7 Junio 2006, Brasil.

Fuertes-Miquel, V.S.; Izquierdo Sebastián, J.; Iglesias Rey, P.L.; Cabrera, E.; García-Serra, J. (1997). *Llenado de tuberías con aire atrapado.* Ingeniería del Agua, Vol. 4, Num. 3, septiembre 1997.

García-Mares, F.J. (2012). *Caracterización de ventosas mediante técnicas CFD.* Trabajo Fin de Master. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia.



García-Mares, F.J.; Iglesias Rey, P.L.; Fuertes-Miquel, V.S.; Mora-Meliá, D.; López-Jiménez, P.A. (2011). *Comparison of air valve behaviour by using CFD techniques.* Environmental Hydraulics – Theoretical, Experimental and Computational Solutions: Proceedings of the International Workshop on Environmental Hydraulics, IWEH09, 29 & 30 October 2009, Valencia, Spain.

Iglesias Rey, P.L.; Fuertes-Miquel, V.S.; García-Mares, F.J. (2009). *Nuevas tendencias en el diseño y caracterización de ventosas de admisión y expulsión de aire.* X Curso sobre diseño e instalación de Tuberías, organizado por la Universidad de Salamanca. Campus de Ávila.

Iglesias Rey, P.L.; Fuertes-Miquel, V.S.; García-Mares, F.J.; Martínez-Solano, F.J. (2014). *Comparative study of intake and exhaust air flows of different commercial air valves.* 16th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA 2014. Bari (Italia), 14-17 July 2014.

Iglesias Rey, P.L.; Fuertes-Miquel, V.S.; Martínez-Solano, F.J.; García-Mares, F.J. (2008). *Utilización de técnicas CFD para caracterización de ventosas de admisión y expulsión de aire.* VIII Seminario Iberoamericano sobre Planificación, proyecto y operación de redes de distribución de agua. Lisboa (Portugal), julio 2008.

Iglesias Rey, P.L.; García-Mares, F.J.; Fuertes-Miquel, V.S.; Martínez-Solano, F.J. (2013). *Aplicación de la semejanza hidrodinámica para la caracterización de válvulas de ventosas.* III Jornadas de Ingeniería del Agua, Barcelona.

Mateos de Vicente, Manuel (2011). *Ventosas, purgadores y aireadores para conducciones de agua.*

Munson, B.R.; Young D.F.; Okiishi, T.H.; Huebsch, W.W. (1990). *Fundamentals of Fluid Mechanics.* Wiley, Sixth Edition.

UNE-EN 1074-1 (2000). AENOR. *Válvulas para el suministro de agua. Requisitos de aptitud al uso y ensayos de verificación. Parte 1: Requisitos generales.*

UNE-EN 1074-4 (2000). AENOR. *Válvulas para el suministro de agua. Requisitos de aptitud al uso y ensayos de verificación. Parte 4: Purgadores y ventosas.*

Versteeg, H.K.; Malalasekera, W. (1995). *An introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method.* Pearson, Second Edition.

Wylie, E.B.; Streeter, V.L. (1982). *Fluid transients.* FEB Press, Ann Arbor, Michigan, USA.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

B.- PRESUPUESTO



Índice del Presupuesto

Documento número 1: Presupuesto.

Documento número 2: Presupuesto de Recursos por Capítulo.

Documento número 3: Resumen de Capítulos.

Consideraciones previas:

El presupuesto ha sido realizado mediante la versión Demo del programa *Menfis* ya utilizado en las prácticas informáticas de la asignatura de Proyectos a lo largo del primer cuatrimestre del cuarto curso del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales.

A priori el resultado del presupuesto puede resultar excesivo, en parte debido a que, aproximadamente, un 29% del presupuesto total de ejecución material está formado por las licencias de los programas informáticos necesarios para llevar a cabo el trabajo.

A pesar de tenerlas presentes en el presupuesto, el presente trabajo se ha realizado mediante el uso de las diferentes versiones estudiantiles, pero el presupuesto descrito trata de mostrar el coste de realización del TFG partiendo de cero.

El presupuesto se ha dividido en cuatro capítulos que éstos, a su vez, se dividen en subapartados. Los cuatro capítulos principales son:

- Simulación Computacional.
- Ensayos con Aire.
- Ensayos con Agua.
- Honorarios.

| | | |
|--|---|---------------|
| | Determinación de las características de una ventosa comercial mediante técnicas CFD | Pág.: 1 |
| | PRESUPUESTO | Ref.: propre1 |
| | SIMULACIÓN COMPUTACIONAL | Fec.: |

| N.º Orden | Descripción de las unidades de obra | Medición | Precio | Importe |
|-------------------|--|----------|-------------|--------------------|
| | Determinación de las características de una ventosa comercial mediante técnicas CFD | | | |
| 01 | SIMULACIÓN COMPUTACIONAL | | | |
| 01.01 | LICENCIAS DE LOS PROGRAMAS DE CÁLCULO | | | |
| 01.01.01 1.1.1 | ANSYS WORKBENCH | 1,00 | 20.000,00 € | 20.000,00 € |
| 01.01.02 1.1.2 | AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2015 | 1,00 | 8.000,00 € | 8.000,00 € |
| 01.01.03 1.1.3 | AUTODESK AUTOCAD 2015 | 1,00 | 4.775,00 € | 4.775,00 € |
| | Total Capítulo 01.01 | | | 32.775,00 € |
| 01.02 | CÁLCULO COMPUTACIONAL | | | |
| 01.02.01 1.2.1 | ORDENADOR HP | 1,00 | 931,36 € | 931,36 € |
| 01.02.02 1.2.2 | SIMULACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS CFD | 1,75 | 0,10 € | 0,18 € |
| | Total Capítulo 01.02 | | | 931,54 € |
| | Total Capítulo 01 | | | 33.706,54 € |

| | | |
|--|---|---------------|
| | Determinación de las características de una ventosa comercial mediante técnicas CFD | Pág.: 2 |
| | PRESUPUESTO | Ref.: propre1 |
| | DESPLAZAMIENTOS | Fec.: |

| N.º Orden | Descripción de las unidades de obra | Medición | Precio | Importe |
|-------------------|--|----------|------------|-------------------|
| 02 | ENSAYOS CON AIRE | | | |
| 02.01 | DESPLAZAMIENTOS | | | |
| 02.01.01 2.1.1 | BILLETE DE VUELO: MANISES (VALENCIA) - TEL AVIV (ISRAEL) | 1,00 | 200,00 € | 200,00 € |
| 02.01.02 2.1.2 | BILLETE DE VUELO: TEL AVIV (ISRAEL) - MANISES (VALENCIA) | 1,00 | 200,00 € | 200,00 € |
| 02.01.03 2.1.3 | ESTANCIA EN EL HOTEL | 3,00 | 70,00 € | 210,00 € |
| 02.01.04 2.1.4 | DIETAS | 3,50 | 50,00 € | 175,00 € |
| 02.01.05 2.1.5 | DESPLAZAMIENTOS AEROPUERTO-HOTEL | 2,00 | 50,00 € | 100,00 € |
| 02.01.06 2.1.6 | DESPLAZAMIENTOS HOTEL-LABORATORIO | 4,00 | 8,00 € | 32,00 € |
| | Total Capítulo 02.01 | | | 917,00 € |
| 02.02 | ENSAYOS EN EL LABORATORIO | | | |
| 02.02.01 2.2.1 | COSTE ENERGÉTICO | 5.600,00 | 0,10 € | 560,00 € |
| 02.02.02 2.2.2 | ALQUILER DE LA INSTALACIÓN DE ENSAYO | 2,00 | 2.000,00 € | 4.000,00 € |
| | Total Capítulo 02.02 | | | 4.560,00 € |
| 02.03 2.3 | TRANSPORTE DE LA VENTOSA | 2,00 | 200,00 € | 400,00 € |
| 02.04 2.4 | VENTOSA PARA ENSAYOS CON AIRE | 1,00 | 750,00 € | 750,00 € |
| | Total Capítulo 02 | | | 6.627,00 € |

| | | |
|--|---|---------------|
| | Determinación de las características de una ventosa comercial mediante técnicas CFD | Pág.: 3 |
| | PRESUPUESTO | Ref.: propre1 |
| | ENSAYOS CON AGUA | Fec.: |

| N.º Orden | Descripción de las unidades de obra | Medición | Precio | Importe |
|-------------------|---|----------|-------------|--------------------|
| 03 | ENSAYOS CON AGUA | | | |
| 03.01 3.1 | BANCO DE ENSAYO DE VÁLVULAS | 1,00 | 60.000,00 € | 60.000,00 € |
| 03.02 | ACCESORIOS ADICIONALES | | | |
| 03.02.01 3.2.1 | TRANSDUCTORES DE PRESIÓN | 2,00 | 150,00 € | 300,00 € |
| 03.02.02 3.2.2 | TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL | 1,00 | 400,00 € | 400,00 € |
| 03.02.03 3.2.3 | CAUDALÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO DN80 | 1,00 | 1.500,00 € | 1.500,00 € |
| 03.02.04 3.2.4 | PUENTE GRÚA | 1,00 | 900,00 € | 900,00 € |
| 03.02.05 3.2.5 | POLIPASTO | 1,00 | 600,00 € | 600,00 € |
| 03.02.06 3.2.6 | CÁMARA DE ENSAYO DE VENTOSAS CON AGUA (CEVA) | 1,00 | 1.000,00 € | 1.000,00 € |
| 03.02.07 3.2.7 | VÁLVULAS DE COMPUERTA | 2,00 | 600,00 € | 1.200,00 € |
| 03.02.08 3.2.8 | TUBERÍAS DE PVC DN80 | 5,00 | 1,93 € | 9,65 € |
| | Total Capítulo 03.02 | | | 5.909,65 € |
| 03.03 | ENSAYOS EN EL LABORATORIO | | | |
| 03.03.01 3.3.1 | COSTE ENERGÉTICO | 300,00 | 0,10 € | 30,00 € |
| | Total Capítulo 03.03 | | | 30,00 € |
| 03.04 3.4 | ENSAYO PARA EL CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE LOS TRANSDUCTORES DE PRESIÓN | 1,00 | 100,00 € | 100,00 € |
| 03.05 3.5 | ENSAYO PARA EL CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DEL CAUDALÍMETRO | 1,00 | 300,00 € | 300,00 € |
| 03.06 3.6 | VENTOSA PARA ENSAYOS CON AGUA | 1,00 | 750,00 € | 750,00 € |
| | Total Capítulo 03 | | | 67.089,65 € |

| | | |
|--|---|---------------|
| | Determinación de las características de una ventosa comercial mediante técnicas CFD | Pág.: 4 |
| | PRESUPUESTO | Ref.: propre1 |
| | ENSAYOS EN EL LABORATORIO | Fec.: |

| N.º Orden | Descripción de las unidades de obra | Medición | Precio | Importe |
|-------------------|---|----------|---------|---------------------|
| 04 | HONORARIOS | | | |
| 04.01 | ENSAYOS EN EL LABORATORIO | | | |
| 04.01.01 4.1.1 | INGENIERO INDUSTRIAL | 28,00 | 55,00 € | 1.540,00 € |
| 04.01.02 4.1.2 | INGENIERO GITI | 25,00 | 22,00 € | 550,00 € |
| | Total Capítulo 04.01 | | | 2.090,00 € |
| 04.02 | SIMULACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS CFD | | | |
| 04.02.01 4.2.1 | INGENIERO GITI | 80,00 | 22,00 € | 1.760,00 € |
| | Total Capítulo 04.02 | | | 1.760,00 € |
| 04.03 | REALIZACIÓN DE MEMORIA, PLANOS Y PRESUPUESTO | | | |
| 04.03.01 4.3.1 | INGENIERO GITI | 195,00 | 22,00 € | 4.290,00 € |
| | Total Capítulo 04.03 | | | 4.290,00 € |
| | Total Capítulo 04 | | | 8.140,00 € |
| | Total Presupuesto | | | 115.563,19 € |

| | | |
|---|--|---------------|
| Determinación de las características de una ventosa comercial mediante técnicas CFD | | Pág.: 1 |
| PRESUPUESTO DE RECURSOS POR CAPÍTULO | | Ref.: prorec2 |
| | | Fec.: |

| Código | Cantidad | Descripción del recurso | Precio | Importe |
|------------|-----------|--|-----------|------------------|
| 1.1 | | LICENCIAS DE LOS PROGRAMAS DE CÁLCULO | | |
| 1.1.1 | 1,000 | ANSYS WORKBENCH | 20.000,00 | 20.000,00 |
| 1.1.2 | 1,000 | AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2015 | 8.000,00 | 8.000,00 |
| 1.1.3 | 1,000 | AUTODESK AUTOCAD 2015 | 4.775,00 | 4.775,00 |
| | | Total 1.1: | | 32.775,00 |
| 1.2 | | CÁLCULO COMPUTACIONAL | | |
| 1.2.1 | 1,000 | ORDENADOR HP | 931,36 | 931,36 |
| 1.2.2 | 1,750 | SIMULACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS CFD | 0,10 | 0,18 |
| | | Total 1.2: | | 931,54 |
| 2.1 | | DESPLAZAMIENTOS | | |
| 2.1.1 | 1,000 | BILLETE DE VUELO: MANISES (VALENCIA) - TEL AVIV (ISRAEL) | 200,00 | 200,00 |
| 2.1.2 | 1,000 | BILLETE DE VUELO: TEL AVIV (ISRAEL) - MANISES (VALENCIA) | 200,00 | 200,00 |
| 2.1.3 | 3,000 | ESTANCIA EN EL HOTEL | 70,00 | 210,00 |
| 2.1.4 | 3,500 | DIETAS | 50,00 | 175,00 |
| 2.1.5 | 2,000 | DESPLAZAMIENTOS AEROPUERTO-HOTEL | 50,00 | 100,00 |
| 2.1.6 | 4,000 | DESPLAZAMIENTOS HOTEL-LABORATORIO | 8,00 | 32,00 |
| | | Total 2.1: | | 917,00 |
| 2.2 | | ENSAYOS EN EL LABORATORIO | | |
| 2.2.1 | 5.600,000 | COSTE ENERGÉTICO | 0,10 | 560,00 |
| 2.2.2 | 2,000 | ALQUILER DE LA INSTALACIÓN DE ENSAYO | 2.000,00 | 4.000,00 |
| | | Total 2.2: | | 4.560,00 |
| 2.3 | | TRANSPORTE DE LA VENTOSA | | |
| 2.3 | 2,000 | TRANSPORTE DE LA VENTOSA | 200,00 | 400,00 |
| | | Total 2.3: | | 400,00 |
| 2.4 | | VENTOSA PARA ENSAYOS CON AIRE | | |
| 2.4 | 1,000 | VENTOSA PARA ENSAYOS CON AIRE | 750,00 | 750,00 |
| | | Total 2.4: | | 750,00 |
| 3.1 | | BANCO DE ENSAYO DE VÁLVULAS | | |
| 3.1 | 1,000 | BANCO DE ENSAYO DE VÁLVULAS | 60.000,00 | 60.000,00 |
| | | Total 3.1: | | 60.000,00 |
| 3.2 | | ACCESORIOS ADICIONALES | | |
| 3.2.1 | 2,000 | TRANSDUCTORES DE PRESIÓN | 150,00 | 300,00 |
| 3.2.2 | 1,000 | TRANSDUCTOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL | 400,00 | 400,00 |
| 3.2.3 | 1,000 | CAUDALÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO DN80 | 1.500,00 | 1.500,00 |
| 3.2.4 | 1,000 | PUENTE GRÚA | 900,00 | 900,00 |
| 3.2.5 | 1,000 | POLIPASTO | 600,00 | 600,00 |
| 3.2.6 | 1,000 | CÁMARA DE ENSAYO DE VENTOSAS CON AGUA (CEVA) | 1.000,00 | 1.000,00 |
| 3.2.7 | 2,000 | VÁLVULAS DE COMPUERTA | 600,00 | 1.200,00 |
| 3.2.8 | 5,000 | TUBERÍAS DE PVC DN80 | 1,93 | 9,65 |
| | | Total 3.2: | | 5.909,65 |
| 3.3 | | ENSAYOS EN EL LABORATORIO | | |
| 3.3.1 | 300,000 | COSTE ENERGÉTICO | 0,10 | 30,00 |
| | | Total 3.3: | | 30,00 |
| 3.4 | | ENSAYO PARA EL CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE LOS TRANSDUCTORES DE PRESIÓN | | |
| 3.4 | 1,000 | ENSAYO PARA EL CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE LOS TRANSDUCTORES DE PRESIÓN | 100,00 | 100,00 |
| | | Total 3.4: | | 100,00 |
| 3.5 | | ENSAYO PARA EL CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DEL CAUDALÍMETRO | | |
| 3.5 | 1,000 | ENSAYO PARA EL CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DEL CAUDALÍMETRO | 300,00 | 300,00 |
| | | Total 3.5: | | 300,00 |
| 3.6 | | VENTOSA PARA ENSAYOS CON AGUA | | |
| 3.6 | 1,000 | VENTOSA PARA ENSAYOS CON AGUA | 750,00 | 750,00 |
| | | Total 3.6: | | 750,00 |

| | | |
|--|---|---------------|
| | Determinación de las características de una ventosa comercial mediante técnicas CFD | Pág.: 2 |
| | PRESUPUESTO DE RECURSOS POR CAPÍTULO | Ref.: prorec2 |
| | | Fec.: |

| Código | Cantidad | Descripción del recurso | Precio | Importe |
|------------|----------|---|--------|-------------------|
| 4.1 | | ENSAYOS EN EL LABORATORIO | | |
| 4.1.1 | 28,000 | INGENIERO INDUSTRIAL | 55,00 | 1.540,00 |
| 4.1.2 | 25,000 | INGENIERO GITI | 22,00 | 550,00 |
| | | Total 4.1: | | 2.090,00 |
| 4.2 | | SIMULACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS CFD | | |
| 4.2.1 | 80,000 | INGENIERO GITI | 22,00 | 1.760,00 |
| | | Total 4.2: | | 1.760,00 |
| 4.3 | | REALIZACIÓN DE MEMORIA, PLANOS Y PRESUPUESTO | | |
| 4.3.1 | 195,000 | INGENIERO GITI | 22,00 | 4.290,00 |
| | | Total 4.3: | | 4.290,00 |
| | | Total recursos | | 115.563,19 |

| | | |
|--|---|---------------|
| | Determinación de las características de una ventosa comercial mediante técnicas CFD | Pág.: 1 |
| | RESUMEN DE CAPÍTULOS | Ref.: prores3 |
| | | Fec.: |

| Nº Orden | Código | Descripción de los capítulos | Importe |
|----------|--------|--|-----------|
| 01 | 1 | SIMULACIÓN COMPUTACIONAL | 33.706,54 |
| 01.01 | 1.1 | LICENCIAS DE LOS PROGRAMAS DE CÁLCULO | 32.775,00 |
| 01.02 | 1.2 | CÁLCULO COMPUTACIONAL | 931,54 |
| 02 | 2 | ENSAYOS CON AIRE | 6.627,00 |
| 02.01 | 2.1 | DESPLAZAMIENTOS | 917,00 |
| 02.02 | 2.2 | ENSAYOS EN EL LABORATORIO | 4.560,00 |
| 03 | 3 | ENSAYOS CON AGUA | 67.089,65 |
| 03.02 | 3.2 | ACCESORIOS ADICIONALES | 5.909,65 |
| 03.03 | 3.3 | ENSAYOS EN EL LABORATORIO | 30,00 |
| 04 | 4 | HONORARIOS | 8.140,00 |
| 04.01 | 4.1 | ENSAYOS EN EL LABORATORIO | 2.090,00 |
| 04.02 | 4.2 | SIMULACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS CFD | 1.760,00 |
| 04.03 | 4.3 | REALIZACIÓN DE MEMORIA, PLANOS Y PRESUPUESTO | 4.290,00 |

| | |
|---|-------------------|
| TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL | 115.563,19 |
| 13 % Gastos Generales | 15.023,21 |
| 6 % Beneficio Industrial | 6.933,79 |
| TOTAL EJECUCIÓN POR CONTRATA | 137.520,19 |
| 21 % I.V.A. | 28.879,24 |
| TOTAL PRESUPUESTO C/IVA | 166.399,43 |

Asciende el presupuesto proyectado, a la expresada cantidad de:
CIENTO SESENTA Y SEIS MIL TRESCIENTOS NOVENTA Y NUEVE EUROS CON CUARENTA Y TRES CÉNTIMOS

9 de Junio de 2014



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

C.- PLANOS



Índice de Planos

Plano número 1: Despiece de la Ventosa.

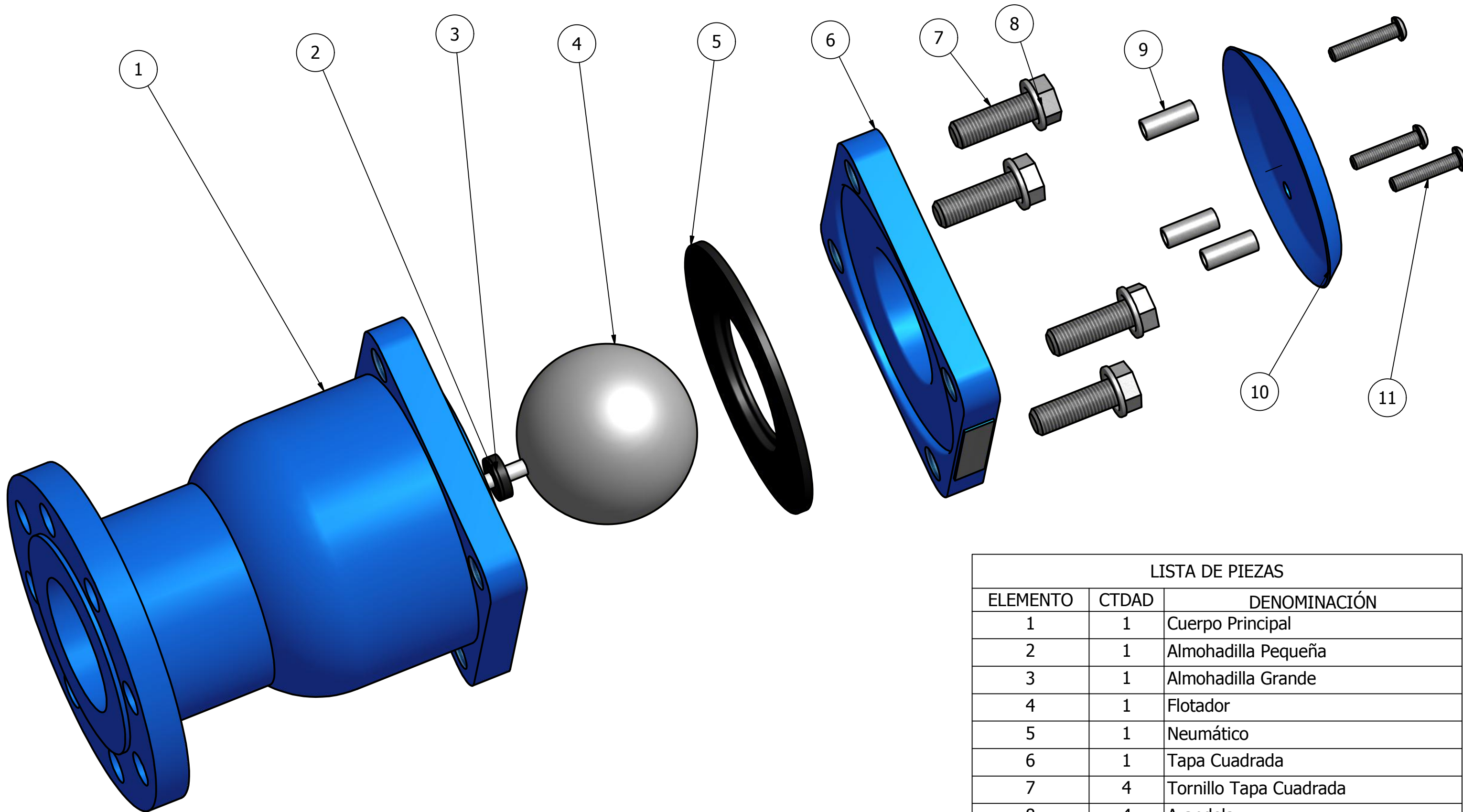
Plano número 2: Ventosa.

Plano número 3: Cuerpo Principal.

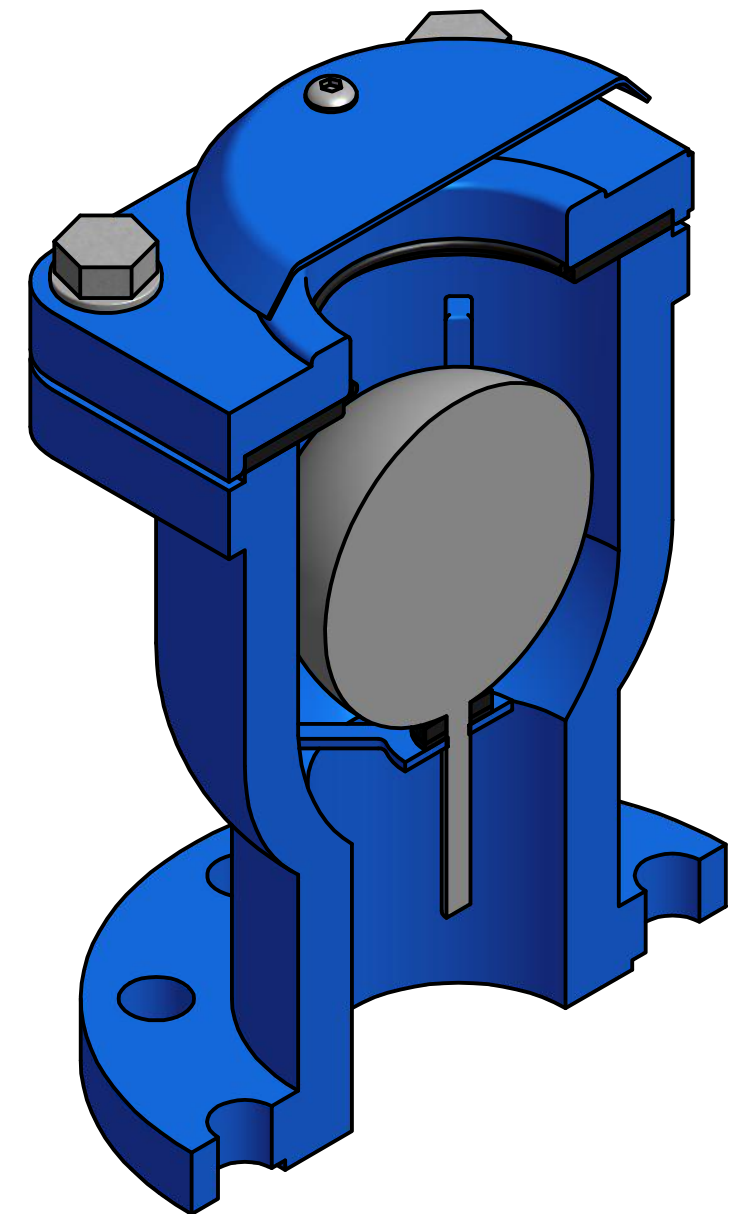
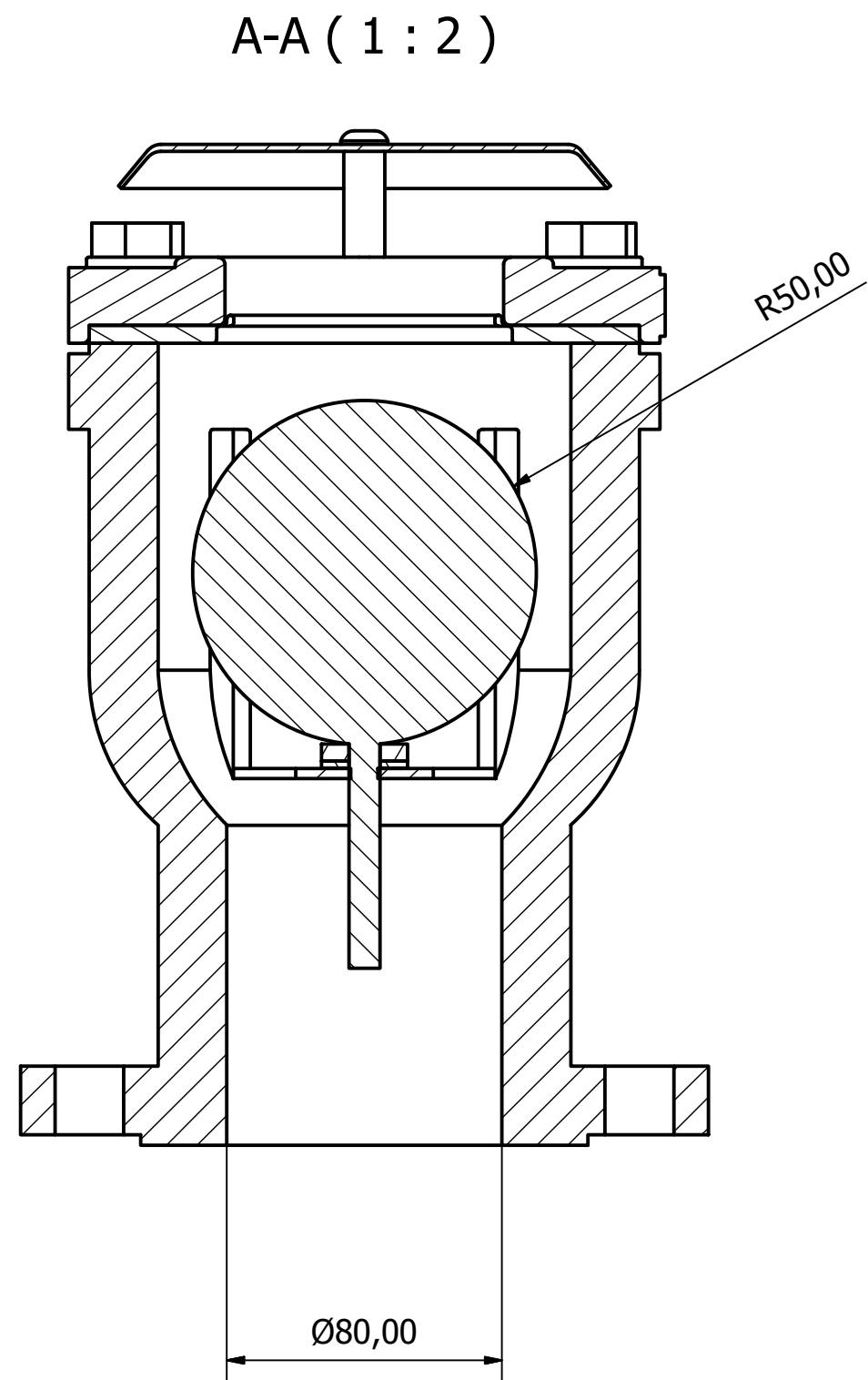
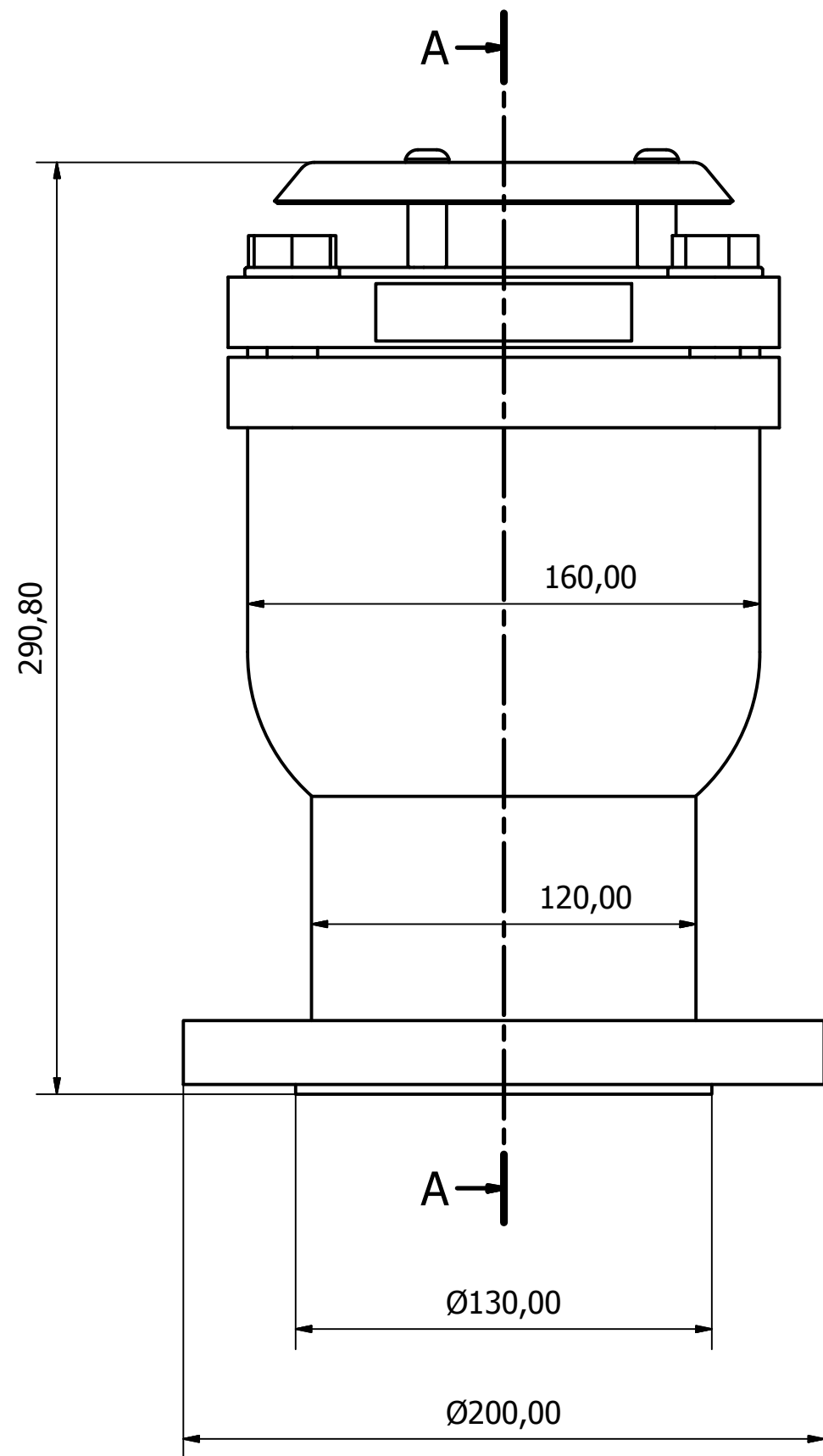
Plano número 4: Cámara de Ensayo de Ventosas con Agua (CEVA).

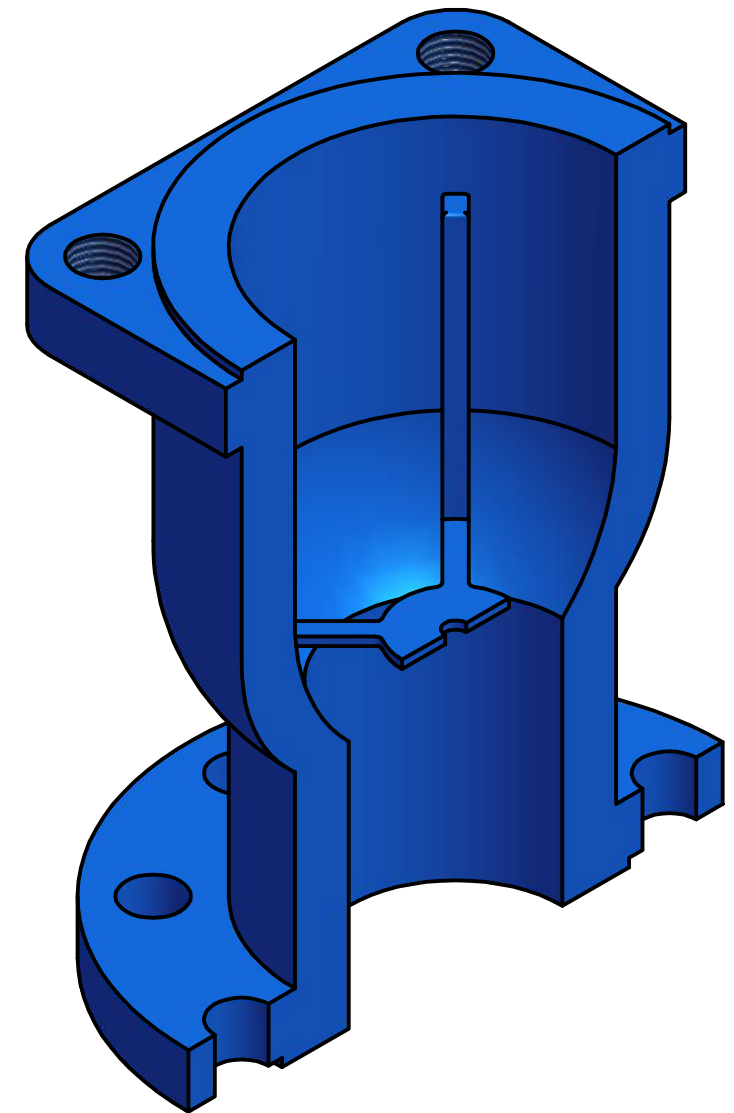
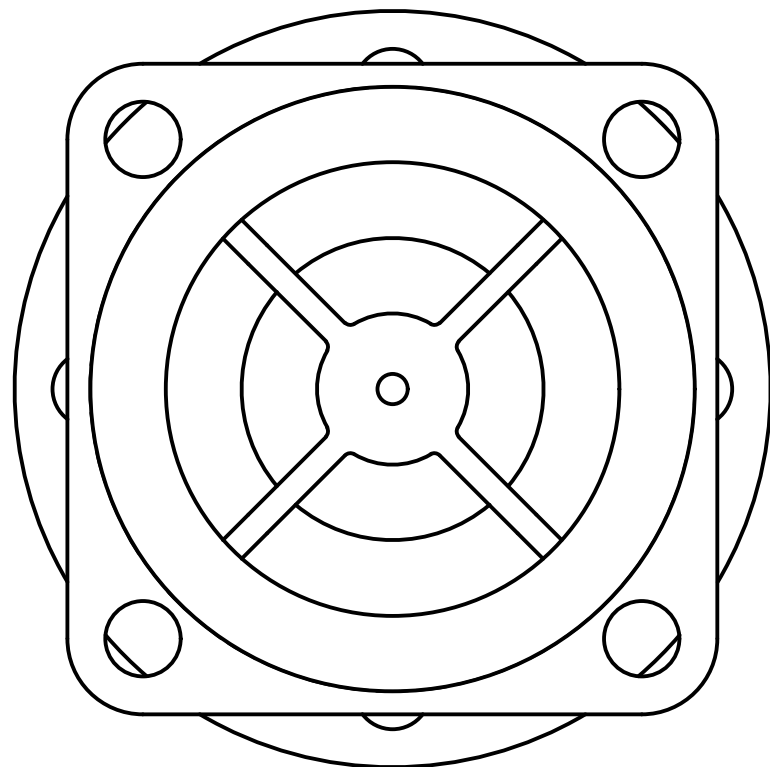
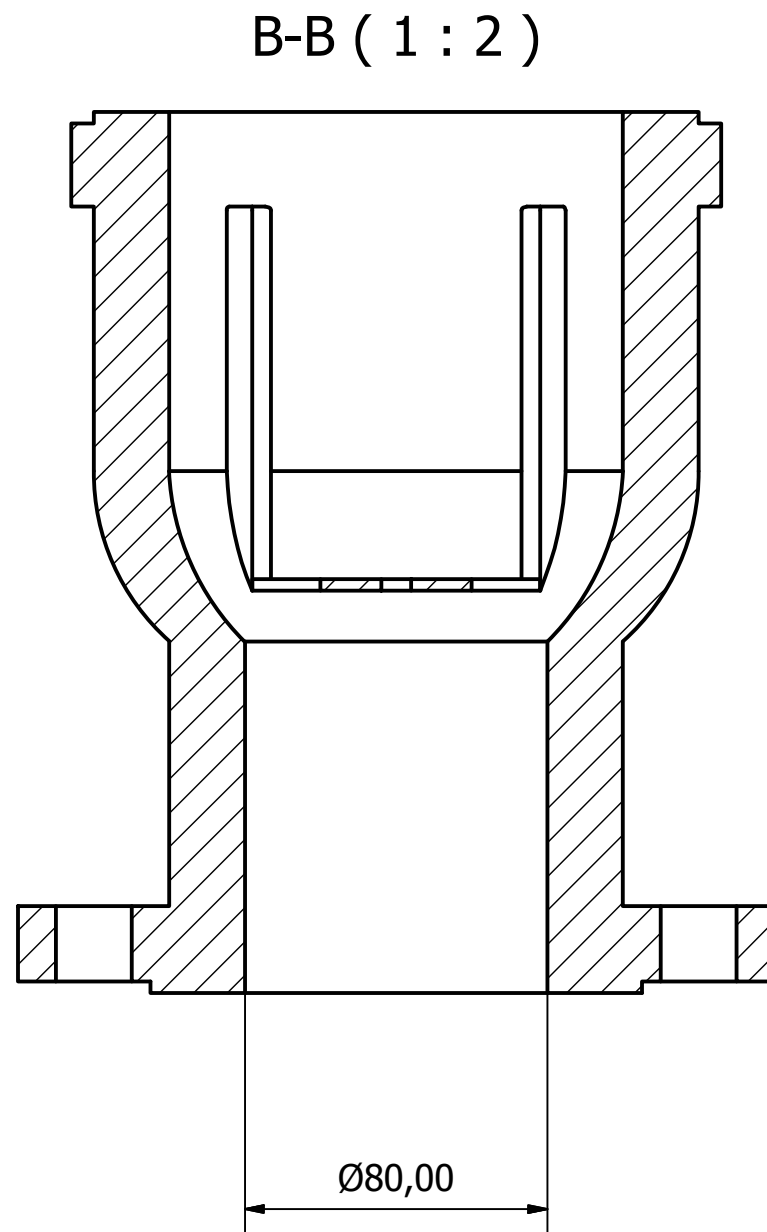
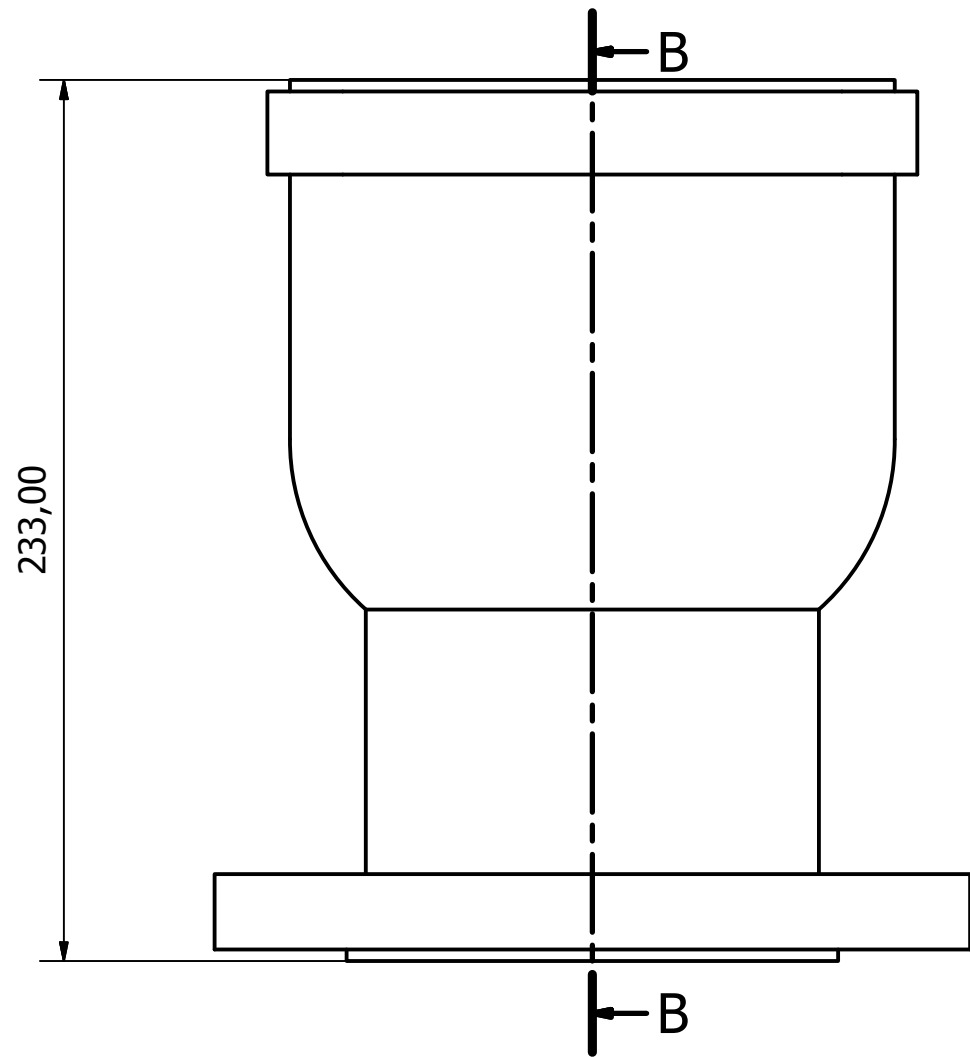
Consideraciones previas:

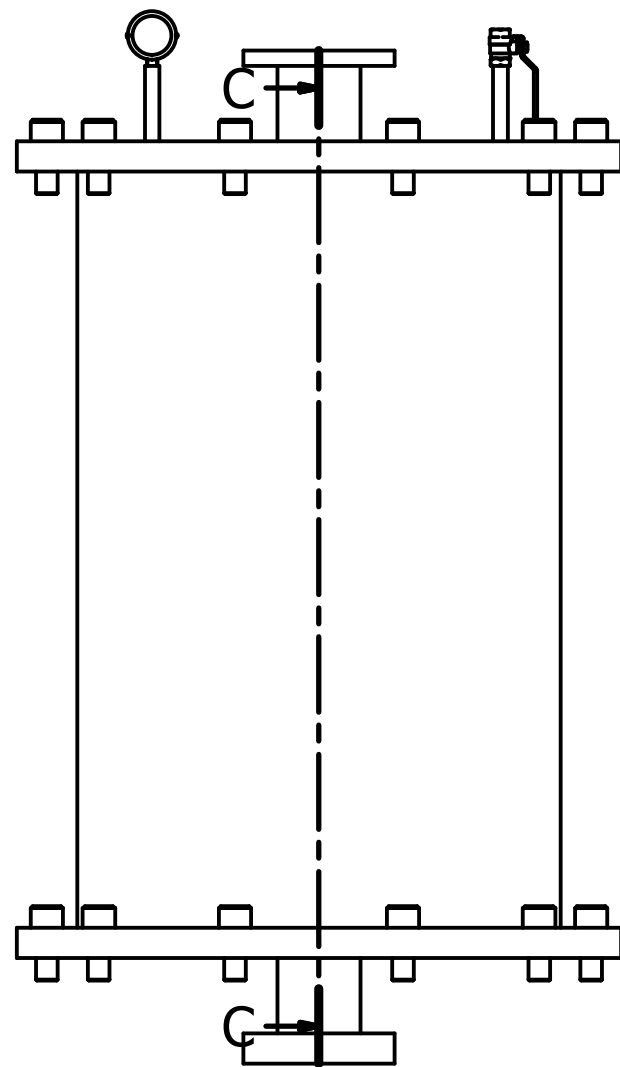
El conjunto de planos han sido realizados mediante la versión estudiantil del programa *Autodesk Inventor Professional* ya utilizado en las prácticas informáticas de la asignatura de Ingeniería Gráfica a lo largo del primer cuatrimestre del cuarto curso del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales.



| LISTA DE PIEZAS | | |
|-----------------|-------|------------------------|
| ELEMENTO | CTDAD | DENOMINACIÓN |
| 1 | 1 | Cuerpo Principal |
| 2 | 1 | Almohadilla Pequeña |
| 3 | 1 | Almohadilla Grande |
| 4 | 1 | Flotador |
| 5 | 1 | Neumático |
| 6 | 1 | Tapa Cuadrada |
| 7 | 4 | Tornillo Tapa Cuadrada |
| 8 | 4 | Arandela |
| 9 | 3 | Cilindro Hueco |
| 10 | 1 | Tapa Superior |
| 11 | 3 | Tornillo Tapa Superior |







C-C (1 : 10)

