

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



DESARROLLO DE EQUIPOS PARA EL ENSAYO DE VENTOSAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA SEMEJANZA HIDRODINÁMICA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA
AGROALIMENTARIA Y DEL MEDIO RURAL

ALUMNO:
FRANCISCO JOSÉ GARCÍA MARES

TUTOR:
IBAN BALBASTRE PERALTA

COTUTOR:
PEDRO LUIS IGLESIAS REY

Curso Académico:
2015-2016

VALENCIA, SEPTIEMBRE 2015

Título del trabajo Fin de Grado:
**DESARROLLO DE EQUIPOS PARA EL ENSAYO DE
VENTOSAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA
SEMEJANZA HIDRODINÁMICA.**

Autor: ***GARCÍA MARES, FRANCISCO JOSÉ***

TUTOR	Dr. IBAN BALBASTRE PERALTA	Lugar de realización	Valencia
COTUTOR 1	Dr. PEDRO L. IGLESIAS REY	Fecha de lectura	Septiembre 2015
COTUTOR 2			

Resumen:

En la operación de las redes hidráulicas a presión uno de los mayores causantes de problemas es el aire atrapado en las mismas. Problemas que pueden tener en ocasiones consecuencias fatales para la integridad de la instalación.

La solución más empleada en la actualidad para extraer el aire que está atrapado en las tuberías es la utilización de ventosas. Hay varios tipos de ventosas dependiendo de la función que deban cumplir y se deberá seleccionar la más adecuada para cada situación. Para la correcta utilización de las ventosas debe ser imprescindible el conocimiento de las características de las mismas. En la actualidad para la caracterización de ventosas se está utilizando el ensayo experimental en laboratorio. Para la realización de este tipo de ensayos se necesita poder generar el suficiente caudal de aire para ensayarlas. En ventosas de gran tamaño esta cantidad es tal que hace inviable su ensayo en unas instalaciones ordinarias.

Esto en lo que respecta a la expulsión de aire, porque en el ensayo de admisión el problema es mayor dado que lo que se debe generar es vacío y para poder generar esos caudales de aire a presión negativa los equipos que se requieren son prácticamente inviables.

En este trabajo se plantea la validación de un método alternativo a estos ensayos. Aplicando la semejanza hidrodinámica se pueden realizar los ensayos de las ventosas con agua, un fluido en el que es mucho más fácil la generación de los caudales necesarios para la caracterización de las ventosas.

Se realizará el diseño del equipamiento necesario para el ensayo, la simulación en CFD tanto en agua como en aire y se validará la semejanza hidrodinámica en la caracterización de ventosas.

Palabra clave:

Semejanza hidrodinámica. Ventosas, válvulas de aireación, modelos CFD, dinámica de fluidos computacional

Resum:

En l'operació de les xarxes hidràuliques a pressió un dels majors causants de problemes és l'aire atrapat en les mateixes. Problemes que poden tenir en ocasions conseqüències fatals per a la integritat de la instal·lació.

La solució més emprada en l'actualitat per extreure l'aire que està atrapat a les canonades és la utilització de ventoses. Hi ha diversos tipus de ventoses depenent de la funció que hagin de complir i s'haurà de seleccionar la més adequada per a cada situació.

Per a la correcta utilització de les ventoses ha de ser imprescindible el coneixement de les característiques de les mateixes. En l'actualitat per a la caracterització de ventoses s'està utilitzant l'assaig experimental en laboratori. Per a la realització d'aquest tipus d'assajos es necessita poder generar el suficient cabal d'aire per assajar. En ventoses de grans dimensions aquesta quantitat és tal que fa inviable el seu assaig en unes instal·lacions ordinàries.

Això pel que fa a l'expulsió d'aire, perquè en l'assaig d'admissió el problema és més gran ja que el que s'ha de generar és buit i per poder generar aquests cabals d'aire a pressió negativa els equips que es requereixen són pràcticament inviables.

En aquest treball es planteja la validació d'un mètode alternatiu a aquests assajos. Aplicant la semblança hidrodinàmica es poden realitzar els assajos de les ventoses amb aigua, un fluid en el qual és molt més fàcil la generació dels cabals necessaris per a la caracterització de les ventoses.

Es realitzarà el disseny de l'equipament necessari per a l'assaig, la simulació en CFD tant en aigua com en aire i es validarà la semblança hidrodinàmica en la caracterització de ventoses.

Palabra clave:

Ventoses, vàlvules de ventilació, models CFD, dinàmica de fluids comptacional

Abstract:

In the operation of pressurized hydraulic networks one of the major causes of problems is the air trapped therein. Problems can sometimes have fatal consequences for the integrity of the installation.

The currently employed solution to remove the air trapped in the pipes is the use of suction cups. There are various types of suction cups depending on the function to be fulfilled and should select the most appropriate for each situation.

For correct use of the suction cups it must be knowledge of the essential characteristics thereof. At present for the characterization of suckers you are using the experimental laboratory testing. To carry out this type of testing is needed to generate sufficient air flow to test them. In windy large this amount is such that it unfeasible in a common test facilities.

This in regard to the expulsion of air, because the admissions essay the problem is greater because what must be generated is empty and to generate these flows of negative pressure air equipment required are practically unfeasible.

In this work the validation of an alternative method to these trials are about. Applying hydrodynamic similarity tests can be performed with suction cups of water, a fluid in which it is much easier to generate flow needed for characterization of the suction cups. The design of the equipment needed for testing, CFD simulation in both water and air and hydrodynamic similarity is passed to the characterization of suction is performed.

Palabra clave:

Suckers, ventilation valves, CFD modeling, computational fluid dynamics

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a todo aquel que de un modo u otro ha colaborado para que este trabajo llegase a buen fin, y en particular a Manuel Sanchez y a mis tutores Iban Balbastre y Pedro L. Iglesias.

Maite, Blanca y Héctor, ilumináis cada día de mi vida

Índice

1. Introducción	1
1.1 El aire en las instalaciones	1
1.2 Las ventosas	4
1.3 Curva característica de ventosas.....	7
1.4 Verificación experimental de ventosas.....	9
2. Objetivos.	11
2.1 Normativas aplicables en España hasta 2001.....	11
2.2 Normativa aplicable en España actualmente.....	12
2.3 Métodos de ensayo de ventosas con aire	14
2.4 Nuevas metodologías. Ensayos con agua	15
2.4.1 Semejanza hidrodinámica en el ensayo de ventosas	16
2.4.2 Verificación experimental de la semejanza hidrodinámica.....	17
3. Material y métodos	19
3.1 Diseño del equipo de ensayo de ventosas con agua	19
3.1.1 Primer prototipo	19
3.1.2 Segundo prototipo	21
3.1.3 Tercer prototipo.....	22
3.1.4 Adaptación del equipamiento del laboratorio a los ensayos	23
3.2 Protocolo de ensayo de ventosas con agua.....	27
3.2.1 Fase 1. Preparación del equipo y elementos a ensayar	27
3.2.2 Fase 2. Realización de los ensayos.....	29
3.2.3 Fase 3. Cierre del ensayo	30
4. Resultados y discusión de los resultados.....	31
4.1 Resultados obtenidos en el ensayo físico	31
4.2 Ensayos realizados en el primer prototipo	31
4.3 Ensayos realizados en el segundo prototipo	32
4.4 Ensayos realizados en el tercer prototipo	33
5. Conclusiones.....	37
5.1 Conclusiones del primer prototipo	37
5.2 Conclusiones del segundo prototipo	38
5.3 Conclusiones del tercer prototipo	40
5.4 Conclusiones finales.....	41
6. Bibliografía	43
Anexos	44
Anexo I Planos	
Anexo II Listados de los ensayos	

Índice de figuras

Figura 1.1.- Coeficiente Bunsen aplicado en agua	2
Figura 1.2.- Puntos de separación y acumulación del aire Las ventosas	2
Figura 1.3.- Colapso de tubo de acero, consecuencia de la depresión soportada.	5
Figura 1.4.- Balance de fuerzas en el funcionamiento de una ventosa.	7
Figura 1.5.- Gráfico de la curva característica de una ventosa de gran orificio.	8
Figura 1.6.- Comparación entre un ensayo realizado y la información del fabricante. ...	10
Figura 1.7.- Ventosas con misma brida de conexión y diferente capacidad.....	10
Figura 2.1.- Esquema de instalación de ensayo de expulsión de aire (UNE 1074-4:2000).....	13
Figura 2.2.- Ejemplos de instalación de ensayo de admisión de aire (UNE 1074-4:2000).....	14
Figura 3.1.- Imagen y descripción del prototipo 1	21
Figura 3.2.- Imagen y descripción del prototipo 2	22
Figura 3.3.- Imagen y descripción del prototipo 3	23
Figura 3.4.- Anillo de compensación de presiones.....	24
Figura 3.5.- Sistema de amortiguación de la señal de presión mediante calderín	25
Figura 3.6.- Comparación de señal de presión registrada.....	26
Figura 3.7.- Detalle Inmovilización del flotador por varilla roscada.....	28
Figura 4.1.- Comparativa semejanza hidrodinámica - ensayo físico en ventosa 2"	32
Figura 4.2.- Comparativo prototipo 2 - ensayo aire en ventosas 3" con salida hacia abajo	33
Figura 4.3.- Comparativo caudal para tipos de accesorio de expulsión en ventosa 3"	34
Figura 4.4.- Comparativo prototipo 3 - ensayo aire en ventosas 3"	35
Figura 4.5.- Detalle del área útil de uso en ventosas	35
Figura 5.1.- Catálogo comercial. Tamaños de un mismo modelo	38
Figura 5.2.- Detalle Comparativa ensayo aire con modelo 5 con prototipo 2	39
Figura 5.3.- Detalle Comparativa ensayo aire con modelo 5 con prototipo 3	41

Índice de tablas

Tabla 1.1.- Relación entre la presión y la cantidad de aire disuelto a 20°C.....	1
Tabla 1.2.- Características de los diferentes Flujos.	9
Tabla 4.1.- Características de los diferentes Flujos.	35

Índice de anexos

I. Planos

- Plano 1.- Prototipo (planta, alzado seccionado y sección A-A´).
- Plano 2 - Prototipo 2 (Alzado seccionado).
- Plano 3 - Prototipo 2 (planta y sección A-A´).
- Plano 4 - Prototipo 3 (planta, alzados, sección A-A´ y sección B-B´).

II. Calibración equipos de medición

- Calibración Caudalímetro DN 80.
- Calibración Transductores Keller.
- Calibración Transductores diferenciales Kobold.
- Resultados de amortiguación de señal.

III. Listados de ensayos

- Ventosa I – Modelo C – Prototipo 1.0. Completo.
- Ventosa I – Modelo A – Prototipo 2.0. Agua.
- Ventosa I – Modelo A – Prototipo 2.0. Aplicación semejanza.
- Ventosa I – Modelo A – Prototipo 3.0. Agua.
- Ventosa I – Modelo A – Prototipo 3.0. Aplicación semejanza.
- Ventosa I – Modelo B – Prototipo 3.0. Agua.
- Ventosa I – Modelo B – Prototipo 3.0. Aplicación semejanza.
- Ventosa B – Todas las salidas – Prototipo 2.0. Agua.
- Ventosa B – Salida Abajo – Prototipo 2.0. Aplicación semejanza.
- Ventosa B – Salida Abajo – Prototipo 3.0. Agua.
- Ventosa B – Salida Abajo – Prototipo 3.0. Aplicación semejanza.
- Ventosa B – Salida Seta – Prototipo 2.0. Aplicación semejanza.
- Ventosa B – Salida Seta – Prototipo 3.0. Agua.
- Ventosa B – Salida Seta – Prototipo 3.0. Aplicación semejanza.
- Ventosa B – Salida Lateral – Prototipo 2.0. Aplicación semejanza.
- Ventosa B – Salida Lateral – Prototipo 3.0. Agua.
- Ventosa B – Salida Lateral – Prototipo 3.0. Aplicación semejanza.

1. Introducción

1.1 El aire en las instalaciones

Las conducciones de agua a presión son diseñadas para eso precisamente, para transportar agua a presión, pero no solo circula agua por ellas. Otro elemento que transportan en mayor o menor medida es aire. Dicho aire en muchas ocasiones se va acumulando a lo largo de la instalación, quedando atrapado en puntos críticos de la misma. El aire atrapado en las tuberías es el causante de muchos problemas, algunos de los cuales resultan muy graves y pueden ser letales para la integridad del sistema.

Hay tres causas fundamentales de la presencia de aire en las tuberías:

- **La capacidad de contener aire disuelto del agua.** La capacidad que tiene el agua de llevar disuelta una cantidad de aire es proporcional a la presión y a la temperatura. En la tabla 1.1 se establece una relación entre la presión a la que está sometida el agua y su capacidad de contener aire disuelto en su interior (Guarga et al.,1990).

Tabla 1.1.- Relación entre la presión y la cantidad de aire disuelto a 20°C.

Presión del agua (Kp/cm²)	Aire disuelto (gr aire /m³ agua)
0.025	0.29
1.00	11.70
5.00	58.60
10.00	117.10
20.00	234.30
25.00	292.80
30.00	351.40

Por otro lado se encuentra el coeficiente de Bunsen (Carlos, 2007) que se define como el volumen de gas (en litros) reducido a condiciones normales (0°C y 760mm de presión) que puede llegar a disolverse en 1 litro de disolvente (agua en este caso) a la presión parcial de 1atm y a una presión determinada. Su evolución para el caso del agua se expresa en la figura 1.1.

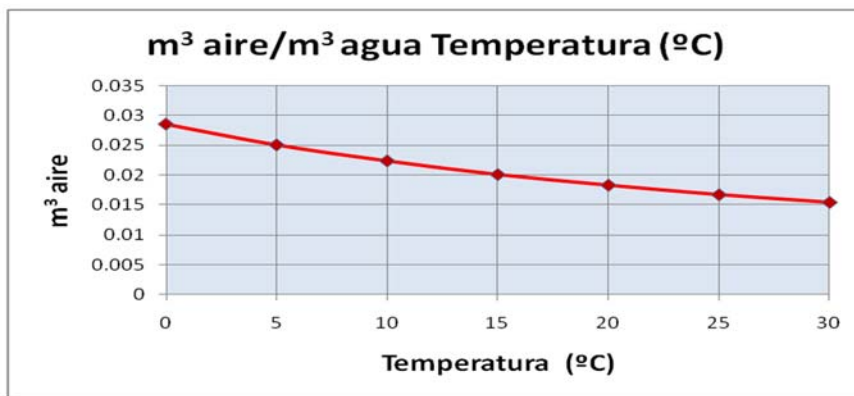


Figura 1.1.- Coeficiente Bunsen aplicado en agua.

La capacidad de contener aire disuelto por parte del agua será una combinación de ambos factores, por lo que conforme disminuya la presión y aumente la temperatura dentro de la conducción dicho aire tenderá a liberarse en el interior de la misma. En la figura 1.2 se detallan los diferentes puntos en los que se puede liberar dicho aire y aquellos lugares donde se acumularán estas bolsas de aire atrapado. Como se puede observar se acumula en los puntos altos de la instalación, en cambios bruscos de pendiente o en tramos horizontales muy prolongados.

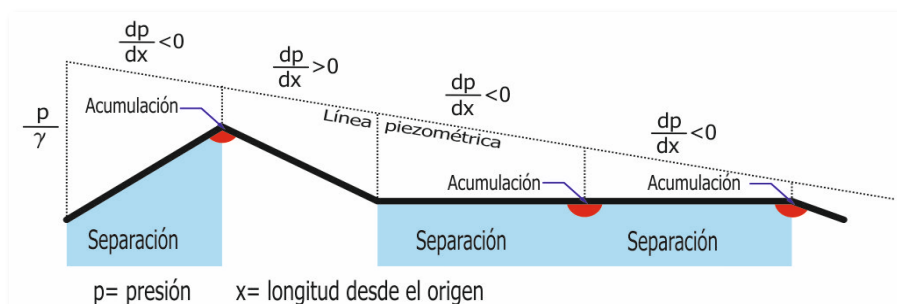


Figura 1.2.- Puntos de separación y acumulación del aire.

- **Durante el normal funcionamiento de la instalación** puede haber entradas más o menos importantes de aire a la misma, por eventuales vórtices en las aspiraciones de las estaciones de bombeo, el funcionamiento de ventosas admitiendo aire durante episodios transitorios de la instalación o pequeñas fisuras en regiones de la instalación en las que la presión es negativa. En todos estos casos la acumulación de aire siempre se producirá en los mismos puntos de la conducción (figura 1.2) sin que sean detectados si no sobrepasan unos valores.

- **Interrupción temporal de servicio.** Otro de los posibles motivos de la presencia de aire en las conducciones son las interrupciones del servicio programadas o accidentales (cortes de energía o incluso roturas de tuberías) en instalaciones con perfil irregular. La parada del sistema y la pérdida de presión de bombeo conlleva la modificación del rango de presiones piezométricas y la aparición de presiones negativas en lugares que no estaban contempladas y con ello nuevos posibles puntos de entrada de aire a través de juntas de tuberías, válvulas o acometidas no estancas. Otro factor a tener en cuenta es la posibilidad de que los usuarios generalmente tendrán las tomas de los puntos de consumo abiertos. Ello implicará, dependiendo del tipo de consumo y de la cota de los mismos (p.e. carga de depósitos), un vaciado mayor de la tubería o la entrada por los mismos de aire a la instalación. Todo ello se agrava en instalaciones como las de riego, en las que las interrupciones de suministro son lo habitual en ramales de riego y la temporalidad en la utilización de las mismas a lo largo del año, estando paradas durante largos periodos de tiempo.

Los efectos de ese aire atrapado en las instalaciones son muy nocivos. La densidad del aire ρ_{aire} en condiciones normales es de $1,23 \text{ kg/m}^3$, o lo que es lo mismo, $1/800$ la densidad del agua ρ_{agua} . Pero su densidad varía mucho cuando se modifica la presión a la que está sometido, en cuyo caso, suponiéndole un comportamiento como gas perfecto, se comporta siguiendo la ley

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad [1.1]$$

En [1.1] RT es la constante característica del aire, T y p^* son la temperatura y la presión absoluta a las que está sometido el mismo, además hay que considerar la elasticidad del aire caracterizada por su módulo de compresibilidad K_{aire} , coincidente con la presión absoluta ($K_{\text{aire}}=p^*$) cuando el proceso es isoterma (a temperatura constante). Como resultado en condiciones normales el agua es 20.000 veces menos compresible que el aire. Pero aun con una presión de 100 bares el agua sigue siendo 200 veces menos compresible que el aire.

Son estas dos propiedades características del aire, la gran compresibilidad y la baja densidad, las causantes de los problemas que ocasionan las bolsas de aire atrapado en las instalaciones

de agua a presión. Dependiendo del volumen de aire atrapado y de la situación del mismo en las instalaciones los problemas pueden ser diversos como:

- Incremento de las pérdidas de carga en la instalación.
- Regímenes transitorios no deseados.
- Rendimiento deficiente de los sistemas de bombeo.
- Mal funcionamiento de los sistemas de filtrado.
- Vibraciones en las tuberías de la instalación.
- Corrosión prematura de las conducciones
- Desgaste prematuro de equipos con elementos móviles.
- Errores en la medida de caudal.
- Reducción de la capacidad de transporte de agua por la reducción de la sección de paso.

Pero con diferencia el mayor riesgo para la integridad de la instalación son las sobrepresiones que se pueden producir por la acumulación de bolsas de aire en los puntos altos de la misma y las sobrepresiones que generarán durante los procesos de arranque del sistema hidráulico. Es difícil calcular el valor de las sobrepresiones que se generan en un arranque, dependiendo no solo de la cantidad de aire acumulado sino de la localización del mismo. Esas sobrepresiones en cualquier caso serán varias veces la presión normal de funcionamiento para la que está calculada la instalación, con lo que la integridad de la instalación correrá el peligro de no soportar esas sobrepresiones y romperse por el punto más débil.

1.2 Las ventosas

Según la AWWA “se denomina ventosa a los dispositivos hidromecánicos diseñados para liberar o admitir aire de forma automática durante el llenado, vaciado, o el funcionamiento de una tubería de agua o sistema” (AWWA, 2001).

Otra definición sería la que aplica el CIRIA (Reader et al 1997) donde la ventosa se define como “...una válvula ubicada en punto estratégico de un sistema con la finalidad de expulsar aire cuando la instalación se está llenando de aire o bien admitir aire cuando se vacía...”. Los tres usos de las ventosas son:

- Facilitar la salida del aire que contiene la conducción durante el proceso de llenado, consiguiendo que la evacuación del mismo sea lo suficientemente rápida y eficaz para que ese aire no deba recorrer toda la conducción ni se comprima por efecto del aumento de presión.
- La entrada de grandes cantidades de aire durante el vaciado de la conducción para evitar la generación de depresiones en la conducción como consecuencia del efecto pistón que crea la salida del agua de la conducción y que podría tener consecuencias catastróficas. Estas consecuencias pueden ser desde succiones de juntas, roturas de tuberías o incluso en el caso de tramos tuberías metálicas no calculadas para trabajar en depresión podría producir su colapso (figura 1.3).



Figura 1.3.- Colapso de tubo de acero, consecuencia de la depresión soportada.

- Purga de las pequeñas cantidades de aire que se van generando en el funcionamiento de la instalación, así como restos de la puesta en marcha que queden todavía en la instalación y estén circulando por la misma.

El funcionamiento de una ventosa para realizar estas operaciones resulta bastante simple en la teoría. En la práctica cada modelo de ventosa no se comporta exactamente así. En funcionamiento teórico el siguiente:

- Cuando la instalación se encuentra parada y la tubería llena de aire la ventosa estará abierta, con el flotador en la posición inferior de su recorrido. Al arrancar la instalación el agua avanza por la tubería y aire debe salir por la ventosa con la mayor facilidad posible, evitando que el flotador se vea arrastrado por la velocidad del aire. Cuando el

agua llegue a la ventosa el flotador debe subir y cerrarse la ventosa evitando la salida del agua.

- Cuando la instalación está en funcionamiento y la conducción se encuentra llena de agua la ventosa debe permanecer cerrada. Las cantidades de aire que se producen en el funcionamiento serán evacuadas por los purgadores o por la función de purga de las ventosas trifuncionales.
- En caso de parada de la instalación, se creará una bajada de presión en el interior de la tubería y cuando la presión sea negativa la ventosa debe abrir y dejar entrar la máxima cantidad de aire posible para minimizar estas presiones negativas.

Matemáticamente este funcionamiento se analiza mediante el siguiente balance de fuerzas (fig 1.4).

$$\gamma_f \nabla_f < \gamma \nabla_s + p_t A_0 \quad [1.1]$$

En [1.2]:

- El peso del flotador ($\gamma_f \nabla_f$) es igual al peso específico del flotador por el volumen total del mismo.
- El empuje del agua ($\gamma \nabla_s$) es igual al volumen de flotador sumergido por el peso específico del agua.
- El desequilibrio de presiones entre el interior y el exterior de la ventosa ($p_t A_0$) es igual a la presión en la entrada de la ventosa por la sección de salida de la ventosa.

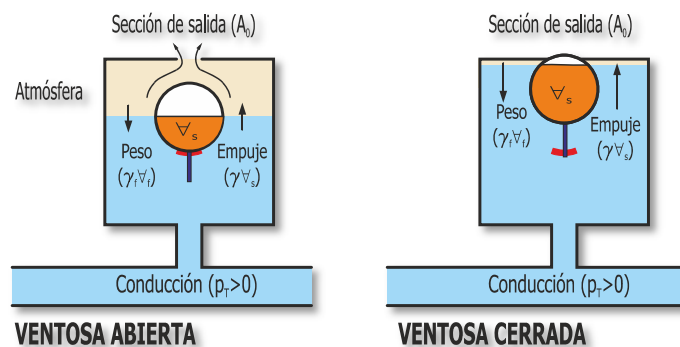


Figura 1.4.- Balance de fuerzas en el funcionamiento de una ventosa.

- Otros factores que se podrían sumar pero que son muy difícilmente cuantificables son la fuerza de sustentación que puede aparecer por como consecuencia del efecto dinámico de la corriente de aire durante la fase de expulsión de aire o la adherencia

creada en el flotador como consecuencia de largos periodos de tiempo con la ventosa cerrada.

Modificándose el balance cuando desaparece el empuje del agua ($\gamma_f \nabla_f > p_t A_0$) abriendo la ventosa.

1.3 Curva característica de las ventosas

Cuando se modelizan instalaciones de agua con aire atrapado, lo habitual es considerar el comportamiento de esas masas de aire como isoterma en el interior de las tuberías y al atravesar la ventosa, ese comportamiento se considerará adiabático. Es lo habitual en la modelización del comportamiento de las ventosas aplicar una analogía entre el flujo isoentrópico del tipo convergente-divergente en toberas con el del flujo de aire a través de las ventosas. Muestra de ello son los trabajos de Wylie y Streeter (1982), Chaudhry (1987), Dvir (1995), Fuertes (2001) e Iglesias et al.(2015).

Los gases reales no pueden llegar a la idealización de flujo adiabático sin fricción o isoentrópico, pero en ciertas situaciones el flujo se acerca a esos límites. En zonas en las que las distancias recorridas por ese flujo son cortas, como podrían ser transiciones, medidores Venturi o boquillas, no presenta efectos considerables de fricción y la transferencia de calor es mínima no llegando a generar gradientes de temperatura y velocidad importantes.

Aunque no es el objetivo del presente trabajo el estudio de la caracterización de ventosas ni una descripción exhaustiva de los diferentes modelos de cálculo aplicados en dicha caracterización. Es precisa una leve introducción en las diferencias entre el comportamiento del aire considerándolo compresible o incompresible y su analogía con el agua para comprender las limitaciones de los prototipos propuestos.

La caracterización de una ventosa (fig 1.5) es la relación existente entre la entrada o salida de aire y la diferencia de presiones entre la entrada y la salida de la ventosa, o lo que es lo mismo, el diferencial de presiones entre el exterior de la ventosa (la presión atmosférica) y la conexión de la ventosa con la instalación. La representación de dicha relación es lo que los fabricantes de ventosas representan gráficamente como curva característica de la ventosa.

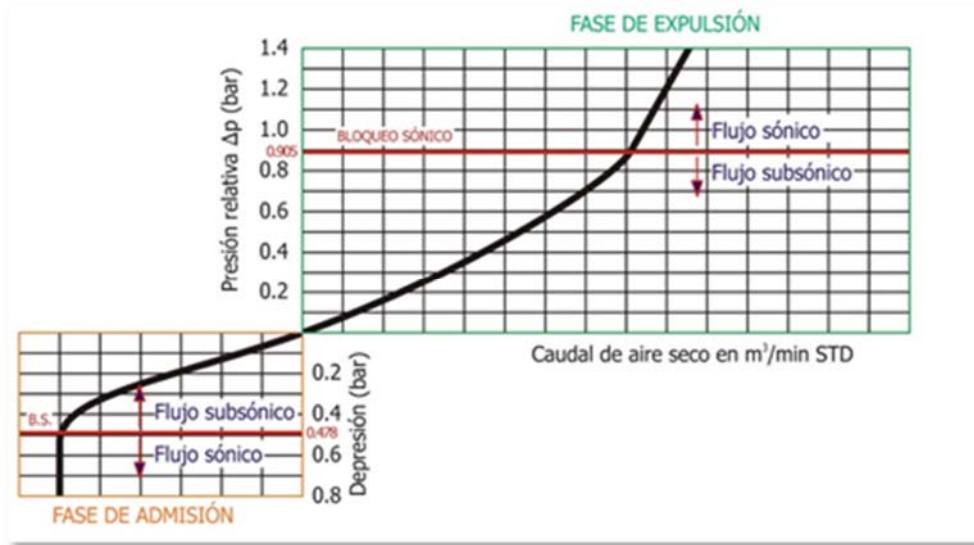


Figura 1.5.- Gráfico de la curva característica de una ventosa de gran orificio.

En la curva característica de una ventosa además de quedar reflejadas la relación de caudales también deberían visualizarse otros fenómenos como:

- **Bloqueo sónico de la ventosa.** Se produce cuando el aire que la ventosa está admitiendo o expulsando llega a velocidades cercanas a la del sonido y el flujo pasa de ser subsónico a sónico (tabla 1.2). Si la ventosa está trabajando en expulsión el caudal volumétrico de aire se mantendrá estable, aunque al aumentar la presión en el interior de la tubería, aumentará la densidad del aire y con ello el caudal másico de aire que expulsa la ventosa.

Tabla 1.2.- Características de los diferentes flujos.

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

Por el contrario, cuando la ventosa trabaja en admisión, como el aire del exterior se mantendrá en todo momento a presión atmosférica y no se comprime en ningún momento, una vez alcanzado el bloque sónico tanto el caudal volumétrico como el caudal másico se mantendrán constantes por mucho que disminuya la presión en el interior de la tubería. En la tabla 1.2 se presenta un esquema de las diferentes situaciones de funcionamiento de las ventosas.

- **Cierre dinámico.** Un fenómeno que la mayoría de los fabricantes de ventosas no suelen reflejar en las curvas características de sus ventosas es el cierre dinámico. La velocidad con la que circula el aire por el interior de la ventosa y alrededor del flotador crea un efecto sustentador sobre ese elemento que es proporcional a la velocidad al cuadrado. Esa velocidad de arrastre, dependiendo del diseño de la ventosa, puede llegar a vencer el peso del flotador y provocar el cierre indeseado de la ventosa. Ese cierre se produce además con una velocidad elevada del aire que está impulsando la ventosa con lo que se genera una bolsa de aire que se comprimirá y originará elevadas sobrepresiones en el interior de la tubería pudiendo provocar golpes de ariete más o menos intensos.

1.4 Verificación experimental de ventosas

La selección de ventosas para la protección de la instalación, muchas veces vienen asociadas a conceptos generalistas que no siempre son correctos. Como resultado de ello la información suministrada por los fabricantes de ventosas no siempre es la más correcta en incluso en algunos casos es falsa. Algunas de las prácticas más extendidas en cuanto a las ideas suministradas son:

- **Las curvas características de las ventosas.** Dada la dificultad para obtener las curvas características de las bombas, en muchas ocasiones los fabricantes representan curvas de muy dudoso origen, curvas que en ocasiones no son más que el desarrollo de las expresiones del flujo isentrópico teórico para el diámetro de la ventosa. Diámetro que en muchos casos ni siquiera coincide con la sección más estrecha que debe recorrer el aire a lo largo de la ventosa.
- **Considerar que la ventosa solo cierra cuando llega el agua.** Como se ha explicado anteriormente, las ventosas cierran en su mayoría por causa de la velocidad del aire

alrededor del flotador, arrastrándolo y provocando el cierre de la ventosa con aire en el interior de la conducción (figura 1.6). Es por ello que las ventosas deberán ser calculadas para unas velocidades de flujo de aire relativamente bajas.

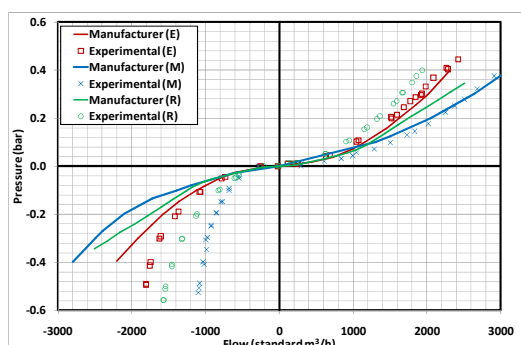


Figura 1.6.- Comparación entre un ensayo realizado y la información del fabricante.

- **Seleccionar las ventosas solo por el diámetro nominal.** No por ser un muy grave error no deja de ser muy habitual en los pliegos de condiciones de los proyectos hidráulicos seleccionar las ventosas por el diámetro nominal de su conexión (figura 1.8) en lugar de seleccionarlas por el caudal másico de aire que son capaces de evacuar con unas condiciones dadas.



Figura 1.7.- Ventosas con misma brida de conexión y diferente capacidad.

Es un ejemplo tan absurdo como si una bomba se seleccionara por su conexión a red en lugar de seleccionarla por su punto de funcionamiento. En el estudio realizado sobre un gran abanico de las ventosas existentes en el mercado (iglesias 2015) se pudo comprobar la diferencia de caudales obtenidos para un mismo diámetro nominal, así como la diferencia entre los datos declarados por los fabricantes y los obtenidos en los ensayos (figura 1.8).

Para poder ir mejorando la información que se dispone de las curvas características de las ventosas es necesario el exigir a los fabricantes una información completa y real. Para ello deberán ensayar sus ventosas y ofrecer datos objetivos de sus ventosas.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo era el diseño del equipamiento necesario para poder realizar ensayos con agua. Para desarrollar un buen equipo de ensayo hay que conocer es la normativa que hay que aplicar para realizar los ensayos. A continuación se va a enumerar la normativa existente actualmente en el ensayo de ventosas. Una descripción de los métodos actuales utilizados en el ensayo de ventosas así como la descripción de las bases teóricas de la semejanza hidrodinámica y los diferentes modelos aplicados en la misma.

2.1 Normativas aplicables en España hasta 2001

En España hasta 2001 no había ninguna normativa que fuera de aplicación en ventosas. Las únicas referencias que los fabricantes podían aplicar eran las dos normas americanas existentes que eran, dependiendo de lo que se fuese a especificar o referenciar:

- **AWWA M51.** Air reléase, air/vacuum, and combination valves. Es la norma referencia en Estados Unidos. Desarrollada por la American Water Works Association define los diferentes factores:
 - Tipos de ventosas existentes.
 - Las pautas que se deben seguir para la instalación de las ventosas a lo largo de las instalaciones.
 - Como se debe calcular el diámetro de paso de fluido de aire a evacuar por las ventosas.
 - Los efectos ocasionados por el golpe de ariete.
 - Todo lo referente al mantenimiento, operación y seguridad de las ventosas en las instalaciones.

- **ANSI/AWWA M51.** Esta norma trata de los requisitos que deben cumplir las ventosas:
 - Requisitos a cumplir en su fabricación
 - Ensayos que deben cumplir.

- Verificaciones a las que deben ser sometidas.
- Abarca a los diferentes tipos de ventosas (desde ½ a 20”) y purgadores (desde 13 a 150mm). La presión máxima de trabajo será de 2070kPa (20 bar) y el rango de temperaturas entre 0 y 150°F (52°C).

2.2 Normativa aplicable en España actualmente

Es en el año 2001 cuando se publicó la norma **UNE-EN 1074** (Válvulas para el suministro de agua. Requisitos de aptitud al uso y ensayos de verificación apropiados) a nivel europeo. Dicha norma es de aplicación para ventosas en su parte 1 (Requisitos generales) y en específicamente en su parte 4 (Purgadores y ventosas). Según dicha norma, algunos de los requisitos fundamentales que deben cumplir las ventosas y purgadores son:

- Deben cumplir las características de fabricación, estanqueidad y resistencia igual que cualquier otro tipo de válvulas a instalar en el suministro de agua. Se someterán a los mismos ensayos de resistencia mecánica, estanqueidad, resistencia a los productos desinfectantes y resistencia a la fatiga.
- La diferencia entre el caudal de aire para una determinada presión expuesto por el fabricante en sus documentaciones técnicas y las obtenidas en los ensayos de verificación no pueden tener una discrepancia mayor al 10%.
- Solo debe realizarse el ensayo de las características neumáticas con función de salida y de entrada de aire en dos puntos significativos del rango de utilización de la válvula y sin aislar las partes que aseguren sus diferentes funciones. Es recomendable que esos dos puntos fueran el punto diseño para el cual se desee que funciones la ventosa (aproximadamente 0,3 bar) y el punto en el que la válvula tiene su caudal máximo, o antes del cierre dinámico o antes del bloqueo sónico, lo que antes se produzca.
- Las características de expulsión de los purgadores se obtienen por medición de la sección del orificio del purgador y calculando el caudal capaz de expulsar en condiciones sónicas.
- Los ensayos no se exigirán a las ventosas de dimensiones superiores a DN100. Solo es preceptiva hasta DN100.

un mismo modelo de ventosa, se considera que los dos diámetros inmediatamente superiores e inferiores tienen las mismas características y por lo tanto no es necesario ensayarlas. En la práctica eso supone que con ensayar la ventosa de DN80 (3") se valida todo el catálogo.

- El ensayo debe realizarse en las condiciones que se suministra, montada verticalmente.
- En el punto de medición de caudal del aire, la temperatura debe estar en el rango de 5ª a 45ºC a lo largo de todo el ensayo y el valor de temperatura debe estar en ± 2 ºC durante el ensayo de cada punto. El valor de caudal debe estar en $\pm 4\%$ durante el ensayo de cada punto. El valor de presión debe estar en $\pm 5\%$ durante el ensayo de cada punto.

En los anexos A (Método de ensayo para las características neumáticas de las válvulas con función de salida de aire) y B (Método de ensayo para las características neumáticas de las válvulas con función de admisión de aire) de la norma UNE-EN 1074-4 se recogen los rangos de magnitudes nombradas anteriormente y el proceso a seguir en los ensayos. La instalación para el ensayo del anexo A (admisión) será el de la figura 2.1.

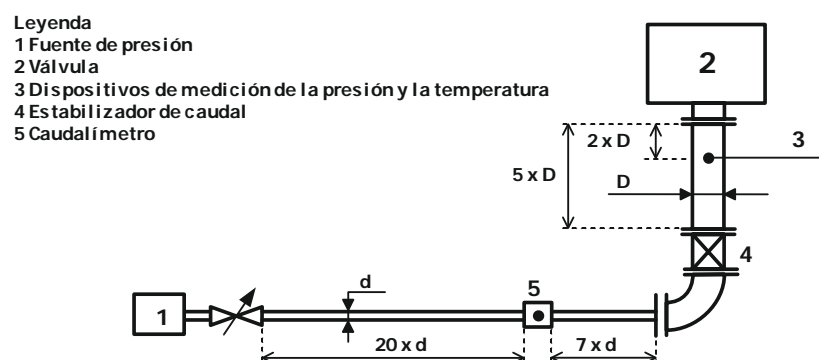


Figura 2.1.- Esquema de instalación de ensayo de expulsión de aire (UNE 1074-4:2000).

Los valores validos serán la media de los registrados en cada punto de medida, dentro de los requisitos marcados que marca la norma.

Aunque en la norma no se especifica, dada la complejidad técnica de generar el caudal necesario con presión negativa (generación de vacío) para poder ensayar las ventosas en

admisión, la normativa da dos alternativas en las que se ensayan con presiones positivas de aire (figura 2.2). Para ello se parte de la hipótesis de que la densidad del aire no varía significativamente a lo largo del ensayo, para lo cual debe considerarse el aire como fluido incompresible. Solo en el ejemplo C de la figura 2.2 podría considerarse el aire como fluido compresible y el flujo en la ventosa será el real durante su funcionamiento.

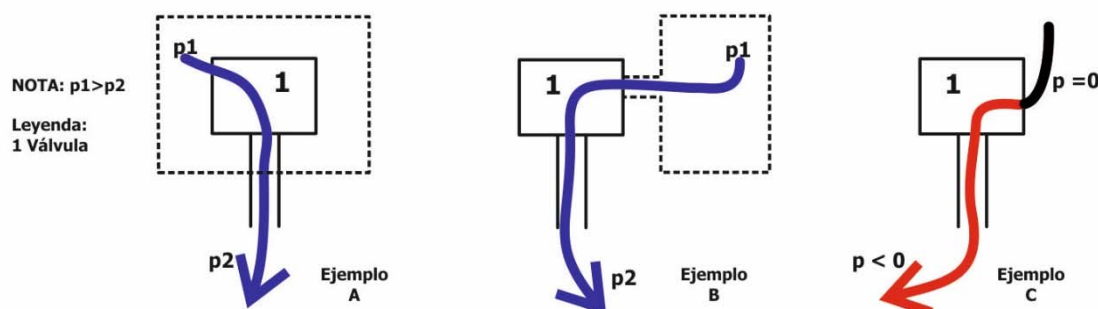


Figura 2.2.- Ejemplos de instalación de ensayo de admisión de aire (UNE 1074-4:2000).

2.3 Métodos de ensayo de ventosas con aire.

En la actualidad se han desarrollado dos alternativas para la realización de los ensayos de caracterización de ventosas siguiendo los criterios de la normativa (UNE 1074-4:2000):

- Alternativa A. Generar el volumen de aire necesario mediante potentes compresores neumáticos y acumular esas grandes cantidades de aire a alta presión (10 bar) en depósitos lo suficientemente grandes para, posteriormente, reduciendo la presión de ese aire mediante válvulas reductoras de presión a la presión de ensayo, poder realizar los ensayos.

En esta alternativa, podría aprovecharse el equipo necesario para la obtención del aire comprimido necesario en la instalación general de la industria. De esta forma los equipos se pueden utilizar para otras finalidades en la empresa. Es necesaria una perfecta parametrización de la cubicación del sistema para poder calcular el volumen de aire acumulado en cada momento. La medición del volumen de aire en cada momento estará en relación con la presión y la temperatura en el interior de los tanques y da un error bajo en las mediciones.

Su utilización en expulsión se realiza utilizando el esquema de la figura 2.1. aplicando la alternativa C de la figura 2.2.

Su utilización en admisión será utilizando los ejemplos a y b de la figura 2.2. Para su utilización en ambos ejemplos habrá que tener en cuenta la compresibilidad del aire y las diferencias de presiones a la entrada y a la salida de la ventosa.

- Alternativa B. Generar el volumen de aire necesario mediante la utilización de soplantes que generen de forma continua la suficiente cantidad de aire a la presión requerida para poder realizar los ensayos.

En esta alternativa la compra del equipamiento necesario para la realización del ensayo es mucho más específico. La calibración de los equipos de medida de caudal de aire no puede comprobarse in-situ, teniendo que ser calibrada en instalaciones adecuadas. Es necesario tener los equipos de medida adecuados al rango de caudales y presiones en los que se van a realizar las mediciones.

Los ensayos de ensayos de admisión de aire se realizan conectando la ventosa, siguiendo el esquema de la figura 2.1, a la admisión de la soplante, y por medio de la misma generar el vacío necesario para el ensayo de la ventosa.

Los ensayos de ensayos de expulsión de aire se realizan conectando la ventosa, siguiendo el esquema de la figura 2.1, a la salida de la soplante. El circuito deberá tener las bifurcaciones necesarias para poder modificarse y realizar todas las alternativas .

2.4 Nuevas metodologías. Ensayos con agua

La propuesta que apoya el presente Proyecto Fin de Grado es la realización de la caracterización de ventosas, utilizando como fluido el agua y aplicando la semejanza hidrodinámica para la conversión de los datos a aire.

Partimos de los modelos matemáticos en los que se han demostrado la validación de la hipótesis de incomprensibilidad del aire para los rangos de funcionamiento de las ventosas. La gran ventaja del ensayo con agua es que simplifica el ensayo con respecto a tener que realizar los ensayos con aire. Tanto es así que cualquier fabricante e incluso cualquier gestor de redes hidráulicas podría realizar estos ensayos en sus instalaciones.

2.4.1 Semejanza hidrodinámica en el ensayo de ventosas

A continuación va a realizarse una ligera introducción a la semejanza hidrodinámica. Los modelos aplicados en los apartados siguientes de este trabajo no se pueden exponer por estar pendientes de publicar en revistas especializadas.

Para justificar la semejanza hidrodinámica se debe partir de la hipótesis de incompatibilidad del fluido. Con ella la diferencia de presiones que se produce en la ventosa se expresa con la ecuación

$$h_m = k \frac{v^2}{2g} \quad [2.1]$$

En la que h_m es la diferencia de presiones en la ventosa, k es el coeficiente adimensional de pérdidas de la ventosa y v la velocidad en la ventosa. La velocidad que se obtiene generalmente para el DN de la ventosa con la expresión siguiente

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad [2.2]$$

Agrupando las expresiones anteriores se obtiene la expresión RQ^2

$$h_m = \frac{8k}{\pi^2 D^4 g} Q^2 = RQ^2 \quad [2.3]$$

En la que R será la resistencia de la ventosa que se obtiene directamente de la medición del caudal Q y la diferencia de presiones entre la entrada y la salida del fluido en la ventosa h_m .

Entonces, la resistencia R de la ventosa viene dada por:

$$R = \frac{8k}{\pi^2 D^4 g} \quad [2.4]$$

Estableciendo como diámetro para las velocidades el DN de la ventosa hallamos el coeficiente adimensional de pérdidas característico de la ventosa

$$k_{agua} = \frac{\pi^2 D_{ventosa}^4 g}{8} R \quad [2.5]$$

Para poder aplicar la semejanza hidrodinámica debemos considerar que el coeficiente de pérdidas adimensionales es el mismo para aire y para agua. $k = k_{agua} = k_{aire} = k_0$

La pérdida la expresaremos como diferencia de presiones en lugar de diferencia de alturas de presión.

$$h_m = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad [2.6]$$

En la expresión anterior ρ se obtiene a partir de una presión de referencia P^* considerando el aire como un gas ideal y aplicando por ello la ecuación característica de los gases perfectos.

$$P^* = \rho R_g T \rightarrow \rho = \frac{P^*}{R_g T} \quad [2.7]$$

En [2.7] R_g es la constante característica del aire y T la temperatura del mismo.

Otro factor a tomar en cuenta es que se considera el caudal másico del aire en lugar del caudal volumétrico. Para lo cual hay que aplicar la relación existente entre los dos mediante la ecuación

$$Q = \frac{G}{\rho} \rightarrow G = \rho \cdot Q \quad [2.8]$$

Aplicando en la ecuación 2.1 todos los cambios propuestos en las ecuaciones 2.2 a 2.8 da como resultado la ecuación siguiente.

$$G = \sqrt{\frac{\pi^2 D_{ventosa}^4 g}{8k_0 R_g T}} \cdot \sqrt{P^*} \cdot \sqrt{\Delta P} \quad [3.9]$$

Esta ecuación es la obtenida para una ventosa donde D será el diámetro nominal de la ventosa, k_0 será el parámetro obtenido mediante su ensayo con agua, P^* será la presión de referencia considerando que la densidad del aire será constante a una determinada presión. Dicha presión será la presión aguas arriba de la ventosa durante el ensayo. En el caso del ensayo de admisión esta presión será la atmosférica. En el caso de expulsión es la de la entrada de la ventosa.

2.4.2 Verificación experimental de la semejanza hidrodinámica

Una vez planteada la semejanza hidrodinámica teóricamente hace falta la verificación experimental de tal técnica. Para ello es necesario realizar los ensayos con agua y compararlos con los ensayos realizados con aire y obtener la equivalencia entre ambos resultados. Una vez

obtenida la equivalencia se puede extrapolar los sucesivos ensayos obtenidos con agua en su equivalencia en aire.

Aunque el desarrollo de esta técnica y de los diferentes prototipos no está reflejada en la norma, es propósito del presente trabajo el demostrar su viabilidad y la fiabilidad de sus resultados.

3. Materiales y métodos

En este apartado se van a describir los tres prototipos que se han diseñado y fabricado para el ensayo de ventosas con agua. Los dos primeros fueron diseñados con una cámara de ensayo presurizada en la cual la ventosa estaba sometida a presión externa. La ventosa no tiene salida directa a la atmósfera y el diferencial de presiones se calcula como diferencia entre la presión en la tubería de entrada a la ventosa y la presión existente en la cámara de ensayo. En el tercer prototipo la ventosa vierte el agua a la atmósfera, la cámara de ensayo no está inundada, y el agua expulsada por la ventosa a la cámara es vertida a la canaleta del laboratorio por medio de los desagües instalados. La salida de la ventosa está a presión atmosférica, por lo que el diferencial de presiones es entre la tubería de entrada a la ventosa y la presión atmosférica.

En la segunda parte se ha definido, redactado, y mejorado el protocolo a seguir para la realización de los ensayos de ventosas con agua para la aplicación de la semejanza hidrodinámica.

3.1 Diseño del equipo de ensayo de ventosas con agua

Partiendo de la idea inicial de adaptación a los diferentes esquemas de la norma, se diseñó el primer prototipo. Dados los buenos resultados del primer prototipo se propuso el segundo. Este segundo fue una evolución del primero, adaptándose al tamaño óptimo para la aplicación de la norma. El tercer prototipo supuso un cambio de filosofía y diseño, así como de las características físicas del mismo.

3.1.1 Primer prototipo.

Como primera prueba se realizó un pequeño prototipo para poder ensayar ventosas de hasta 2". Dado su reducido tamaño se pudo instalar sobre el Banco de Ensayo de Elementos Hidráulicos existente en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la ETSII (figura 3.1). Se hizo un diseño adaptándose a los materiales existentes en los catálogos comerciales de materiales hidráulicos con el fin de simplificar la construcción del mismo al máximo. La idea era diseñar una cámara de ensayo con unas medidas suficientes para que la salida de la

ventosa estuviese lo suficientemente alejada de la pared de la cámara la suficiente altura para que el agua pudiera pasar entre la ventosa y la cámara sin dificultades. La descripción del equipo, de los materiales que se utilizaron y dimensiones del mismo es la siguiente:

- La cámara de ensayo se realizó con materiales plásticos, relativamente ligeros, fáciles de trabajar y fácilmente desmontables:
 - Bridas normalizadas de PVC para tubo de diámetro 250mm para el cierre
 - Tubo de metacrilato en diámetro 250/240mm y una longitud de 350mm para el cuerpo de la cámara de ensayo. El ser de metacrilato facilitaba la observación de la ventosa en el desarrollo del ensayo.
- El cierre se realizó mediante 4 varillas roscadas din975 M14 en acero cincado con cierre con doble tuerca y junta de silicona normalizada sobre las bridas plásticas.
- Tanto la entrada como la salida del prototipo se realizó en tuberías de PVC DN50 PN10 con la longitud necesaria en aplicación de la norma UNE-EN 1074-4.
- La regulación de caudal se realiza mediante una combinación entre:
 - El sistema de bombeo de dos bombas controlado por un variador de frecuencia que regula una bomba y un arrancador progresivo que arranca la otra bomba.
 - Una válvula DN100 y otra de DN50, ambas de globo, reguladoras del banco de ensayo situadas aguas abajo de la cámara de ensayo.
- Para la obtención de los puntos de medida era necesario registrar las mediciones de presión y caudal. Para el registro de caudal se utilizó la parrilla de caudalímetros electromagnéticos del banco de ensayo en DN3, DN10, DN25, DN40 y DN80.
- Para la medición de presión se utilizaron dos transductores de presión de resolución 0,1% y rango de medida -1 a 1,5 bar, calculando la diferencia entre ambos.

En esta primera fase se comprobó la efectividad del sistema. Los resultados obtenidos fueron muy aproximados a los obtenidos en los ensayos realizados con aire a esa misma ventosa.

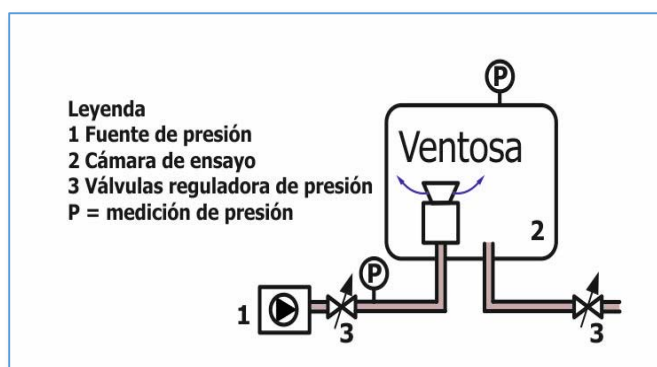


Figura 3.1.- Imagen y descripción del prototipo 1.

3.1.2 Segundo prototipo.

Utilizando como base el diseño del primer prototipo y dados los buenos resultados se creó el prototipo dos (figura 3.2). Se aumentó el tamaño de la cámara de ensayo para poder ensayar ventosas de hasta 3". Con el ensayo de este tamaño de ventosas se cubre el rango de ventosas a ensayar según la norma. También se aumentó el espacio libre disponible alrededor de la ventosa para tener más sección de paso dentro de la cámara y disminuir la velocidad del agua en su interior. Todo ello con las siguientes características:

- Para la cámara de ensayo se optó por su construcción en acero con el tamaño estándar de un tubo normalizado con bridas de 20 orificios M20. con diámetro interior de 600mm y altura de 1000mm y 8mm de espesor. Se reforzó longitudinalmente con 3 pletinas de 10 x 20mm por el riesgo de posibles sobrepresiones por errores durante os ensayos.
- Tapas superior e inferior en acero. Tamaño normalizado de brida de acero para tubo de 600mm. Con adaptación de doble manguito de 3" interior y exterior para fijación tanto de la ventosa como de la conexión de las tuberías de entrada y salida. Las tapas disponen de 3 tomas mecanizadas de ½" cada una para la conexión de cualquier instrumentación necesaria.
- La toma de presión se realizó en anillo para equilibrar la presión a registrar y que fuese la presión media en la sección de medida.

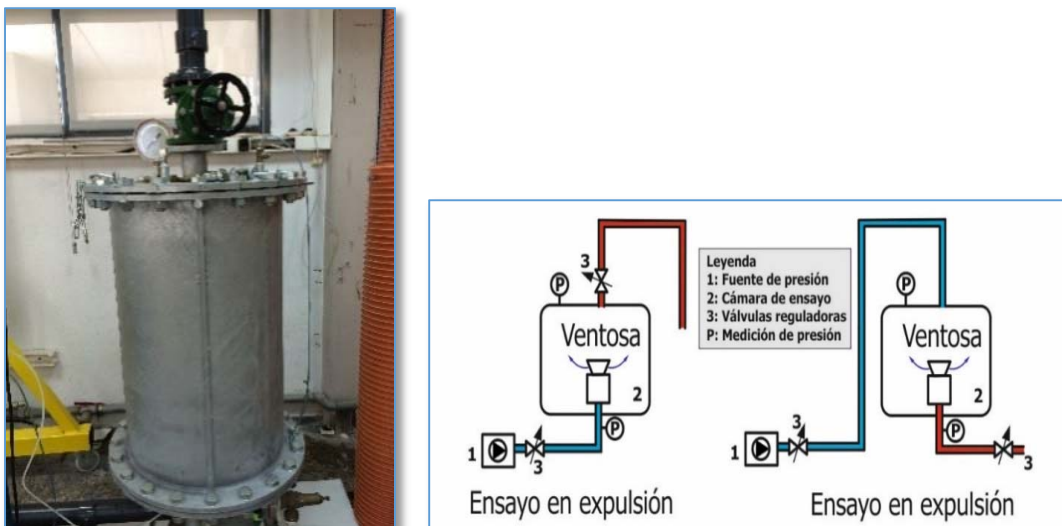


Figura 3.2.- Imagen y descripción del prototipo 2.

3.1.3 Tercer prototipo.

Tras comprobar lo complicado que resultaba el ensayo en el segundo prototipo se decidió dar un cambio en el diseño del prototipo con el fin de agilizar el desarrollo de los ensayos hacia una cámara de ensayo a presión atmosférica y con la posibilidad de visionar el fluido en su expulsión al aire (figura 3.3). Las características fueron las siguientes:

- El diseño de la cámara de ensayo se simplificó, utilizando para su fabricación un contenedor Big-box de medidas 1200 x 1000 x 800 milímetros.
- Por su ligereza hubo que conseguir que durante el ensayo el contenedor permaneciera parcial inundado. Para ello se realizaron una serie de orificios a lo largo de la base del contenedor. La regulación de la inundación se consigue mediante dos planchas de plexiglás que se desplazan cerrando más o menos orificios dependiendo del caudal calculado del ensayo. En ningún caso el agua debe llegar a la ventosa para no interferir en los resultados del ensayo.
- La tubería de conexión de la tubería atraviesa la base a través de un orificio central en el suelo del contenedor suficientemente amplio para su paso.
- La tapa de cierre de la cámara consiste en una lámina de Plexiglás con medidas de 1150 x 950 mm y con espesor de 5 mm, el necesario para evitar el pandeo sin aumentar el peso. Para mejorar la estanqueidad de la tapa se ha instalado una

lámina absorbente de 5cm de ancho por 5mm de espesor por todo perímetro de la tapa.



• **Figura 3.3.- Imagen y descripción del prototipo 3.**

- En este prototipo la tubería de entrada no va fijada con brida a la cámara de ensayo, sino que es pasante a través de la misma. Ello implicaba que la tubería y la ventosa quedaban sueltas en su interior y con el empuje del flujo vibraba e incluso desplazaba la ventosa en sentido contrario al chorro de salida. La fijación de la ventosa a la cámara se ha tenido que realizar por medio de cuatro cadenas con tirantes tensores. Estas cadenas están fijadas por un extremo a la brida de conexión de la ventosa y por el otro extremo al cuerpo del contenedor, dándole estabilidad y rigidez a la ventosa durante el ensayo, incluso a altos caudales.

3.1.4 Adaptación del equipamiento del laboratorio a los ensayos.

Para la realización de los ensayos se utilizó el Banco de Ensayo de Elementos Hidráulicos existente en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la ETSII, el cual hubo que parametrizar para el desarrollo de los ensayos y durante el transcurso de los mismos ir incluyéndole mejoras. Los elementos principales son:

- Estación de Bombeo. Dos bombas con un caudal máximo 15 litros/segundo cada una. Una gestionada con arrancador estático y la otra con variador de frecuencia y posibilidad de regular la velocidad mediante la modificación de la frecuencia de hercio en hercio siendo el rango útil el existente entre los 17 y los 50Hz. Se ensayó el sistema de bombeo para averiguar con el sistema resistente instalado, el caudal que generaba el sistema de bombeo para cada combinación de frecuencia. Se

seleccionaron los puntos de caudal más adecuados para la rampa de caudales deseados.

- Las medidas de presión se realizaron en cada caso con la instrumentación más adecuada, dependiendo del prototipo a utilizar:
 - En el prototipo 1 se utilizaron dos transductores de presión relativa de rango desde -1 hasta +1,5 bar. El diferencial de presión se obtenía restando la medida del transductor instalado en la entrada a la medida del transductor instalado en la cámara. Ambos transductores se sitúan a la misma altura piezométrica para realizar los ensayos.
 - En el prototipo 2 se utilizó un transductor diferencial de rango 0-1865 mbar. Automáticamente mide la diferencia de presiones.
 - En el prototipo 3 se utilizó un solo transductor de presión relativa de -1 a -1,5 bar instalado en la tubería de entrada a la ventosa. Se instalaba a la misma altura piezométrica de la salida de la ventosa consiguiendo con ello la medida de la presión diferencial.
- Las tomas de presión se han realizado mediante un anillo de compensación (figura 3.4). Consiste en realizar 4 tomas a la misma distancia de la ventosa, pero equidistantes entre ellas, tomas que luego son conectadas en forma de anillo y del anillo sale una conexión al transductor de presión.

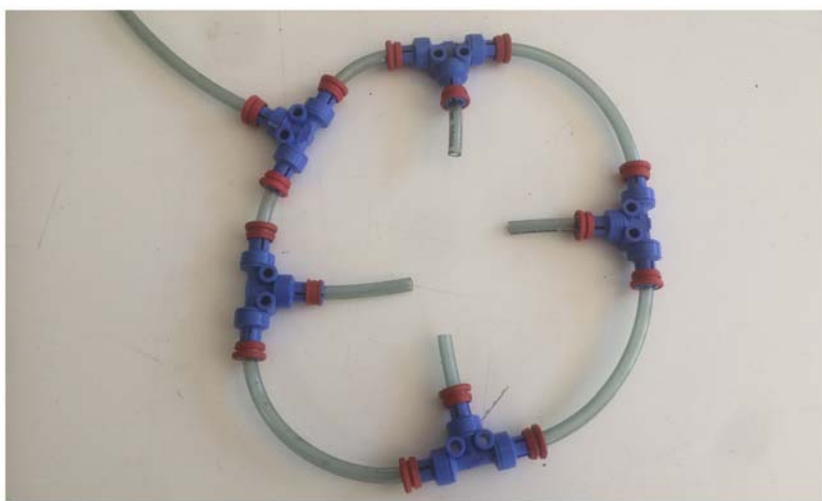


Figura 3.4.- Anillo de compensación de presiones.

- La velocidad con la que circula el agua en el interior de la ventosa hace que el flujo presente un perfil muy turbulento, generando grandes oscilaciones en la medida de presión. Para conseguir unas medidas más estables se probaron varias opciones de amortiguación de la señal. Después de varias pruebas con diferentes sistemas se comprobó que la mejor forma de amortiguar la señal era colocando un calderín de 5 litros (figura 3.5) entre las tomas y el transductor de presión.



Figura 3.5.- Sistema de amortiguación de la señal de presión mediante calderín.

En la figura 3.6 se representa la respuesta del transductor con las diferentes alternativas. Como se puede comprobar la señal con conexión directa es más instantánea. Sin embargo, colocando el calderín (figura 3.5) se consigue amortiguar por completo las oscilaciones en la medida, aunque la respuesta es más lenta. Con todo ello se alarga la duración de cada ensayo, pero las mediciones son más exactas y fiables.

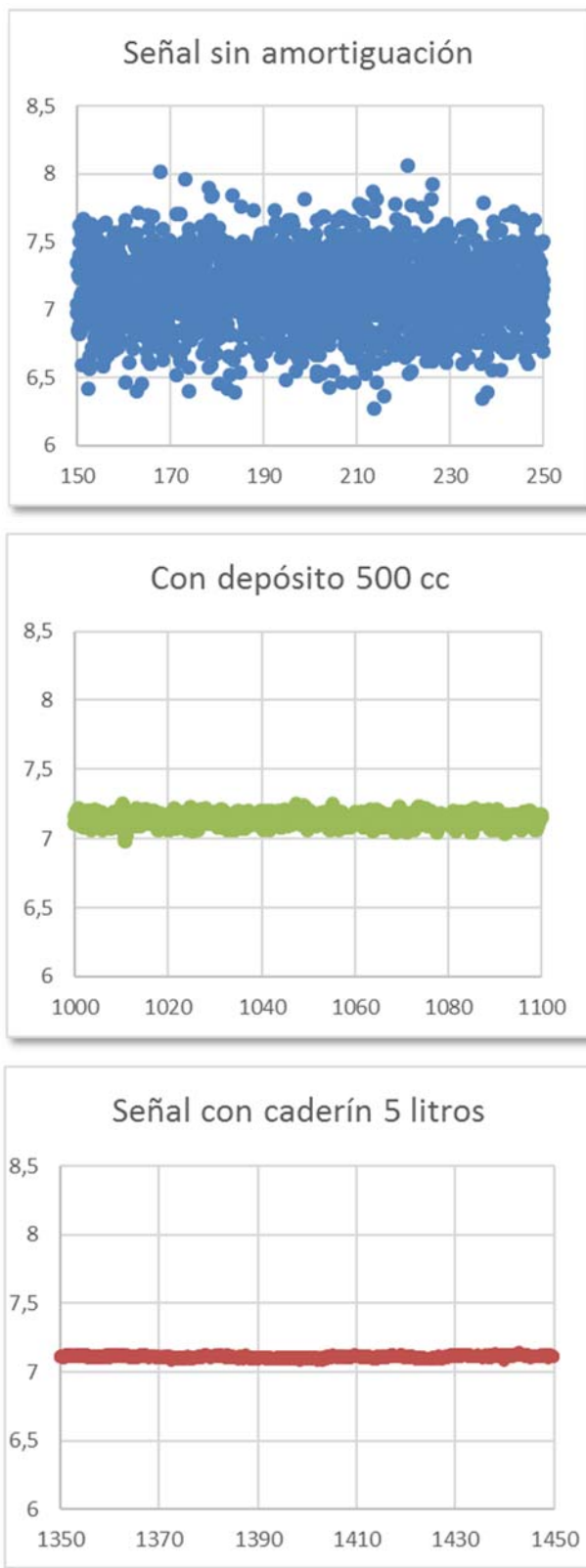


Figura 3.6.- Comparación de señal de presión registrada.

- El registro de las señales de medidas de caudal y presión se realizó mediante una tarjeta de adquisición de datos National Instruments modelo NI USB-6009 de 8 entradas analógicas (figura 3.6). La tarjeta estaba conectada a un ordenador portátil mediante un puerto USB. Una vez en el ordenador la señal era procesada mediante un ejecutable o proyecto del programa SignalExpress 2015 de la compañía National Instruments (figura 3.6). En el programa se identifican las entradas utilizadas, la frecuencia de muestreo y la frecuencia de registro. Los resultados de los ensayos se registraban en ficheros independientes identificados individualmente. Posteriormente los ficheros son exportados a Excel para su tratamiento.
- El equipo de medición de caudal utilizado es el de la estación de bombeo. Está dotada de una parrilla de caudalímetros electromagnéticos para todo el rango de caudales. En este trabajo se utilizó el caudalímetro Siemens MAG3100 DN80 con un rango óptimo de medición ente 5 y 50 l/s.

3.2 Protocolo de ensayo de ventosas con agua

Una vez diseñados, contruidos y comprobados los diferentes prototipos, llega el momento de ensayar las diferentes ventosas. Para ello se deben definir los pasos a seguir en el ensayo de las ventosas. La secuencia de preparación y ensayo cada ventosa. Se definen tres fases bien diferenciadas.

3.2.1 Fase 1. Preparación del equipo y elementos a ensayar

Es la fase previa al ensayo propiamente dicho. En esa fase debe realizarse toda la preparación del ensayo consta de los siguientes pasos:

- Calibración de los equipos de medida. La calibración de los equipos incluye la comprobación de los aparatos que van a intervenir en el ensayo:
 - La calibración del caudalímetro que interviene en los ensayos (siemens electromagnético DN80) se realiza mediante pesada en báscula de precisión de rango 1.800 Kg y graduación en múltiplos de 100 gramos.

- La calibración del transductor de presión (Desin TPR18, rango $-1+1,5$ bar y precisión 0,1% fondo escala) se realiza mediante balanza manométrica de pesos puertos Marca Budenberg, Modelo 480HX.
- La calibración del transductor de presión diferencial (Kubold PAD SERIES, rango 0-1865 mbar y precisión 0,025% fondo de escala) se realiza para los rangos bajos (0-200mbar) mediante una columna de agua calibrada en milímetros y con la balanza de pesos muertos para los rangos altos (1-1,5 bar).
- Inmovilización del flotador de la ventosa en su posición completamente abierta, para obtener en el ensayo la curva de pérdidas a ventosa completamente abierta. Esta fijación debe ser lo más sencilla y estable posible a la vez no restringir el paso del fluido para no influir en las características de la ventosa. En todas las ventosas ensayadas a lo largo de este trabajo ha sido posible la inmovilización del flotador por medio de una varilla roscada M5 fijada a la tapa de ventosa que bloquea el flotador contra en el apoyo del mismo en el cuerpo de la ventosa manteniendo la ventosa completamente abierta.



Figura 3.7.- Detalle Inmovilización del flotador por varilla roscada.

- Realización de pruebas en el banco de ensayo para obtener los puntos adecuados de caudal a ensayar. En este trabajo se calibró el equipo para obtener los puntos a

caudales de ensayo a 5, 10, 15, 20, 25 y 30 litros/segundo con la suma de frecuencias de variador 0+19, 0+31, 50+0, 50+24, 50+34 y 50+50

- Instalación y montaje del medidor de presión y la ventosa en el prototipo a utilizar.
- Llenado a baja velocidad de la instalación con agua y purgado del aire que se encuentre en toda la instalación, especialmente en las conexiones de los transductores de presión. Llenado de agua de la ventosa y/o la cámara de ensayo y comprobación de la inexistencia de fugas de agua. En los prototipos 1 y 2 comprobación de la estanqueidad del cierre de la cámara a 1,5 bar de presión.

3.2.2 Fase 2. Realización de los ensayos

Es la fase 2 se realizan los ensayos propiamente dicho. Para cada ventosa se realizaron 6 ensayos independientes con la siguiente secuencia:

- Se comprueba que está toda la instrumentación conectada.
- Se activa el registro de datos del ensayo identificando el fichero de registro adecuadamente. Dicha identificación deberá indicar la ventosa, número de ensayo, fecha y hora y se comienza a registrar con la siguiente secuencia de ensayo:
 - Registrar un minuto con la estación de bombeo parada. En caso de utilizar un solo transductor, este se encontrará a una altura inferior a la salida de la ventosa. Eso implica que el traductor tendrá presión positiva incluso con la estación de bombeo parada. Por ello hay que registrar esa presión para calibrarla como punto de presión 0.
 - Marcado de la frecuencia necesaria en la estación de bombeo para alcanzar el caudal requerido en el primer punto de ensayo.
 - Observar en el gráfico que se estabiliza la presión en ese punto de ensayo. Se mantiene durante un mínimo de 2 minutos en el primer caudal de ensayo. Con una frecuencia de 10 puntos/segundo quedarán un mínimo de 120 medidas en cada punto de ensayo.

- Se sigue el escalonado por los diferentes caudales seleccionados para realizar el ensayo hasta llegar al máximo que da la estación de bombeo, que en este caso es de 30 litros por segundo. Cada escalón se mantiene durante dos minutos con la presión estabilizada.
- Para finalizar se para la estación de bombeo y se registra un mínimo de tres minutos de la instalación en reposo. En ese tiempo da tiempo a que el transductor se estabilice a la presión en la que el caudal es cero.
- Se cierra el registro del ensayo y se exporta a Excel para la conversión a caudales de aire.

3.2.3 Fase 3. Cierre del ensayo.

Es esta fase se engloban todos los trabajos que hay que realizar para terminar el ensayo propiamente dicho:

- Una vez finalizada la tanda de ensayos, en la que se ensayarán todas aquellas ventosas que correspondan a esa tanda, se volverá a calibrar los equipos de medida para comprobar que no se han modificado los valores de calibración. Se realizarán con los mismos equipos y los mismos métodos que en la fase 1.
- En Excel se realizará el tratamiento de los datos.
 - Se usarán los factores de calibración de los equipos para obtener los resultados reales de las mediciones.
 - Se aplica la semejanza hidrodinámica para obtener los datos equivalentes en caudales de aire y obtener la curva característica de la ventosa.

4. Resultados y discusión de los resultados

4.1 Resultados obtenidos en el ensayo físico

Se ha comprobado la fiabilidad de los diferentes prototipos y la validación de los mismos para su utilización como equipos de ensayo en aplicación la semejanza hidrodinámica se han realizado ensayos con los diferentes prototipos a varias ventosas. No es objetivo de este trabajo identificar los resultados obtenidos de cada modelo de ventosa en particular sino el de poder comprobar que dichos datos son tan válidos y fiables como los obtenidos en ensayos con aire en otras instalaciones. Por ello no se va a identificar en los gráficos expuestos ni marca ni modelo de las ventosas ensayadas. Se compararán los datos obtenidos en los ensayos realizados a cada modelo con los datos de ese mismo modelo de ventosa en los laboratorios del departamento de Termodinámica de la UPV durante 2007, las instalaciones de la empresa Bermad en Israel durante el año 2015 o en las realizadas en la empresa Irua Tech Industries en Galdakao durante el año 2016.

4.2 Resultados de los ensayos realizado en el primer prototipo.

En el primer prototipo se realizó el ensayo a una ventosa de 2" (máximo admisible en dicho prototipo). Se ensayó la ventosa en expulsión y posteriormente, tras el cambio de de entrada y salida de la cámara, se le aplicó flujo inverso y la ventosa fue ensayada a admisión. Como se puede comprobar en la gráfica 4.1, los resultados obtenidos en los ensayos con agua y transformados por semejanza hidrodinámica a resultados con aire (considerando el aire como incompresible) son muy similares a los obtenidos por Fuertes 2001 en los ensayos que realizo con soplante a ese mismo modelo de ventosa en las instalaciones de la UPV. En concreto las curvas obtenidas son muy aproximadas en los rangos de funcionamiento de las ventosas (entre 0 y 0,3 bar), con un error en el volumen de aire expulsado que para 0,3 bar es de solo un -1,8%. Es a partir de 0.4 bar cuando la diferencia se va incrementando, en gran medida debido a la mayor compresibilidad del aire con respecto a la del agua.

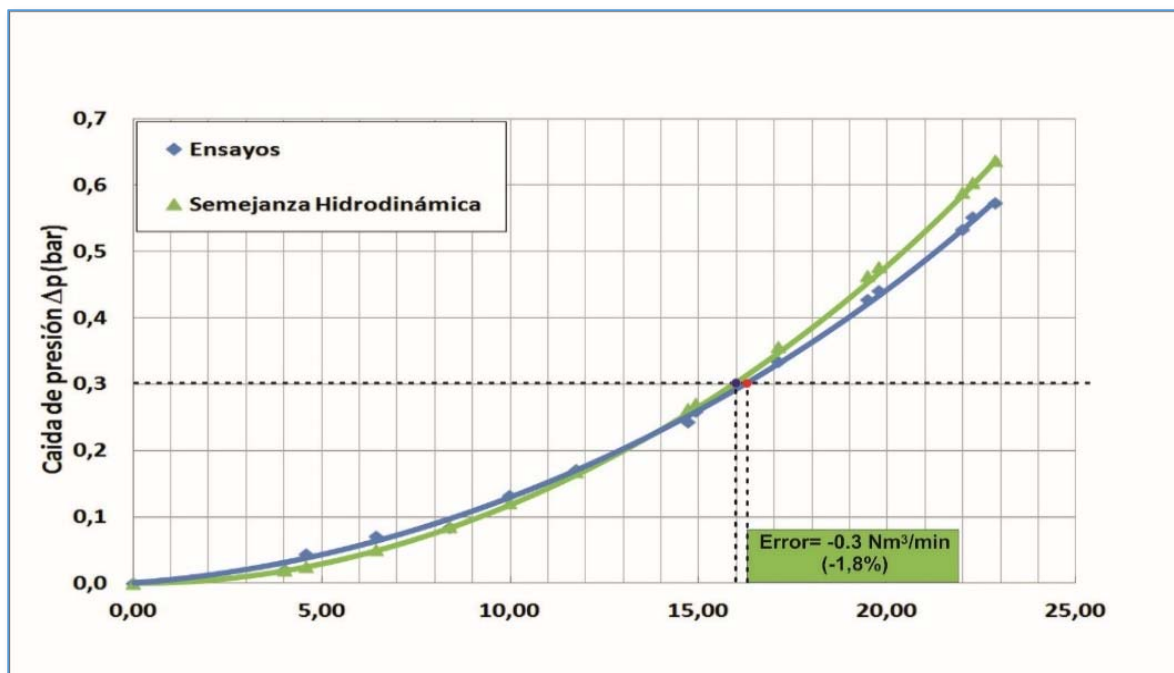


Figura 4.1. Comparativa semejanza hidrodinámica - ensayo físico en ventosa 2".

En ese primer prototipo solo fue probada esa ventosa y solo con una salida de fluido en forma de seta lo que implica que el fluido es direccionado hacia abajo, sin colisionar con las paredes de la cámara y distribuyéndose proporcionalmente por todo el perímetro de la cámara. Como más adelante se comprobará, eso influye en los datos positivos del ensayo.

4.3 Ensayo realizado en el segundo prototipo.

En el segundo prototipo se realizaron ensayos a dos ventosas de 3" (tamaño de diseño del prototipo) de diferentes fabricantes y diferentes dimensiones. Ambas ventosas se ensayaron solo en expulsión comprobando la dificultad que suponía en este prototipo ensayarlas en admisión. En la ventosa del segundo fabricante se disponía de hasta tres alternativas diferentes de salida, ensayándose las tres opciones. Al estudiar los resultados equivalentes obtenidos en los ensayos en agua (como se puede comprobar en la gráfica 4.2), se observa que difieren de los obtenidos en los ensayos que realizó con soplante a ese mismo modelo de ventosa en las Instalaciones que posee la empresa Bermad en Israel (Iglesias et al., 2016).

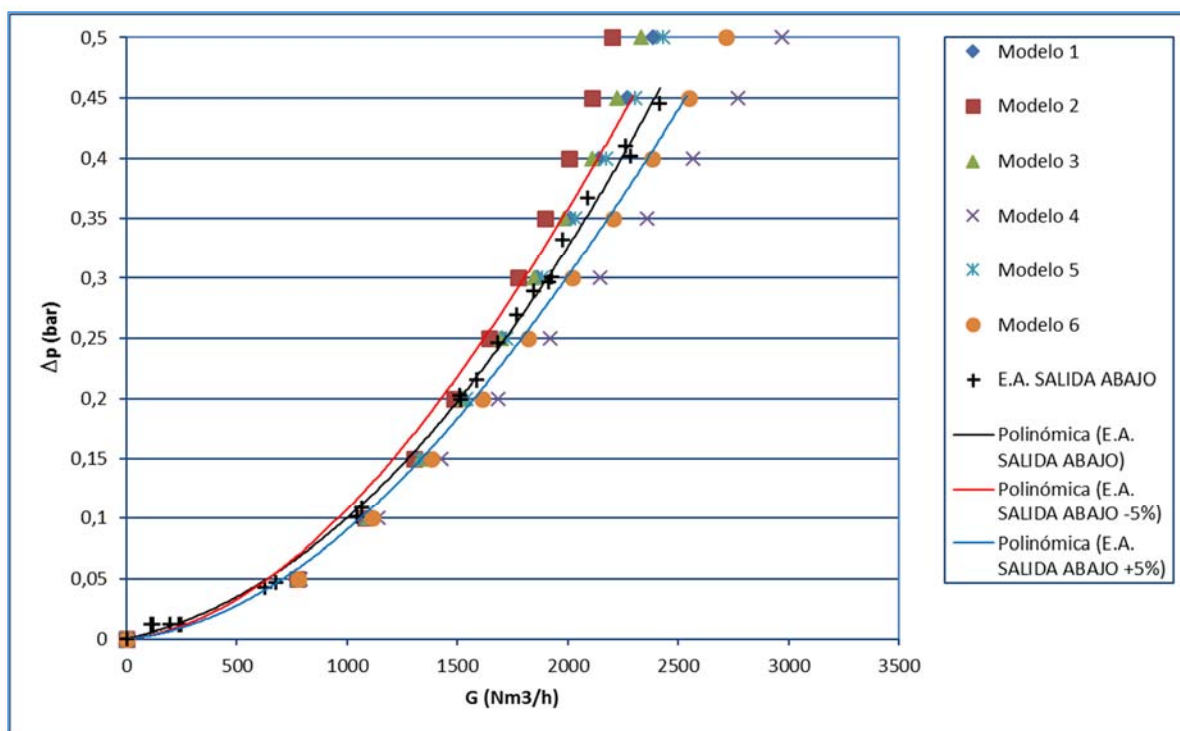


Figura 4.2. Comparativo prototipo 2 - ensayo aire en ventosas 3'' con salida hacia abajo.

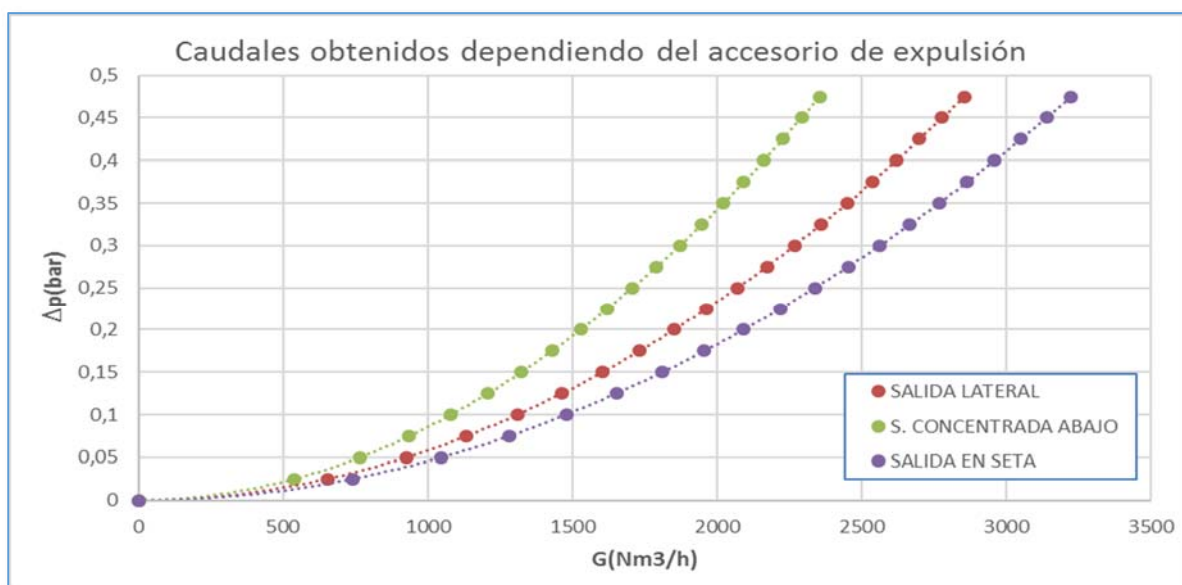
4.4 Ensayo realizado en el tercer prototipo.

En el tercer prototipo se repitieron los ensayos realizados en el prototipo dos. Se ensayaron las dos ventosas de 3'' (tamaño de diseño del prototipo). Con este prototipo solo se pueden realizar ensayos de las ventosas en expulsión.

Igual que en el prototipo dos, en la ventosa del segundo modelo se realizaron ensayos con las diferentes alternativas de expulsión del fluido (sombrosos de salida). Como se puede comprobar en la gráfica 4.3, dependiendo del accesorio de salida utilizado, la característica de funcionamiento de la ventosa es muy diferente. Los resultados reflejados en la gráfica son los obtenidos en los ensayos con agua y transformados por semejanza hidrodinámica, detallando el caudal equivalente de aire en esos ensayos. Al ser un caudal equivalente no se puede obtener el cierre dinámico para cada tipo de alternativa de expulsión. Lo que sí se puede observar es que para un mismo Δp , o lo que es lo mismo, para una misma presión en el interior de la instalación, la misma ventosa tiene un comportamiento muy diferente dependiendo de los accesorios que se le coloquen a la salida (tabla 4.1).

Tabla 4.1. Ejemplos de caudal según accesorio de expulsión utilizado en ventosa 3".

Δp (bar)	SALIDA ABAJO (Nm ³ /h)	SALIDA LATERAL (Nm ³ /h)	SALIDA SETA (Nm ³ /h)
0,1	1.080,5	1.309,7	1.479,3
0,3	1.871,5	2.268,5	2.562,2

**Figura 4.3. Comparativo caudal para tipos de accesorio de expulsión en ventosa 3".**

En la gráfica 4.4 se comparan los resultados con agua y transformados por semejanza a aire (considerando el aire como incompresible) con los obtenidos en los ensayos que se realizaron a ese mismo modelo de ventosa en las Instalaciones que posee la empresa Irua Tech Industries en Galdakao. Dichos ensayos fueron realizados con la acumulación de aire a alta presión en tanques presurizados y la posterior utilización de dicho aire por medio válvula reductora de presión del aire a la presión de ensayo.

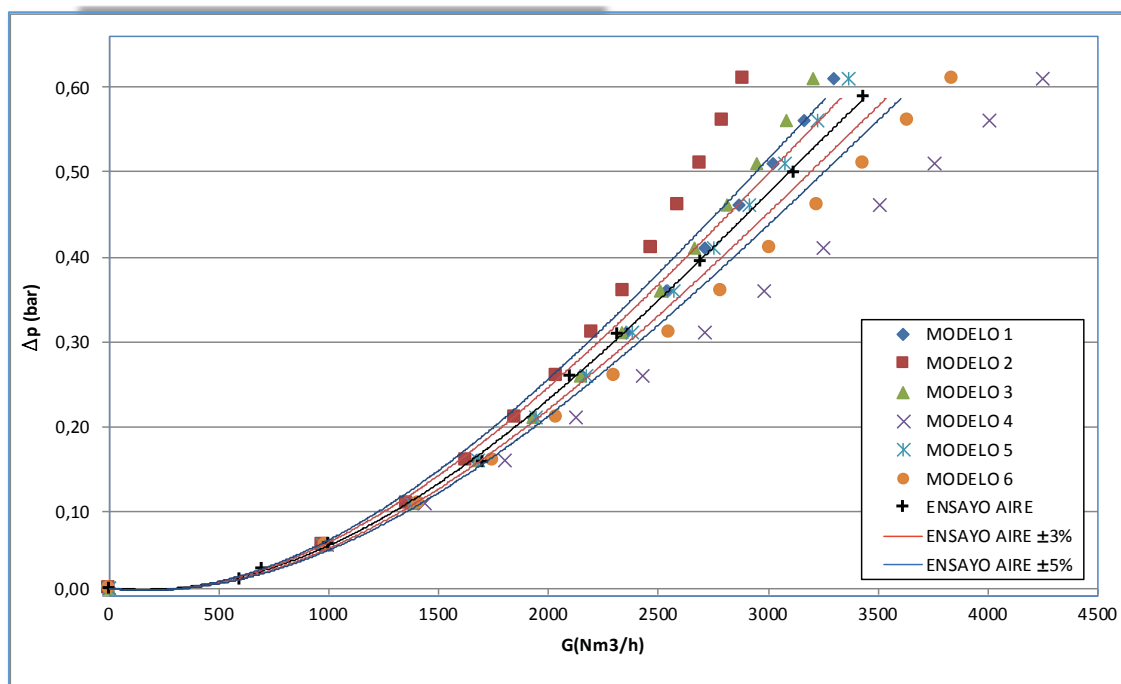


Figura 4.4. Comparativo prototipo 3 - ensayo aire en ventosas 3".

En concreto se puede observar (figura 4.5), como dependiendo del modelo matemático de semejanza utilizado las curvas obtenidas se mantienen en el mismo rango de error y son válidas para los rangos de funcionamiento de las ventosas (hasta 0,3 bar).

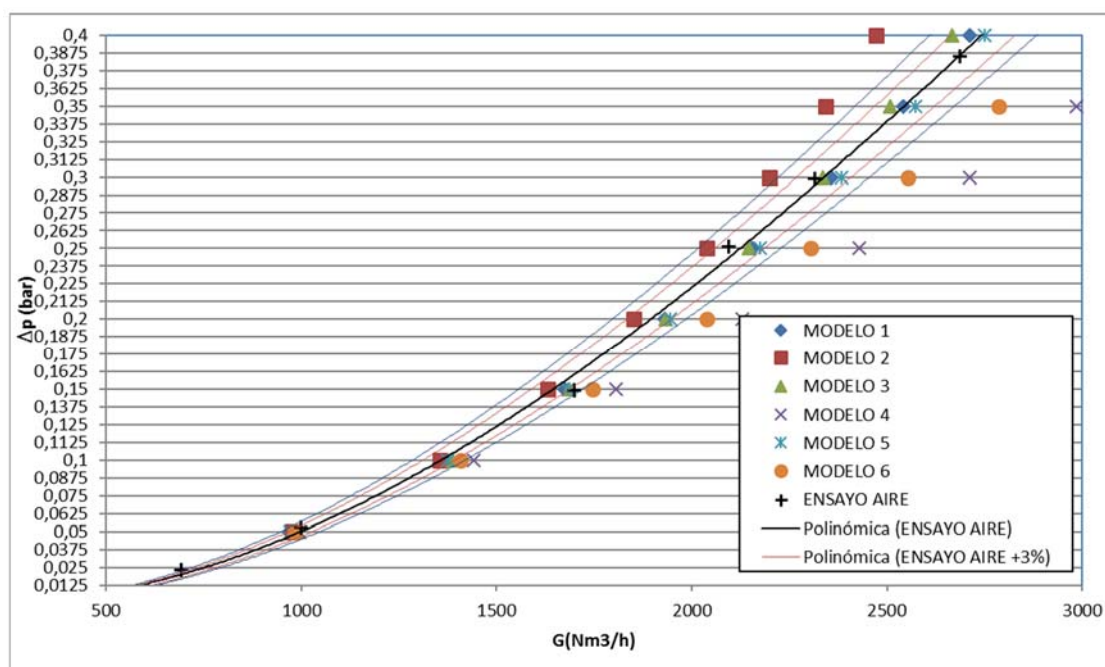


Figura 4.5. Detalle del área útil de uso en ventosas.

Varios de los modelos aplicados se mantienen en una diferencia de valores respecto a los ensayo con aire inferior al 3% hasta valores por encima de 0,4 bar de Presión diferencial.

De los diferentes modelos estudiados, el que representa unos datos más cercanos a los obtenidos con aire es el denominado en la gráfica como modelo 5, basado en considerar el flujo incompresible y la densidad aguas abajo constante.

5. Conclusiones

Para finalizar el presente trabajo en este apartado se van a analizar los resultados obtenidos por cada uno de los prototipos, las mejoras a implementar y los desarrollos futuros que se podrían llevar a cabo.

5.1 Conclusiones del primer prototipo.

Fue la plasmación de la idea. Se realizó prácticamente con los materiales de los que se disponía en el laboratorio y los resultados fueron muy satisfactorios:

- Se comprobó que no es necesario que sea transparente por no poder observarse nada en el desarrollo de los ensayos. La turbulencia que se genera impide observar ninguna línea de fluido, ni inyectando colorantes ni inyectando aire.
- Fue desarrollado para un tamaño máximo de ventosas de 2" y resulto idóneo para dicho tamaño.
- Por sus reducidas dimensiones se puede instalar en el banco de ensayo existente en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos.
- El montaje y desmontaje de las ventosas es sencillo y rápido.
- El sistema de doble T instalado en la base facilita el intercambio de entrada y salida en la ventosa y por lo tanto facilita el poder realizar los ensayos de admisión y expulsión realizando pocos cambios en la estructura del montaje.

Los resultados obtenidos mediante la transformación de los resultados obtenidos aplicando la semejanza hidrodinámica son muy aceptables, con un error máximo respecto a los ensayos con aire del 1,8% en el punto más desfavorable de la zona utilización de las ventosas (presión diferencial entre 0 y 0,3 bar). Es completamente viable la utilización de este prototipo o uno similar para el ensayo de ventosas de hasta 2", tanto en el ensayo de admisión como de expulsión de agua y la posterior conversión de los datos a sus valores equivalentes en el ensayo con aire.

5.2 Conclusiones del segundo prototipo.

Se fabricó para poder ensayar ventosas de 3" (DN80) buscando con ello que cualquier fabricante de ventosas ensayando una ventosa de 3" pueda justificar todos los tamaños de un modelo aplicando la norma. Con la utilización de este prototipo se justificarían dos inferiores (DN50 y DN65) y la superior (DN100) (figura 5.1).

DIMENSIONES GENERALES Y PESOS					
DN	Conexión	A	C	B	Peso
1"	Rosca M.	105	105	200	2,3
2"	Rosca M.	140	140	258	4,9
DN50	Brida	140	140	258	7
DN65	Brida	140	140	260	9
DN80	Brida	184	184	355	18
DN100	Brida	222	222	394	25

Dimensiones en mm y pesos en kgs.
Conexiones: - PN10-16-25 s/EN - 150# s/ANSI



Figura 5.1. Catálogo comercial. Tamaños de un mismo modelo.

En este caso fue fabricado con el mismo diseño que el primero, pero en acero galvanizado en lugar de materiales plásticos para darle más robustez. Los resultados de los ensayos fueron correctos, pero no la realización de los mismos:

- El peso considerable de la cámara de ensayo (450 kilos) hizo necesario el montaje de un puente grúa portátil para la extracción de la cámara.
- Una limitación importante en el diseño fue la altura del laboratorio, que implicó que el puente grúa no pudiera tener la suficiente altura libre para poder elevar lo suficiente la cámara. Ello implicaba tener que desmontar parte de la instalación de salida de la cámara para poder extraer la ventosa.
- Al no poder retirarse la cámara mientras se montaba la ventosa, deben colocarse soportes de seguridad para fijar la cámara en posición elevada.
- La cantidad de tornillos (20) de M20 hace que el ajuste de la tapa de cierre para evitar fugas resulte trabajoso. Es necesario un importante apriete de los tornillos para evitar fugas de agua incluso para la relativamente baja presión (1 bar) a la que funciona el prototipo.

- La limitada altura del puente grúa hace que la distancia libre para manipular la ventosa dentro de la cámara sea muy limitada y
- Al contrario de lo ocurrido en el primer prototipo, en este la medida de caudal se volvió bastante inestable al circular por la cámara caudales de hasta 30 litros por segundo. El problema se solucionó con la amortiguación de señal descrita anteriormente.

Para la aplicación de la semejanza hidrodinámica se utilizaron seis modelos diferentes. Como se observa en la figura 4.4 los resultados obtenidos con algunos de ellos se alejan de los resultados obtenidos con aire. Para el rango de funcionamiento de la ventosa (hasta los 0,445 bar que es cuando se produjo el cierre cinético), el error está en torno al $\pm 5\%$ para los modelos 1, 3 y 5. En el rango útil de cálculo (hasta 0,3 bar) se encuentran en el margen del 3% tal como se puede observar en la figura 5.2.

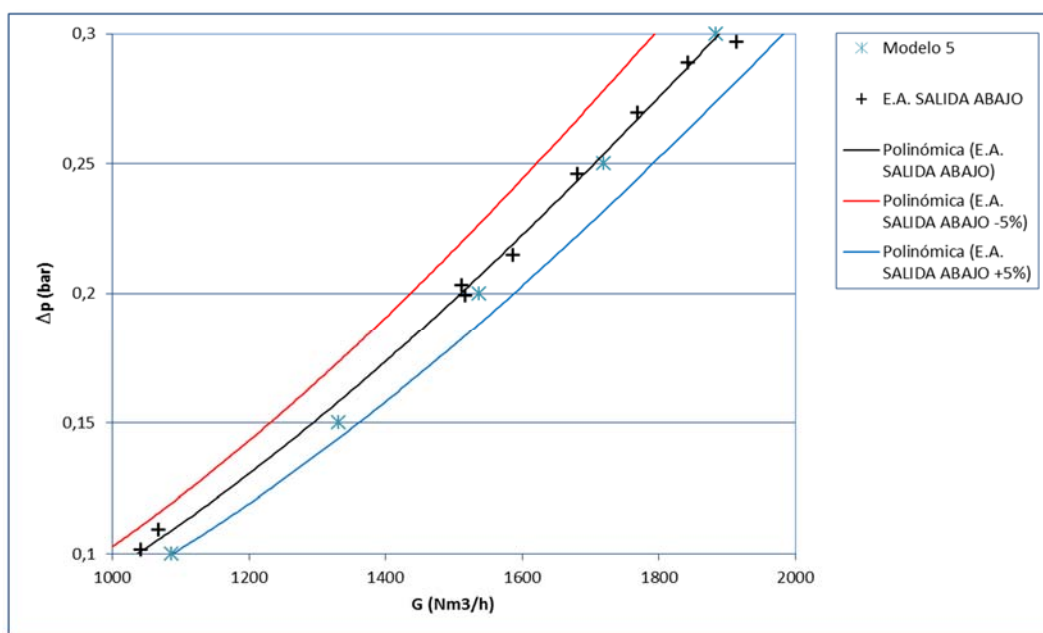


Figura 5.2. Detalle Comparativa ensayo aire con modelo 5 con prototipo 2.

El modelo 5 (Ecuaciones considerando el flujo incompresible aplicando densidad aguas abajo constante), se encuentra en el entorno cercano al ensayo de aire.

El detalle de que sea en el rango de bajos caudales donde más se aleja de los datos obtenidos con aire, puede ser debido a la fiabilidad del ensayo con aire a caudales bajos. El banco de ensayo con soplantes está diseñado para el ensayo de ventosas de hasta 8" y es por ello que la precisión de medida a tan bajos caudales no sea la óptima. En las instalaciones se utilizaba

un solo caudalímetro másico para todo el rango de mediciones que se realizaban en el banco de ensayo, con lo que a bajos caudales su precisión disminuye.

Es completamente viable la utilización de este prototipo o uno similar para el ensayo de ventosas de hasta 3", tanto en el ensayo de admisión como de expulsión de agua para la posterior conversión de los datos a sus valores equivalentes en el ensayo con aire. Aplicando lo que dice la norma con el ensayo de dicho diámetro se validan todas las ventosas de los catálogos que tienen obligación de ser ensayadas.

5.3 Conclusiones del tercer prototipo.

Este prototipo se construyó para simplificar el ensayo en expulsión de las ventosas. Algunas de sus principales características son:

- Se simplificó el montaje de las ventosas en los ensayos. No hay que sellar la cámara de ensayo con multitud de tornillos y junta de goma.
- Se puede observar la expulsión del agua por la salida de la ventosa. Comprobar que cierra bien la junta de la tapa y no fuga agua por la misma. Comprobar la trayectoria del fluido una vez sale de la ventosa. En varios de los ensayos se ve como el fluido impacta con el cuerpo de la ventosa o con los elementos de cierre (tornillos) de la tapa.
- Una considerable reducción del coste económico de la cámara al realizarse con elementos económicos y muy comunes de la industria.
- Menor instrumentación de medida de presión al medirse solo en la tubería de acceso a la ventosa. La utilización de transductores de presión en lugar de transductores diferenciales también reduce costes.
- Como gran inconveniente la imposibilidad de realizar los ensayos de admisión.

En la figura 5.3 se puede comprobar la validez del modelo 5 también en este prototipo. Los valores obtenidos se mantienen por debajo del 3% en todo momento, incluso en lecturas a 0,4 bar de diferencial de presión.

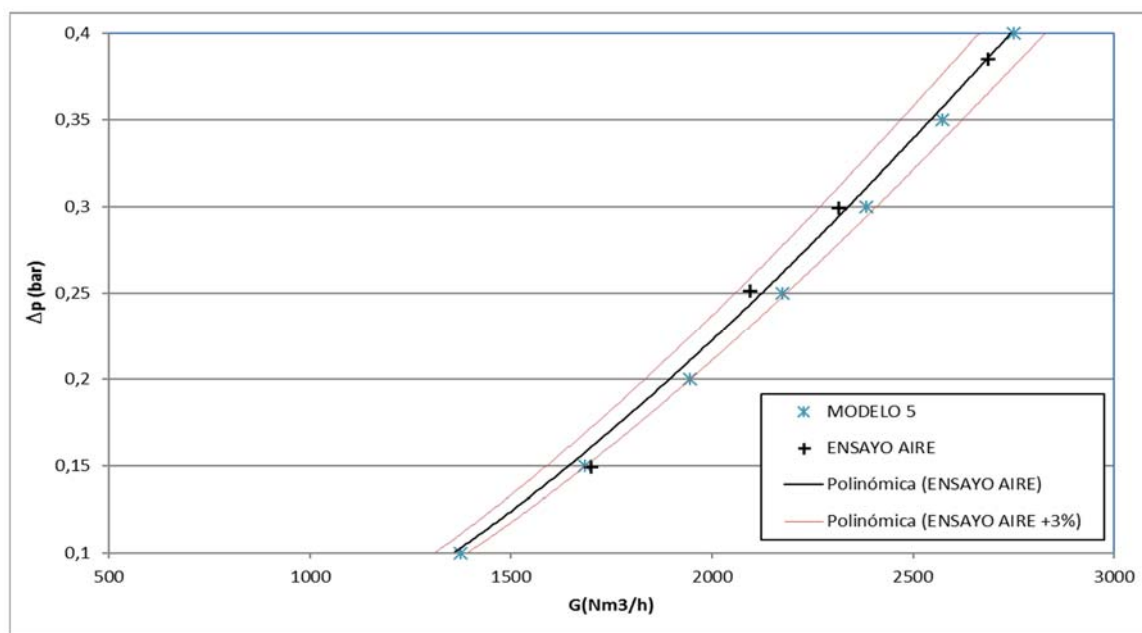


Figura 5.3. Detalle Comparativa ensayo aire con modelo 5 con prototipo 3.

5.4 Conclusiones finales.

Con la construcción de estos tres prototipos y los ensayos posteriores se puede demostrar la viabilidad de los ensayos con agua y la posterior transformación de los datos para la obtención de datos equivalentes en ensayos con aire.

El modelo identificado como número 5 en este trabajo (Ecuaciones considerando el flujo incompresible aplicando densidad aguas abajo constante) consigue una curva característica de las ventosas que en ninguno de sus puntos se ha alejado más de un 3% de la obtenida con los ensayos con aire.

Cada prototipo tiene sus ventajas y limitaciones:

- El primer prototipo es de tamaño reducido con lo que es fácil de manejar y se puede instalar en instalaciones existentes como un accesorio factible. En contra solo se pueden instalar ventosas de hasta 50mm lo que reduce su margen de uso
- El segundo prototipo al ser construido en acero es más robusto y pesado. Deben ser mejorados los elementos de cierre de la cámara para facilitar su montaje y desmontaje. Debería instalarse en espacios más altos para una mejor manipulación. Diseñado para ventosas de DN80 con lo que justificar el rango de ensayo de la norma.

- El tercer prototipo es el más fácil de construir de los tres, pero no por ello menos útil. La instalación de la ventosa es mucho más sencilla y cómoda que en los anteriores. Se puede observar la salida del fluido de la ventosa y poder rediseñarla para mejorar la salida. La instrumentación es más sencilla y fácil de instalar. Solo es utilizable en ensayos de expulsión.

El gran inconveniente que tienen en común los tres es la imposibilidad de comprobar el cierre dinámico de la ventosa, dato bastante importante dependiendo del modelo de ventosa. En la actualidad los fabricantes tampoco desvelan ese dato. Una alternativa para estudiarlo a medio plazo será la aplicación de técnicas CFD con las que poder calcular el arrastre ejercido por el fluido sobre el flotador y predecir el momento en que se produce el arrastre.

Los tres prototipos realizados han demostrado unos resultados mucho más cercanos a la realidad que los datos de la información técnica (figura 1.8) de algunos fabricantes. Con ello poder saber realmente los datos de caudal cada ventosa.

Con el presente trabajo se ha demostrado que la fiabilidad del uso de estos equipos. Se pone al alcance de los usuarios de las ventosas una sencilla herramienta para poder comparar entre las diferentes ventosas que les presenta el mercado, y elegir la que más se adapte a sus necesidades y requisitos de diseño.

La utilización de prototipos como los desarrollados en este trabajo, junto con la aplicación de la semejanza hidrodinámica en combinación con las técnicas CFD de tratamiento de Fluidos. puede ser una seria alternativa a los ensayos físicos con aire que se realizan hasta la fecha. El desarrollo de ambas técnicas supondrá una evolución en el diseño y una mejora en el rendimiento de las ventosas.

6. Bibliografía

- ANSI/AWWA 512** (2004) American Water Works Association. "Air-Release, Air/Vacuum, and Combination Air Valves for Waterworks Service".
- AWWA M51** (2005) American Water Works Association. "Air-Release, Air/Vacuum, and Combination Air Valves for Waterworks Service. Manual of water supply practices".
- Chaudhry, M.H.** (1987) Applied hydraulic transients. Ed Van Nostrand Reinhold Company, New York, USA
- Carlos, 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.
- Dvir, Y.** (1995); Flow control devices, editado por Control Appliances Books para Bermad Control Valves, Israel.
- Fuertes, V.S.** (2001); Transitorios con aire atrapado. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia.
- Iglesias-Rey, P.L., Fuertes-Miquel, V.S., García-Mares F.J., Martínez-Solano, F.J.** (2016); "Caracterización de válvulas de admisión de aire y expulsión de aire comerciales". Tecnología y Ciencias del agua, 7.1.
- Guarga, R., Sanchez, J.L., Carmona, R., Aguilar, L.** (1990); Transitorios hidráulicos y su control; Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Montevideo, Uruguay.
- Reader R.A., Kennard M.F., Hay J.** (1997) "Valves, pipework and associated equipment in dams-guide to condition assessment. CIRIA Report 170. CIRIA.
- 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".
- Wylie, E.B., Streeter, V.L.** (1982). Fluid transients. FEB Press, Ann Arbor, Michigan, USA.