

Caracterización de ventosas de admisión y expulsión de aire

Arrué, P.^{a1}, Romero, A.M.^{a2}, Espert, V.^{a3}, García-Serra, J.^{a4} y Ponz, R.^{b1}

^aUniversitat Politècnica de València, Camino de vera s/n (46022-Valencia), E-mail: ^{a1}paarbu@csa.upv.es, ^{a2}aromeros@csa.upv.es, ^{a3}vespert@ita.upv.es, ^{a4}jgarcias@ita.upv.es

^{b1}Emimet, C/ Antiga Senda de Senent nº 8 5ª planta (46023-Valencia). E-mail: ^{b1}rponz@emimet.es.

Línea temática D | Estructuras hidráulicas

RESUMEN

En el presente trabajo se resumen los resultados obtenidos en los ensayos de 29 ventosas en expulsión y 15 ventosas en admisión, con diámetros comprendidos entre 50 y 150 mm. Se presentan las curvas P-Q y los valores de la presión a los que se produce cierre dinámico (antes de que llegue el agua a la ventosa) en los casos en los que este tiene lugar, así como los valores de la presión a los que se produce el cierre del primer flotador en el caso de ventosas “non slam”. Se comparan los citados valores con los que figuran en los catálogos de los fabricantes.

Los resultados obtenidos se utilizarán en modelos matemáticos de simulación de llenado y vaciado de conducciones, dentro de un convenio de investigación que lleva cabo la Universitat Politècnica de València (UPV) en colaboración con la empresa Global Omnium.

Palabras clave | ventosa; aire atrapado; llenado; vaciado; modelos de simulación.

INTRODUCCIÓN

La Universitat Politècnica de València (UPV) y la empresa Global Omnium trabajan conjuntamente en un proyecto de Investigación y Desarrollo que tiene como objetivo elaborar un protocolo para el llenado y vaciado de grandes conducciones. Para ello resulta imprescindible conocer muy bien el funcionamiento real de los elementos que intervienen en el sistema. La elección de las ventosas adecuadas junto con el control de las válvulas de llenado y vaciado (desagües) para lograr una velocidad del flujo conveniente, aseguran unas maniobras en condiciones de máxima seguridad.

Como primera fase de este estudio se plantea el ensayo de las ventosas a fin de contrastar su funcionamiento con los datos proporcionados por los fabricantes. El objeto del trabajo que aquí se presenta es describir los ensayos realizados, recopilar los valores obtenidos y analizar los resultados, comparándolos con los datos de los fabricantes. Por último, obtener las curvas modelizadas del comportamiento real para su uso en modelos matemáticos de simulación de llenado y vaciado de conducciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Tipos de ventosas a estudio.

Se estudian las diferentes tipologías de ventosas utilizadas en la práctica para el llenado y vaciado de conducciones:

- **Bifuncionales (BF):** Se trata de ventosas en las que la sección de salida del aire es del mismo orden de magnitud que la conexión a la conducción. Trabajan a bajas presiones (1 o 2 mca). Normalmente, las empleadas en las instalaciones objeto de estudio son de DN-50, DN-80 y DN-100.
- **Trifuncionales (3F):** La doble función de las BF más la expulsión a altas presiones (función purgador).
- **Antiarriete o non-slam (NS):** Cuando el agua llega a la ventosa para provocar el cierre del flotador, puede generarse una sobrepresión como consecuencia de que esta es frenada al cerrar la ventosa. En este tipo de ventosas, cuando se detecta una velocidad del aire superior a un valor dado, lo que corresponde a una presión determinada, un primer flotador cierra provocando la reducción del caudal de expulsión (el orificio que queda es de tamaño inferior al orificio que había inicialmente). El incremento de presión originado en la bolsa de aire que hay en el interior de la conducción frena el flujo de agua, de manera que al llegar esta al flotador lo hará a menor velocidad y el choque al cerrar el flotador no será tan brusco.
- **Otros tipos:** Las diferenciales (DF), en las que la capacidad de admisión es elevada mientras que la de expulsión está limitada, pudiendo incluso regularse para cada caso, o con membrana, en las que la ventosa se mantiene cerrada en tanto la presión no alcanza en el interior de la tubería un valor mínimo, y el cierre cuando llega el agua es progresivo (función antiarriete). Asimismo, cuando la presión en el interior de la conducción es negativa, permite la entrada del aire en la conducción.
- **Grifos de purga (GP):** Conexiones que se realizan entre la tubería y la atmósfera a través de válvulas, generalmente de bola y de diámetros entre 1/2" y 1 1/2", maniobradas por un operario. Es lo que podía denominarse una ventosa manual o ventosa libre.

Se ensayaron un total de 29 ventosas en expulsión (DN-50, 80, 100, 150 y non-slam DN-80 y DN-100) y un total de 15 ventosas en admisión (DN-50, 80 y 100). Por motivos de confidencialidad no podrán mostrarse los nombres comerciales de las ventosas pero si la metodología de los ensayos, análisis comparativos y los formatos en los que se presenta la información, muchos de ellos novedosos y de gran utilidad práctica. Los ensayos indicados en la Tabla 1, se llevaron a cabo en los laboratorios de CSA y de ARI.

Tabla 1 | Ventosas ensayadas en los laboratorios de CSA y ARI.

| Ficha nº/ Ensayo | 1.1.D80 | 1.2.D80 | 1.3.D100 | 1.4.D80 | 1.4.D100 | 2.1.D80 | 3.1.D100 | 4.1.D80 | 4.1.D100 | 4.2.D80 | 4.2.D100 | 5.1.D80 | 5.1.D.100 | 6.1.D80 | 6.1.D100 | 7.1.D80 | 7.1.D100 | 7.2.D50 | 7.2.D100 | 8.1.D50 | 8.1.D150 | 9.1.D80 | 9.1.D100 | 10.1.D80 | 10.1.D100 | 10.2.D80 | 11.1.D80 | 11.1.D100 | 12.1.D80 |
|------------------|---------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|-----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|
| <i>Non Slam</i> | | x | | | | | x | | | x | x | | | | | | | | | | | x | x | | | | | | |
| Expulsión CSA | | x | | x | x | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | x | x | x | x | x | | x | x |
| Expulsión ARI | x | x | x | x | | x | x | | x | x | | x | x | | | x | x | x | x | x | x | | | | x | x | x | | x |
| Admisión CSA | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Admisión ARI | x | | | x | | | x | | | x | x | x | x | | | | x | x | x | x | | | | x | | | x | | x |

Metodología experimental.

Los ensayos se llevaron a cabo en las instalaciones del laboratorio de pruebas y ensayos de válvulas de aire de ARI Flow Control Accessories Ltd. en Kfar Charuv (Israel), una de las instalaciones existentes en el mundo más vanguardistas y en el laboratorio de la empresa CSA, ubicado en sus instalaciones de Salsomaggiore Terme (PR) (Italia). En ambos casos se siguieron las recomendaciones de la norma UNE-EN 1074-4 e ISO 9635-4 para realizar los ensayos.

El banco de ensayos de ARI está alimentado por 5 calderines de 10 m³ cada uno con una presión de almacenamiento máxima de 13 bar, y permite realizar ensayos en ventosas de hasta 12” de diámetro. Es posible alimentar las ventosas con presiones de hasta 1 bar, valor que supera en mucho a los valores de las presiones con las que se llenan las conducciones. Para ensayos en admisión, la ventosa se coloca en el interior de un recipiente al que se “inyecta” el aire a presión, generando una atmósfera presurizada en el mismo, de manera que el flujo circula desde la salida hacia la entrada de la ventosa, conectada a la atmósfera, tal y como lo haría en condiciones de aspiración reales. Esta forma de realizar el ensayo, si bien no reproduce las condiciones reales de funcionamiento de las ventosas en admisión al inyectar aire presurizado y no en condiciones atmosféricas, sí que está admitido por la norma UNE-EN 1074-4 y por la ISO 9635-4.

El banco de pruebas y ensayos de válvulas de aire de CSA está alimentado desde de una soplante, capaz de generar un caudal de aire de 4500 Nm³/h a una presión máxima de 0.50 bar aproximadamente, suficiente para reproducir las condiciones normales de funcionamiento en llenado. El motor eléctrico que mueve la soplante está equipado con un variador de frecuencia, lo que permite modificar la velocidad de giro de la soplante, a fin de obtener diferentes curvas motrices. De esta manera se pueden ensayar diferentes puntos de la curva P-Q de la ventosa, al poder incrementar progresivamente la velocidad de giro de la soplante. El banco está diseñado para acoplar ventosas de hasta 100 mm de diámetro nominal. Los ensayos en admisión están más limitados en este banco dado que se conecta directamente la tubería alimentada desde la soplante a la brida de salida de la ventosa, inyectando el flujo a presiones superiores a la atmosférica. En ambos bancos se cuenta con la instrumentación adecuada para medir presión, temperatura y caudal.

Los resultados que de obtuvieron fueron, para cada ventosa ensayada:

- Curvas P-Q, para determinar el caudal expulsado por las ventosa en función de la presión en el interior de la tubería (expulsión), o admitido por las mismas en admisión dada una diferencia de presiones determinada entre salida (desde donde admite el aire) hasta el interior de la tubería.
- Condiciones (P y Q) en las que se produce cierre dinámico o cierre anticipado (antes de que llegue el agua), si es que se produce, o condiciones de cierre del dispositivo antiariete correspondiente en las ventosas tipo NS.
- Condiciones (presión) bajo las cuales se produce la apertura de la membrana para expulsar el aire en las ventosas tipo membrana.

RESULTADOS

Caudal en condiciones normales y caudal en condiciones interiores.

Es importante distinguir entre el caudal de aire en condiciones normales (CN), que vendrá expresado en Nm³/h y el caudal de aire en condiciones del interior de la tubería (CI), expresado en m³/h, que es el caudal volumétrico real de aire que está circulando por el interior de la tubería y el que será necesario utilizar en los modelos de cálculo. Durante el llenado de la conducción, el agua “empuja” al aire que se verá más o menos presurizado en función del caudal de llenado y de la capacidad y número de ventosas por las que el aire es expulsado. Esta presión irá evolucionando con el tiempo pudiendo alcanzarse un régimen permanente y una estabilización del valor de la presión en el momento en el que el caudal de llenado de agua sea igual al caudal del aire en CI que está siendo expulsado por las ventosas.

En cada instante, siendo G el caudal másico de aire, se cumplirá la Ecuación (1):

$$G = Q_{CI} \cdot \rho_{CI} = Q_{CN} \cdot \rho_{CN} \quad (1)$$

donde, Q_{CI} es el caudal volumétrico en m³/s y ρ_{CI} la densidad del aire en kg/m³, ambos en condiciones del interior de la tubería, mientras que Q_{CN} y ρ_{CN} son el caudal volumétrico en Nm³/s y la densidad kg/Nm³ en condiciones normales, que son presión atmosférica en condiciones normales ($P_{\text{aire(CN)}}=101324.2691$ Pa) y temperatura ambiente (20°C).

Normalmente, los fabricantes suele mostrar las curvas P vs. Q con el caudal en condiciones normales. Aplicando la ecuación de los gases perfectos y admitiendo por simplificación que la temperatura del aire en el interior de la tubería es similar a la temperatura ambiente, condiciones isotérmicas, se obtiene la Ecuación (2) que relaciona los caudales en CN y CI.

$$Q_{CI} \cdot (P_{atmlocal} + P_{relativa}) = Q_{CN} \cdot P_{aire(CN)} \quad (2)$$

Esta ecuación permite convertir el caudal en condiciones normales a caudal en las condiciones del interior de la tubería y viceversa. Y se han representado ambos gráficamente, de manera que para un determinado caudal de llenado previsto, a través de las gráficas se puede ver la presión o depresión que se alcanzará durante el llenado o vaciado respectivamente. Sin duda, estas gráficas resultan de gran utilidad dado que permiten relacionar de manera directa el caudal de aire, el caudal de agua y la presión en el interior de la tubería. Hay que hacer notar que el caudal en condiciones del interior de la tubería se puede calcular a partir de la Ecuación (2) teniendo en cuenta no solo la presión en el interior de la tubería, sino también el valor de la presión atmosférica local en ese momento y ubicación.

Fichas características de las Ventosas.

Los resultados experimentales de las veintinueve ventosas ensayadas en expulsión de aire y las quince ensayadas en admisión de aire, y su comparativa con los datos suministrados por los fabricantes, se han presentado en forma de fichas individuales, donde se resumen sus características principales, así como las curvas P vs. Q, tanto para CN como para CI, en este caso siempre considerando una presión atmosférica local a nivel del mar (1.013 bar).

Las ventosas se identifican mediante una codificación compuesta por 4 dígitos que corresponden a Marca, Modelo, DN y tipo de ensayo (Expulsión (E) o Admisión (A)). En cada ficha, además de los datos identificativos de la ventosa, se recogen, en el apartado A, las características técnicas comerciales, y en el apartado B el número de ensayos realizados y los laboratorios en los que se han llevado a cabo, así como los resultados más relevantes, indicando los puntos máximos obtenidos de caudal y presión en cierre parcial (ventosas NS) y máximo ensayado, y si se ha producido o no cierre dinámico y a qué valor de presión y caudal. En el apartado C se realiza la comparativa gráfica de la curva comercial y la experimental en condiciones interiores. Asimismo, en el apartado D de la ficha se indican las observaciones y la velocidad máxima de llenado/vaciado referida a cada diámetro nominal de tubería, con el caudal máximo ensayado de la ventosa en condiciones interiores de la tubería. Y por último, en el apartado E la información adicional con los resultados de todos los ensayos realizados en condiciones normales y la ecuación modelizada de la curva experimental en condiciones normales.

En el caso de los ensayos de admisión, los valores de la presión figuran en las tablas y gráficas como negativos, si bien, como se ha comentado anteriormente, en los ensayos se presurizó la salida de la ventosa para introducir el aire y simular la admisión, por lo que en realidad se ha transformado la diferencia de presión entre salida y entrada en depresión, es decir, un diferencial de 0.10 bar se contabiliza como un presión en el interior de la tubería de -0.10 bar.

A continuación se muestra un ejemplo de la ficha de la ventosa 4.2.D80 tipo NS en las Figuras 1 y 2 correspondientes a la fase de expulsión y la Figura 3 correspondiente a la fase admisión de aire.

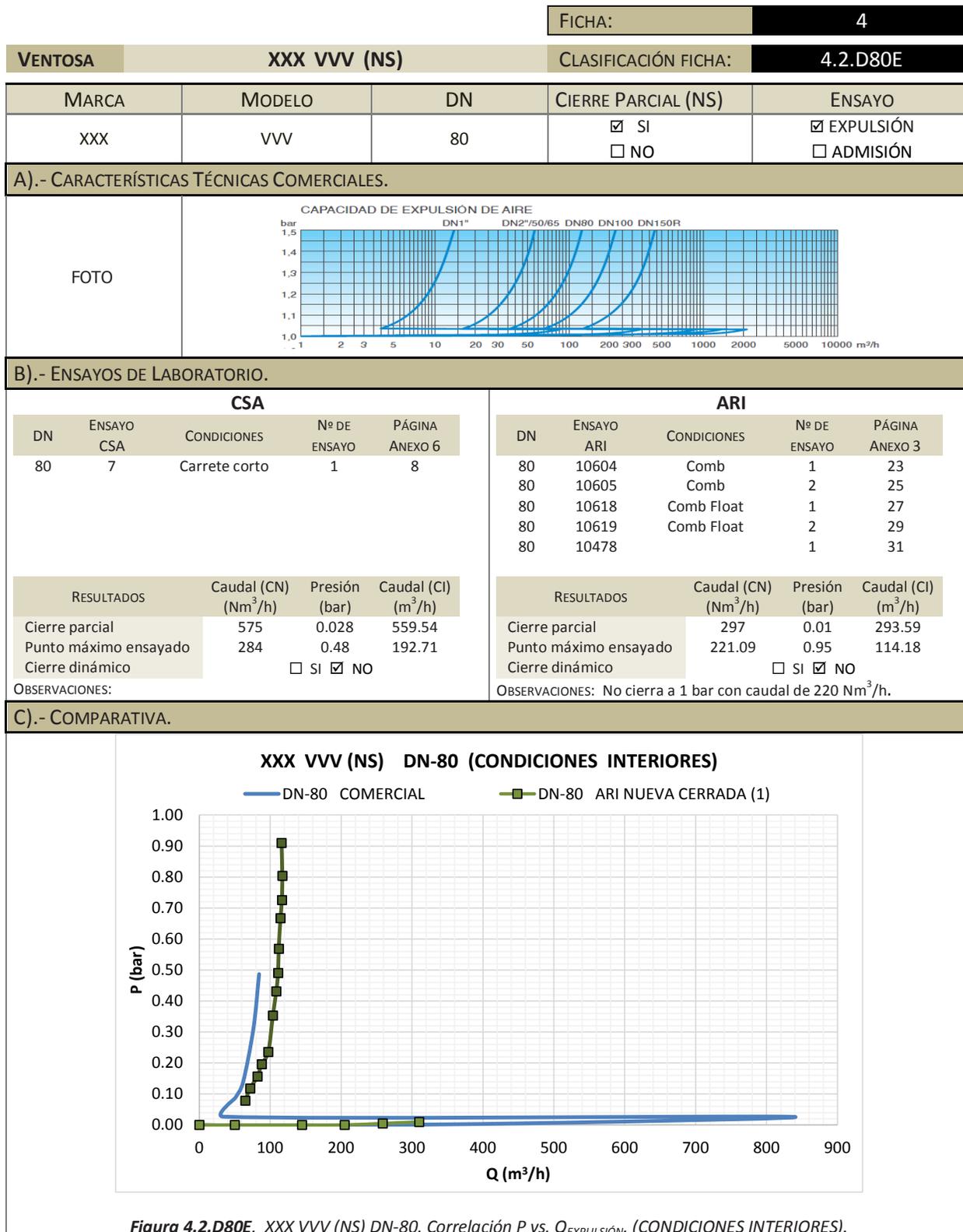


Figura 1 | Ejemplo de ficha tipo de ventosa en expulsión, apartados A, B y C.

FICHA: 4

VENTOSA: XXX VVV (NS) CLASIFICACIÓN FICHA: 4.2.D80E

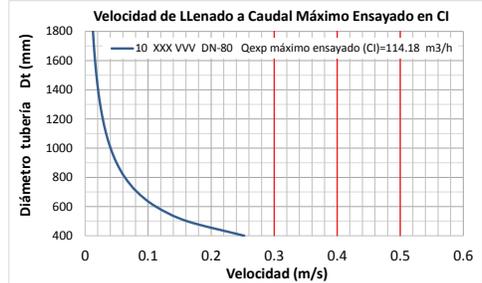
D).-OBSERVACIONES.

Curva Comercial vs. Experimental: La curva experimental de referencia es la de ARI (nueva cerrada (1)). En los ensayos de CSA y ARI se alcanzan las presiones de cierre parcial a unos caudales inferiores al comercial (67 % CSA y 35 % ARI). La desviación promedio de la curva experimental modelizada de ARI respecto de la comercial es de 32.1 %.

Para la presión de cierre parcial de ARI de 0.01 bar el caudal es de 297 Nm³/h con una desviación de 65 % respecto al comercial de 850 Nm³/h.

Curva CSA vs. ARI: La curva de CSA presenta menor desviación en el cierre parcial pero mucho mayor en la segunda etapa que la de ARI.

Velocidad de llenado: Para un caudal máximo ensayado en ARI en CI de 114.18 m³/h a la presión de 0.95 bar la velocidad en función del diámetro de la tubería se indica en la figura Dt vs. V.



E).- INFORMACIÓN ADICIONAL.

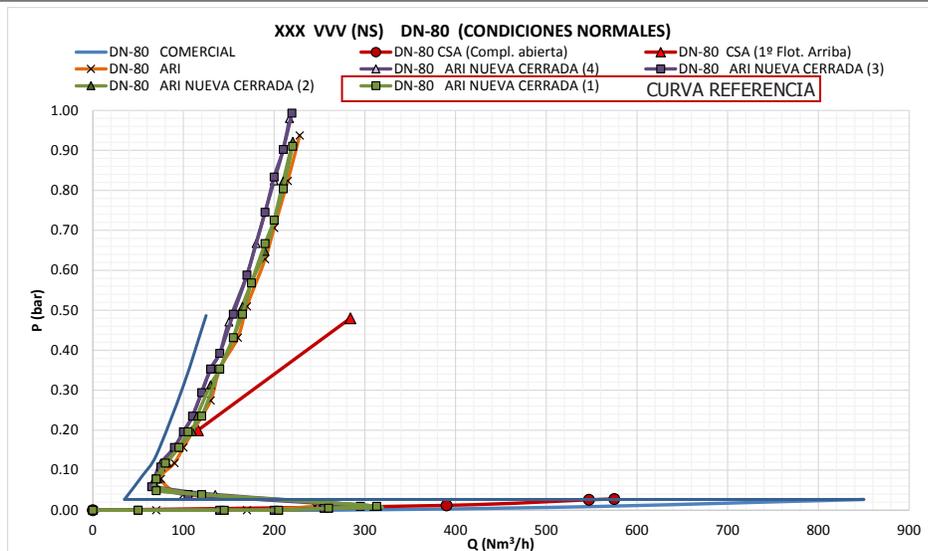


Figura 4.2.D80E. XXX VVV (NS) DN-80. Correlación P vs. Q_{EXPULSIÓN} (CONDICIONES NORMALES). Todos los ensayos.

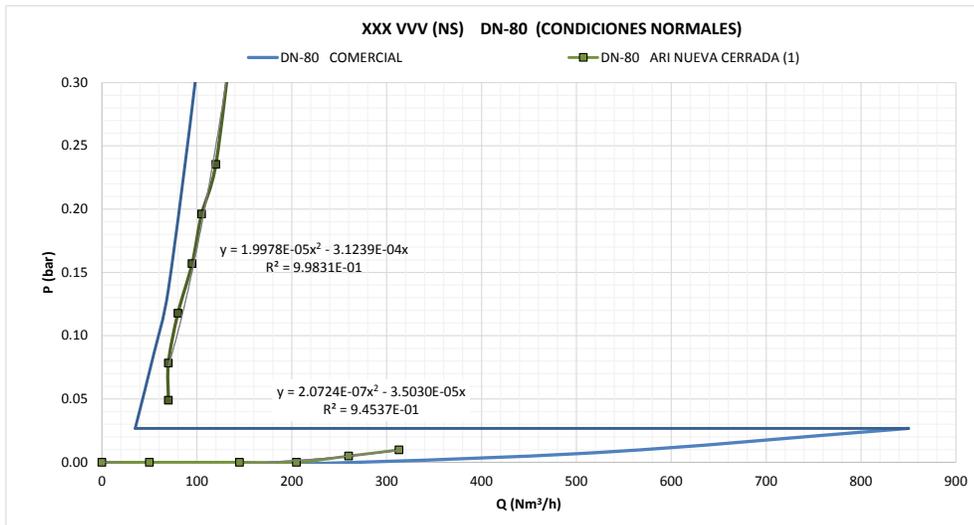


Figura 4.2.D80E. XXX VVV (NS) DN-80. Correlación P vs. Q_{EXPULSIÓN} (P < 0.3 bar). (CONDICIONES NORMALES).

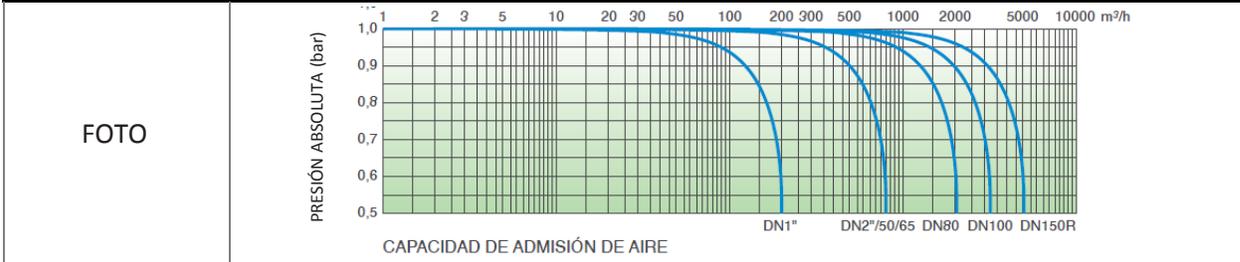
Figura 2 | Ejemplo de ficha tipo de ventosa en expulsión, apartados D y E.

FICHA: 4

VENTOSA XXX VVV (NS) CLASIFICACIÓN FICHA: 4.2.D80A

| MARCA | MODELO | DN | CIERRE PARCIAL (NS) | ENSAYO |
|-------|--------|----|---|--|
| XXX | VVV | 80 | <input checked="" type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO | <input type="checkbox"/> EXPULSIÓN <input checked="" type="checkbox"/> ADMISIÓN |

A).- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS COMERCIALES.



B).- ENSAYOS DE LABORATORIO.

| CSA | | | | | ARI | | | | |
|-----|--------|------------------|--------------|----------------|-----|--------|-------------|--------------|----------------|
| DN | ENSAYO | CONDICIONES | Nº DE ENSAYO | PÁGINA ANEXO 7 | DN | ENSAYO | CONDICIONES | Nº DE ENSAYO | PÁGINA ANEXO 4 |
| 80 | 2 | Carrete especial | 1 | 3 | 80 | 10628 | Nueva | 1 | 10 |
| | | | | | 80 | 10484 | Nueva | 2 | 11 |
| | | | | | 80 | 10485 | Nueva | 3 | 12 |

| RESULTADOS | Caudal (CN) (Nm³/h) | Presión (bar) | Caudal (CI) (m³/h) |
|-----------------------|---------------------|---------------|--------------------|
| Punto máximo ensayado | 2634 | -0.40 | 4352.08 |

| RESULTADOS | Caudal (CN) (Nm³/h) | Presión (bar) | Caudal (CI) (m³/h) |
|-----------------------|---------------------|---------------|--------------------|
| Punto máximo ensayado | 2081.86 | -0.49 | 4058.28 |

C).- COMPARATIVA.

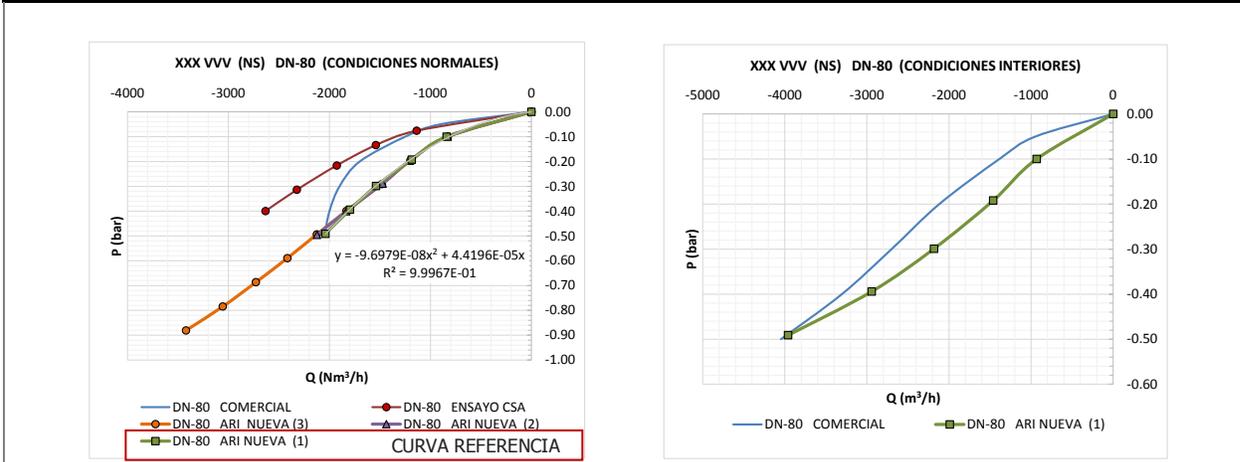


Figura 4.2.D80A. XXX VVV DN-80. Correlación P vs. Q_{ADMISIÓN}.

D).- OBSERVACIONES.

Curva Comercial vs. Experimental: La curva experimental de referencia es la de ARI NUEVA (1). El punto máximo ensayado corresponde a -0.49 bar y caudal ensayado de 2081.86 Nm³/h y comercial de 2100 Nm³/h. Este punto máximo presenta una desviación de 0,9% respecto del comercial. La desviación promedio de la curva es del 25.2 %.

Curva CSA vs. ARI: Los resultados de CSA son muy aproximados a los comerciales hasta 0,1bar, posteriormente proporciona mayor caudal.

Velocidad de vaciado: Para el caudal máximo ensayado en CI de 4058.28 m³/h, la velocidad a la presión de -0.49 bar se indica en la figura Dt vs. V.

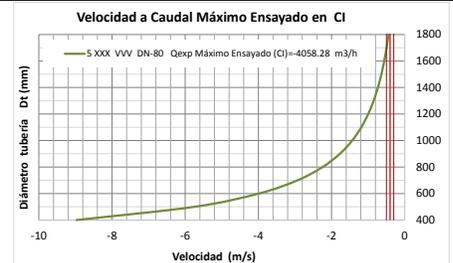


Figura 3 | Ejemplo de ficha tipo de ventosa en admisión.

Comparativa de los resultados de los ensayos de ventosas realizados en Expulsión.

En la Figura 4 se indican las curvas de trabajo facilitadas por los fabricantes de las ventosas de DN-80 en expulsión y en la Figura 5 los resultados experimentales, en condiciones normales. La nomenclatura “CD” indica cierre dinámico.

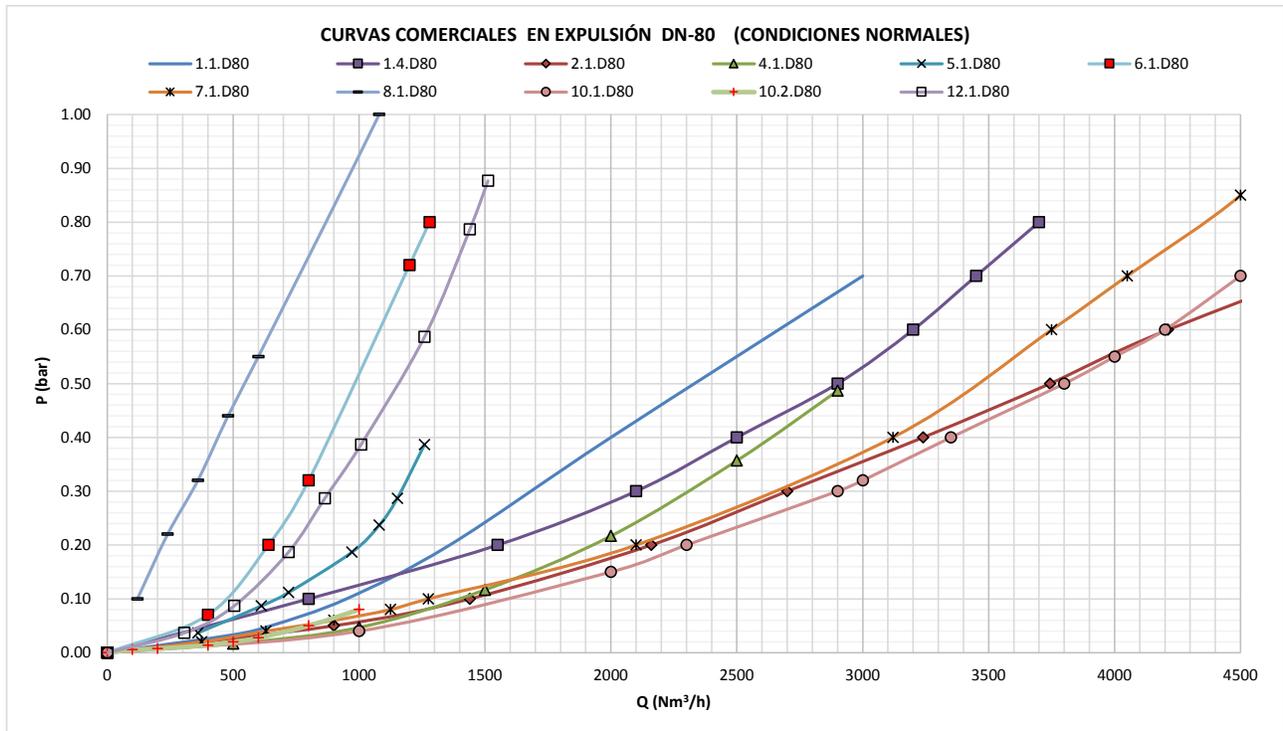


Figura 4 | Curvas comerciales de ventosas en expulsión DN-80. Correlación P vs. Q_{EXPULSIÓN}. De 0 a 1 bar. (Condiciones Normales).

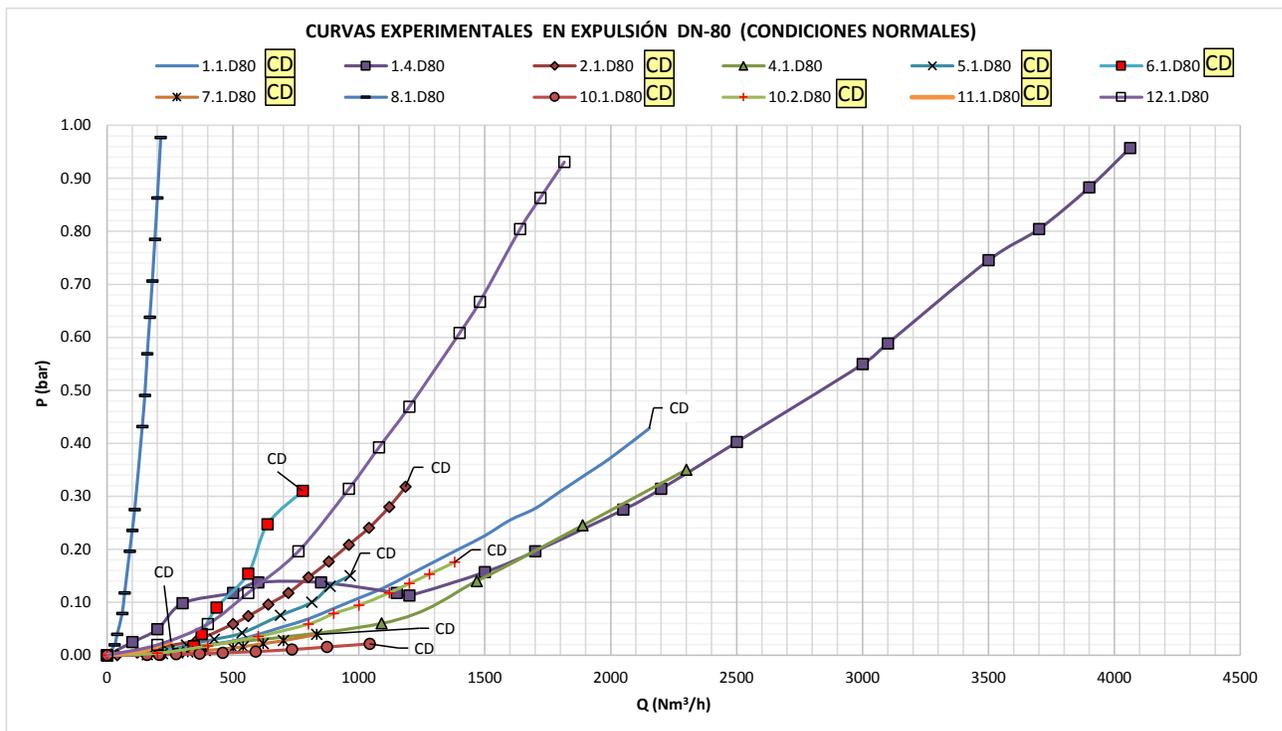


Figura 5 | Curvas experimentales de ventosas en expulsión DN-80. Correlación P vs. Q_{EXPULSIÓN}. De 0 a 1 bar. (Condiciones Normales).

En la Figura 6 se representa el caudal máximo ensayado en condiciones normales Q_{exp} (CN) de DN-80 (azul), DN-100 (rojo), DN-50 (verde) y DN-150 (morado), y los caudales equivalentes en condiciones interiores Q_{exp} (CI) (trama). Si se produjo cierre dinámico se indica el caudal de cierre (color amarillo). En 11 de las 29 ventosas se produjo cierre dinámico.

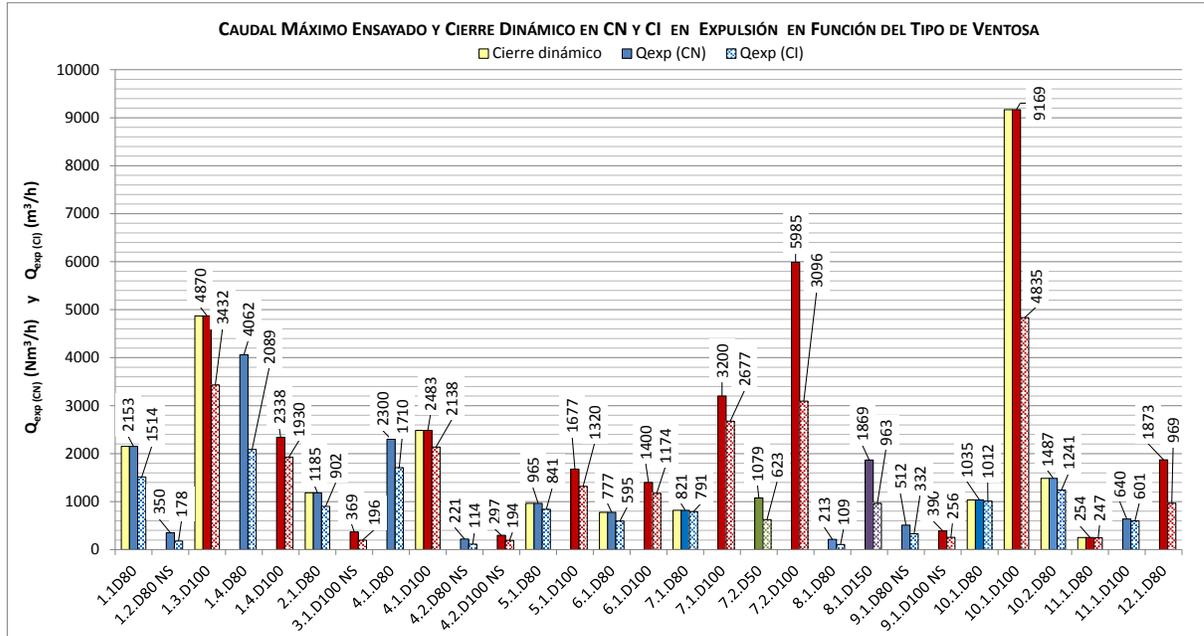


Figura 6 | Caudal máximo ensayado y de cierre dinámico en condiciones normales e interiores de las ventosas.

En la Figura 7 se indica la presión a caudal máximo ensayado de DN-80 (color azul), DN-100 (color rojo), DN-50 (color verde) y DN-150 (color morado). También se indica la presión correspondiente al cierre dinámico (color amarillo) en el caso de que este se haya producido y la presión del cierre parcial en las tipo NS (color naranja).

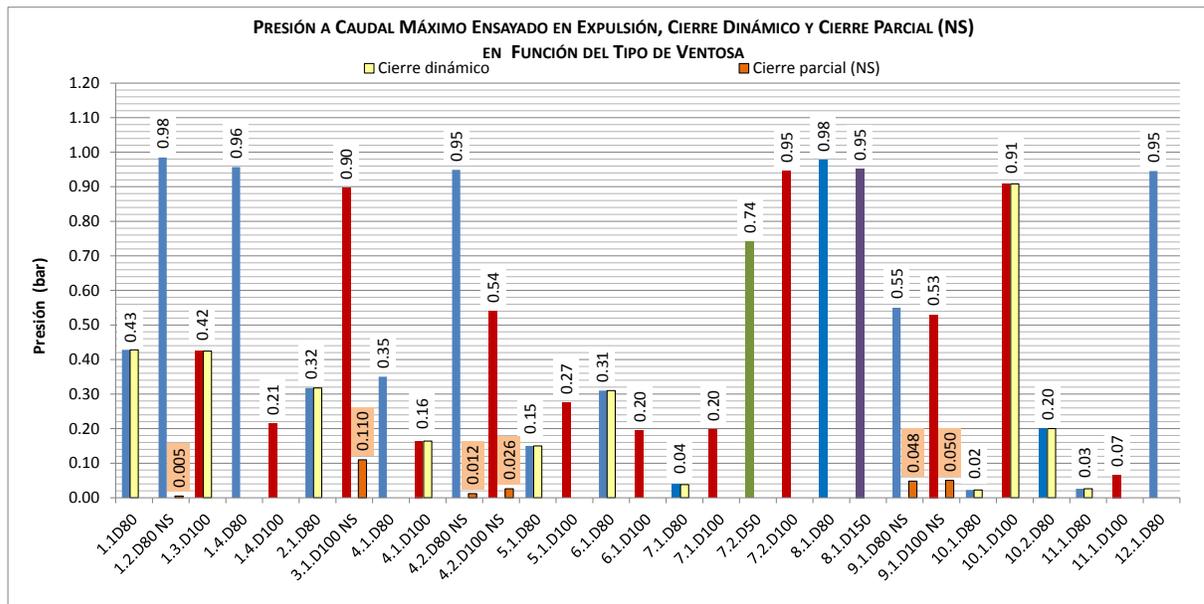


Figura 7 | Presión a caudal máximo ensayado, cierre dinámico y cierre parcial (NS) de ventosas en expulsión.

Las ventosas NS presentan el cierre del primer flotador a presiones muy bajas entre 0.012 bar y 0.11 bar. Y en las que se produjo cierre dinámico la presión oscila entre 0.02 bar y 0.43 bar, valores muy pequeños, que en muchos casos puede producir el cierre prematuro o inesperado de la ventosa, quedando aire atrapado en la tubería.

Se han estudiado los puntos característicos de las ventosas correspondientes a la presión y el caudal experimental en

Comparativa de los resultados de los ensayos de ventosas realizados en Admisión.

En la Figura 8 se indican las curvas de trabajo facilitadas por los fabricantes de las ventosas de DN-80 en admisión y en la Figura 9 los resultados experimentales en condiciones normales.

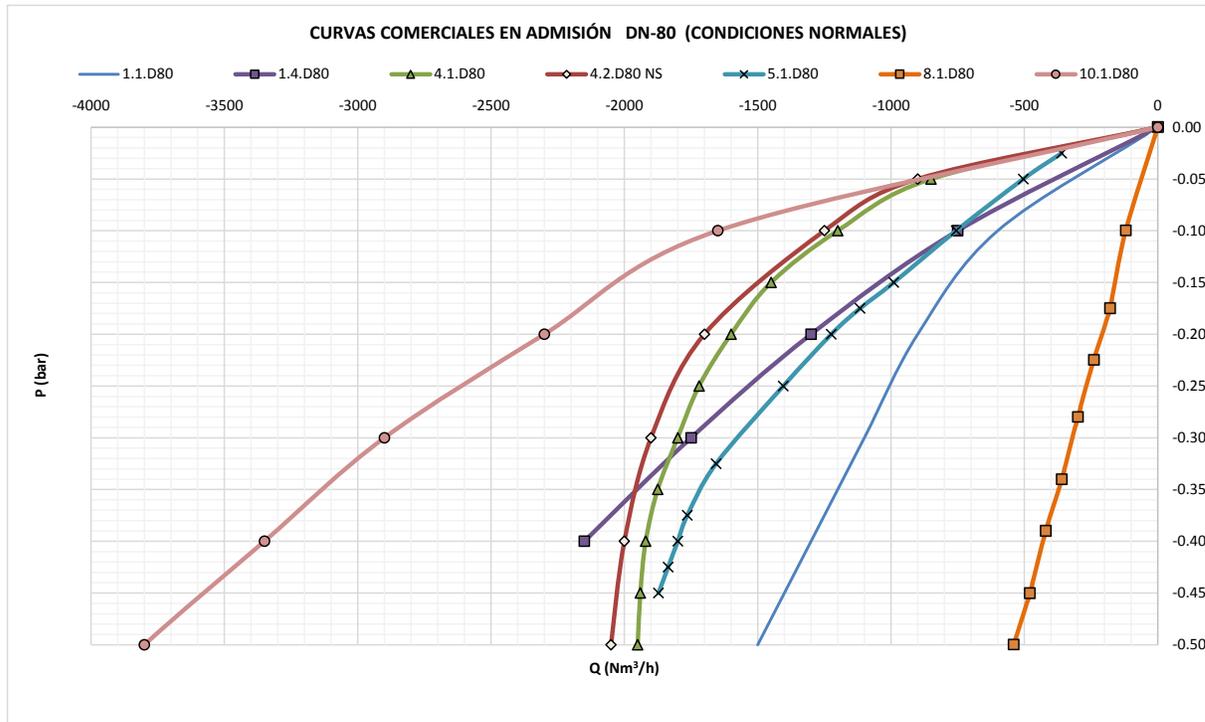


Figura 8 | Curvas comerciales de ventosas en admisión DN-80. Correlación P vs. $Q_{ADMISIÓN}$. De 0 a -0.5 bar. (Condiciones Normales).

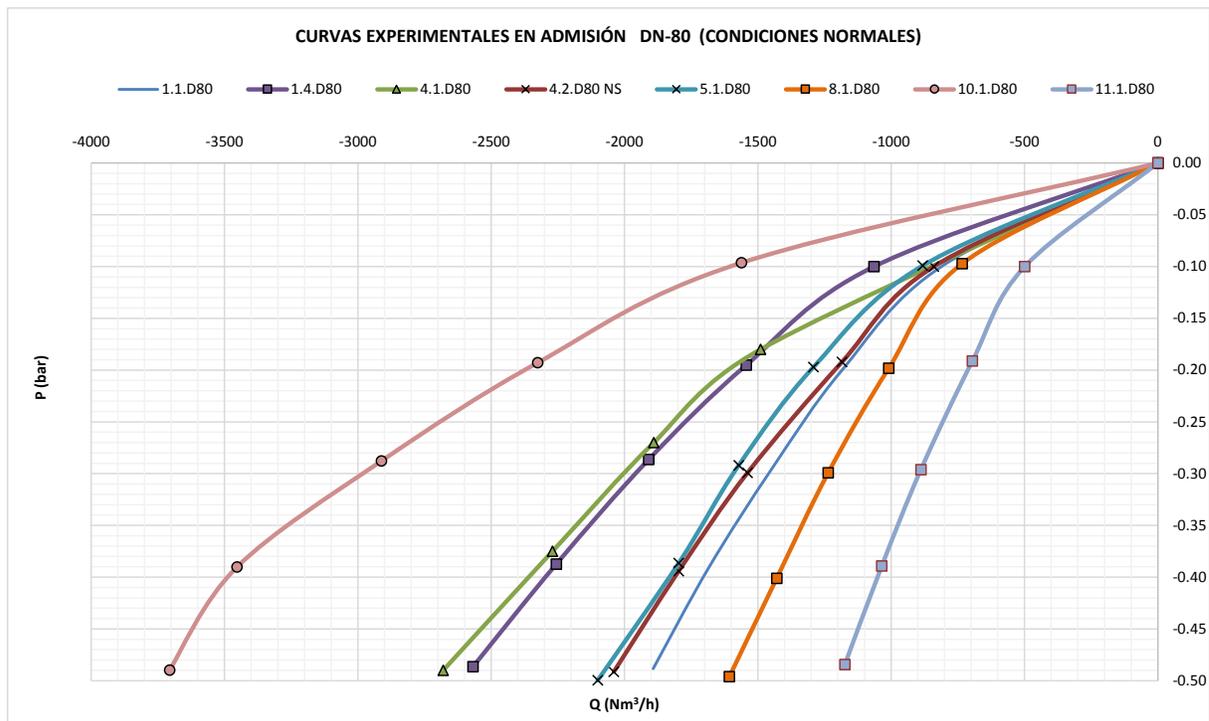


Figura 9 | Curvas experimentales de ventosas en admisión DN-80. Correlación P vs. $Q_{ADMISIÓN}$. De 0 a -0.5 bar. (Condiciones Normales).

De los resultados de los ensayos cabe destacar el caudal máximo ensayado de cada ventosa en admisión como se indican en la Figura 10, de DN-80 (azul), DN-100 (rojo) y DN-50 (verde), así como el caudal equivalente en las condiciones interiores de la ventosa (trama).

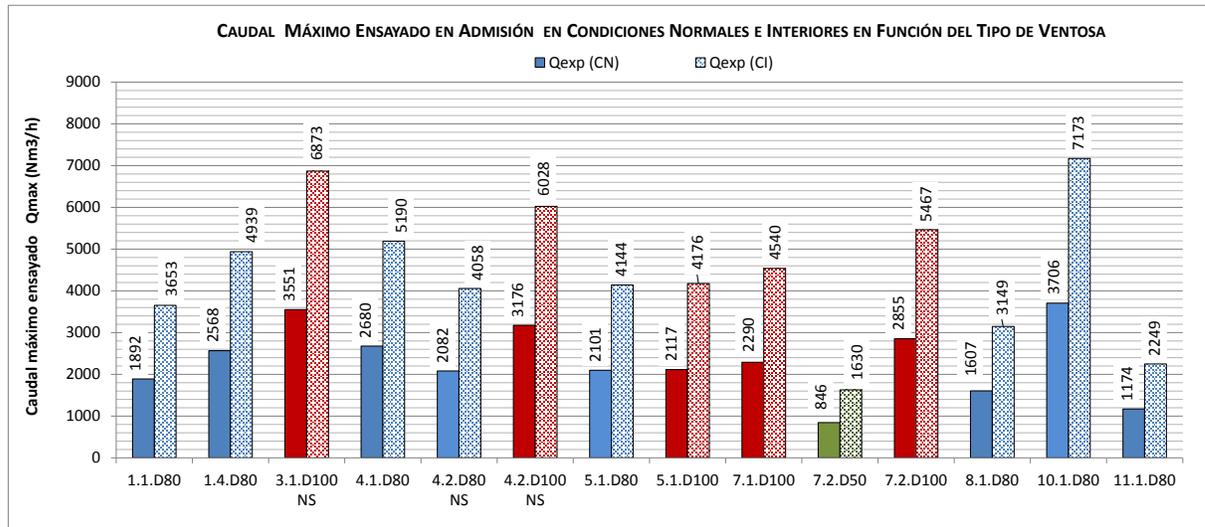


Figura 10 | Caudal máximo ensayado de ventosas en admisión en condiciones normales e interiores.

Se han obtenido los puntos característicos de las ventosas en admisión correspondientes a la presión y caudal experimental en CN y CI realizado una comparación con los valores de catálogo para un máximo de siete valores de presión entre -0.05 bar y el valor máximo ensayado, y se ha obtenido la desviación aritmética de forma porcentual, indicándose los resultados en la Tabla 3. Se ha clasificado la desviación en función de si se ha producido en una mayoría de los puntos analizados por defecto (caudal comercial mayor al experimental, $Q_c > Q_{exp}$) o por exceso ($Q_c < Q_{exp}$). Asimismo, en la Tabla 3 pueden compararse los caudales de admisión de las diferentes ventosas para cuatro valores de la depresión en el interior de la tubería, lo que permite poder clasificar las ventosas en función de su capacidad de admisión.

Tabla 3 | Puntos característicos de las ventosas en admisión.

| Ficha Nº | NS | DN | ADMISIÓN | | | | | | | | | | | | | | | DESVIACIÓN PROMEDIO | | |
|----------|----|-----|-----------------------|---------------------|-----------------------|---|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---|--|--|--------|------|
| | | | PUNTO MÁXIMO ENSAYADO | | | CAUDAL COMERCIAL (Q _c) Y EXPERIMENTAL (Q _{exp}) EN CN (Nm³/h) Y CI (m³/h) | | | | | | | | | | | | Q _c y Q _{exp} (CN) (%) | | |
| | | | P (bar) | Q _c (CN) | | Q _c (CI) | | -0.10bar | | -0.20bar | | -0.25bar | | -0.30bar | | Defecto Q _c > Q _{exp} | Exceso Q _c < Q _{exp} | | | |
| | | | | Q _c (CN) | Q _{exp} (CN) | Q _c (CI) | Q _{exp} (CI) | Q _c (CN) | Q _{exp} (CN) | Q _c (CI) | Q _{exp} (CI) | Q _c (CN) | Q _{exp} (CN) | Q _c (CI) | Q _{exp} (CI) | | | Nº | Nº | |
| 1.1.D80 | NO | 80 | -0.49 | -1500 | -1892 | -3653 | -600 | -905 | -1004 | -900 | -1318 | -1642 | -1000 | -1484 | -1970 | -1100 | -1635 | -2323 | 51.0% | 7 pt |
| 1.4.D80 | NO | 80 | -0.49 | - | -2568 | -4939 | -750 | -1065 | -1182 | -1300 | -1593 | -1984 | -1540 | -1806 | -2398 | -1750 | -2000 | -2841 | 34.7% | 6 pt |
| 3.1.D100 | SI | 100 | -0.49 | - | -3551 | -6873 | -1750 | -1174 | -1302 | -2500 | -1880 | -2342 | -2750 | -2171 | -2882 | -3000 | -2437 | -3462 | 28.2% | 6 pt |
| 4.1.D80 | NO | 80 | -0.49 | -1950 | -2680 | -5190 | -1200 | -1000 | -1109 | -1600 | -1562 | -1946 | -1720 | -1791 | -2378 | -1800 | -2000 | -2841 | 15.6% | 7 pt |
| 4.2.D80 | SI | 80 | -0.49 | -2100 | -2082 | -4058 | -1250 | -820 | -910 | -1700 | -1228 | -1530 | -1820 | -1394 | -1850 | -1900 | -1544 | -2193 | 25.2% | 7 pt |
| 4.2.D100 | SI | 100 | -0.48 | -3200 | -3176 | -6028 | -2000 | -1351 | -1499 | -2600 | -2000 | -2492 | -2825 | -2262 | -3004 | -3000 | -2500 | -3552 | 22.2% | 7 pt |
| 5.1.D80 | NO | 80 | -0.50 | - | -2101 | -4144 | -760 | -905 | -1004 | -1220 | -1318 | -1642 | -1400 | -1484 | -1970 | -1580 | -1635 | -2323 | 12.9% | 6 pt |
| 5.1.D100 | NO | 100 | -0.50 | - | -2117 | -4176 | -1050 | -1051 | -1166 | -1500 | -1465 | -1825 | -1700 | -1632 | -2166 | -1875 | -1783 | -2533 | 4.3% | 6 pt |
| 7.1.D100 | NO | 100 | -0.50 | - | -2290 | -4540 | -2725 | -1051 | -1166 | -3675 | -1465 | -1825 | -4075 | -1632 | -2166 | -4450 | -1783 | -2533 | 60.5% | 6 pt |
| 7.2.D50 | NO | 50 | -0.49 | - | -846 | -1630 | -520 | -333 | -370 | -730 | -500 | -623 | -800 | -568 | -753 | -860 | -629 | -893 | 30.1% | 6 pt |
| 7.2.D100 | NO | 100 | -0.48 | -4600 | -2855 | -5467 | -2100 | -1146 | -1271 | -3000 | -1722 | -2146 | -3325 | -1956 | -2597 | -3600 | -2168 | -3080 | 41.9% | 7 pt |
| 8.1.D80 | NO | 80 | -0.50 | -540 | -1607 | -3149 | -120 | -717 | -796 | -210 | -1010 | -1258 | -270 | -1128 | -1498 | -320 | -1235 | -1754 | 411.1% | 7 pt |
| 10.1.D80 | NO | 80 | -0.49 | -3750 | -3706 | -7173 | -1650 | -1728 | -1918 | -2300 | -2484 | -3095 | -2620 | -2788 | -3702 | -2900 | -3064 | -4353 | 9.1% | 7 pt |
| 11.1.D80 | NO | 80 | -0.48 | - | -1174 | -2249 | - | -486 | -539 | - | -723 | -900 | - | -818 | -1086 | - | -905 | -1286 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | 57.4% | | | |

La comparativa de valores de catálogo (comerciales) y experimentales presenta un promedio de desviación global de un 57.4%. La ventosa cuyos resultados son más aproximados a los comerciales es la 5.1.D100 (4.3 %) por defecto y la menos aproximada la 8.1.D80 (411.11%) por exceso. Cabe destacar que 8 de las 13 ventosas proporcionaron caudales inferiores a los comerciales (por defecto) con la mayor desviación del 60.5%. La elección de la ventosa pensando en que pueda admitir un caudal superior al que realmente admite, puede provocar problemas en la instalación al generarse en un vaciado depresiones mayores a las previstas. En el caso de las 5 ventosas que proporcionaron caudales mayores a los comerciales (por exceso), se presentaron mayores desviaciones, de hasta el 411.1%.

Ecuaciones modelizadas de las curvas experimentales de las ventosas.

Con objeto de realizar posteriores estudios con los resultados experimentales de cada ventosa en modelos matemáticos, se han obtenido las curvas modelizadas en expulsión y en admisión. En el caso de las ventosas NS se plantean dos ecuaciones, utilizándose una u otra según se haya alcanzado la presión a la que se produce el cierre del primer flotador. Partiendo de la ecuación modelizada de segundo orden del tipo indicado en la Ecuación (3), con el coeficiente de correlación R^2 , se ha obtenido la Ecuación (4) equivalente simplificada que permite ser utilizada con mayor sencillez en modelos de cálculo. El grado de fiabilidad respecto a los datos experimentales (el 100% supone coincidencia absoluta entre los valores de (4) y los resultados experimentales), también aparece en la Tabla 4. En el 90% de las ecuaciones la fiabilidad es superior al 90% y en el resto de casos, la baja fiabilidad se debe principalmente al pequeño número de datos experimentales disponibles o a su dispersión. Todas las ecuaciones obtenidas se indican en la Tabla 4.

$$P = a \cdot Q^2 + b \cdot Q \tag{3}$$

$$P = k \cdot Q^2 \tag{4}$$

donde P es la presión en bar y Q es el caudal en condiciones normales en Nm^3/h .

Tabla 4 | Ecuaciones modelizadas de las curvas de expulsión y admisión de las ventosas en condiciones normales.

| Ficha Nº | NS | DN | EXPULSIÓN (CIERRE PARCIAL 1º FLOTADOR VENTOSAS NS). | | | | | | EXPULSIÓN P (bar) y Q (Nm³/h) | | | | | | ADMISIÓN P (bar) y Q (Nm³/h) | | | | | |
|-----------|----|-----|---|-----------|-----------|-----------------------------------|----------------|----------|--|-----------|------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|--|------------------|----------------|-----------------------------------|--|--|
| | | | EC. MODELIZADA $P = a \cdot Q^2 + b \cdot Q$ | | | EC. EQUIVALENTE $P = k \cdot Q^2$ | | | EC. MODELIZADA $P = a \cdot Q^2 + b \cdot Q$ | | | EC. EQUIVALENTE $P = k \cdot Q^2$ | | | EC. MODELIZADA $P = a \cdot Q^2 + b \cdot Q$ | | | EC. EQUIVALENTE $P = k \cdot Q^2$ | | |
| | | | a | b | R^2 (%) | k (bar/(Nm³/h)²) | Fiabilidad (%) | a | b | R^2 (%) | k (bar/(Nm³/h)²) | Fiabilidad (%) | a | b | R^2 | k (bar/(Nm³/h)²) | Fiabilidad (%) | | | |
| 1.1.D80 | NO | 80 | | | | | | 8.14E-08 | 2.55E-05 | 99.91 | 1.04E-07 | 95.38% | -1.25E-07 | 2.24E-05 | 99.97 | -1.41E-07 | 99.27% | | | |
| 1.2.D80 | SI | 80 | 1.86E-07 | -2.87E-05 | 81.11 | 5.53E-08 | 84.10% | 7.96E-06 | 2.67E-06 | 99.95 | 7.98E-06 | 99.65% | | | | | | | | |
| 1.3.D100 | NO | 100 | | | | | | 1.60E-08 | 8.40E-06 | 99.86 | 1.90E-08 | 98.98% | | | | | | | | |
| 1.4.D80 | NO | 80 | | | | | | 4.23E-08 | 6.02E-05 | 98.46 | 7.40E-08 | 83.46% | -6.25E-08 | 2.97E-05 | 99.99 | -7.84E-08 | 98.98% | | | |
| 1.4.D100 | NO | 100 | | | | | | 3.71E-08 | 4.45E-06 | 99.77 | 3.97E-08 | 98.21% | | | | | | | | |
| 2.1.D80 | NO | 80 | | | | | | 2.16E-07 | 9.73E-06 | 99.98 | 2.31E-07 | 97.15% | | | | | | | | |
| 3.1.D100 | SI | 100 | 2.32E-08 | 3.85E-06 | 98.91 | 2.67E-08 | 98.12% | 2.52E-06 | 0.00152 | 96.93 | 7.11E-06 | 99.91% | -3.33E-08 | 2.00E-05 | 100.00 | -4.08E-08 | 99.00% | | | |
| 4.1.D80 | NO | 80 | | | | | | 7.50E-08 | -1.75E-05 | 99.66 | 6.46E-08 | 96.16% | -5.17E-08 | 4.55E-05 | 99.97 | -7.35E-08 | 99.33% | | | |
| 4.1.D100 | NO | 100 | | | | | | 2.34E-08 | 9.74E-06 | 99.78 | 3.10E-08 | 99.84% | | | | | | | | |
| 4.2.D80 | SI | 80 | 2.07E-07 | -3.50E-05 | 94.54 | 5.00E-08 | 72.98% | 2.00E-05 | -3.12E-04 | 99.83 | 1.78E-05 | 94.59% | -9.70E-08 | 4.42E-05 | 99.97 | -1.27E-07 | 98.99% | | | |
| 4.2.D100 | SI | 100 | 3.67E-08 | -1.27E-06 | 99.27 | 3.49E-08 | 97.41% | 5.07E-06 | 3.19E-04 | 99.99 | 6.41E-06 | 97.63% | -4.21E-08 | 1.77E-05 | 99.98 | -4.97E-08 | 99.40% | | | |
| 5.1.D80 | NO | 80 | | | | | | 1.65E-07 | -4.33E-06 | 99.66 | 1.58E-07 | 99.74% | -1.04E-07 | 2.16E-05 | 99.98 | -1.18E-07 | 99.50% | | | |
| 5.1.D100 | NO | 100 | | | | | | 9.50E-08 | 9.53E-06 | 99.37 | 1.05E-07 | 99.12% | -1.17E-07 | -1.16E-05 | 99.99 | -1.10E-07 | 99.39% | | | |
| 6.1.D80 | NO | 80 | | | | | | 7.21E-07 | -1.32E-04 | 96.72 | 4.68E-07 | 63.70% | | | | | | | | |
| 6.1.D100 | NO | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.1.D80 | NO | 80 | | | | | | 5.62E-08 | 1.68E-07 | 99.93 | 5.66E-08 | 96.85% | | | | | | | | |
| 7.1.D100 | NO | 100 | | | | | | 1.85E-08 | 2.81E-06 | 99.93 | 1.99E-08 | 98.70% | -1.00E-07 | -1.08E-05 | 99.96 | -9.40E-08 | 99.13% | | | |
| 7.2.D50 | NO | 50 | | | | | | 5.02E-07 | 1.58E-04 | 99.86 | 7.67E-07 | 98.45% | -5.62E-07 | 1.06E-04 | 99.95 | -7.34E-07 | 99.14% | | | |
| 7.2.D100 | NO | 100 | | | | | | 1.86E-08 | 4.96E-05 | 99.76 | 3.25E-08 | 99.91% | -5.05E-08 | 2.69E-05 | 99.94 | -6.35E-08 | 99.39% | | | |
| 8.1.D80 | NO | 80 | | | | | | 2.03E-05 | 2.62E-04 | 99.97 | 2.24E-05 | 99.79% | -1.96E-07 | -3.52E-06 | 99.94 | -1.93E-07 | 99.22% | | | |
| 8.1.D150 | NO | 150 | | | | | | 2.26E-07 | 9.42E-05 | 99.89 | 3.19E-07 | 98.30% | | | | | | | | |
| 9.1.D80 | SI | 80 | 3.39E-07 | -4.97E-05 | 98.78 | 1.96E-07 | 88.40% | 1.03E-06 | 5.72E-04 | 91.32 | 2.72E-06 | 97.47% | | | | | | | | |
| 9.1.D100 | SI | 100 | 1.40E-07 | -3.15E-05 | 99.08 | 8.17E-08 | 91.99% | 2.11E-06 | 4.55E-04 | 95.15 | 3.65E-06 | 91.47% | | | | | | | | |
| 10.1.D80 | NO | 80 | | | | | | 1.94E-08 | 6.09E-07 | 99.92 | 2.06E-08 | 95.34% | -3.27E-08 | 5.93E-06 | 99.49 | -3.48E-08 | 98.69% | | | |
| 10.1.D100 | NO | 100 | | | | | | 9.42E-09 | 1.33E-05 | 99.92 | 1.21E-08 | 97.67% | | | | | | | | |
| 10.2.D80 | NO | 80 | | | | | | 8.84E-08 | 5.92E-06 | 99.97 | 9.74E-08 | 96.91% | | | | | | | | |
| 11.1.D80 | NO | 80 | | | | | | 4.08E-07 | 1.59E-06 | 99.72 | 4.16E-07 | 99.83% | -3.02E-07 | 6.14E-05 | 99.96 | -3.73E-07 | 99.34% | | | |
| 11.1.D100 | NO | 100 | | | | | | 9.53E-08 | 4.21E-05 | 100.00 | 1.66E-07 | 99.91% | | | | | | | | |
| 12.1.D80 | NO | 80 | | | | | | 2.35E-07 | 9.81E-05 | 99.863 | 3.24E-07 | 97.94% | | | | | | | | |

CONCLUSIONES

En general, los ensayos realizados han resultado satisfactorios, si bien sería deseable poder repetir algunos de ellos. De hecho, está previsto realizar una estancia en el laboratorio de ensayo de Bermad, en Israel. Sería asimismo deseable poder determinar de una manera más precisa el umbral de presión a partir del cual el flotador efectúa un cierre dinámico o, en las ventosas NS, el valor de la presión a la que se produce el cierre del primer flotador.

Para las pruebas de admisión, en ambos laboratorios las condiciones termodinámicas del ensayo no fueron las idóneas, al no poder trabajar en aspiración (generando depresión en el interior de la tubería). Los ensayos se realizaron de la manera más adecuada con los medios disponible (admitidos, eso sí, por las normas UNE-EN 1074-4 e ISO 9635-4), si bien desconocemos si existen bancos para poder realizar tales ensayos con ventosas de esta capacidad en admisión.

Es muy importante determinar el valor de la presión en el interior de la tubería al que se produce el cierre dinámico de la ventosa, dado que a partir de ese momento la ventosa deja de realizar su función. En bastantes casos los valores de la presión de cierre dinámico eran muy pequeños, por lo que casi con toda seguridad se cerrarán en casi cualquier llenado, dejando bolsas de aire en el interior de la tubería. Los valores límite de la presión de ensayo en ambos laboratorios, 1 bar en ARI y 0.5 bar en CSA, están por encima de los valores de la presión del aire usual en los procesos de llenado (entre 1 y 3 mca), por lo que para situaciones de llenado usuales se han detectado aquellas ventosas que tiene un cierre dinámico a las presiones de trabajo normales. Sería deseable que los fabricantes indicaran en los catálogos el valor umbral de la presión en el interior de la tubería al que la ventosa cierra de manera prematura. Para próximas revisiones de las normativas de ventosas, tanto UNE-EN como ISO, sería recomendable proponer incluir este ensayo en las citadas normativas.

También sería deseable conocer el valor de la presión a la que sube el primer flotador en las ventosas NS (antiariete). En general se trata de valores excesivamente bajos, por lo que en la práctica las ventosas se transforman en válvulas de muy poca capacidad de expulsión, ralentizando en exceso las operaciones de llenado. No obstante, puede ser interesante su utilización como última ventosa en cerrar durante un proceso de llenado (punto más elevado de una conducción en la que hay instaladas varias ventosas). En los catálogos, los fabricantes si suelen incluir estos valores dado que presenta representan la curva P-Q de la ventosa desde presión nula.

En algunas ventosas es posible regular el coeficiente de descarga, desplazando la curva Presión-Caudal para que se generen más pérdidas de carga, de manera que se pueda reducir su capacidad de expulsión. Y en algunos modelos de ventosa antiariete o NS, es posible modificar el valor de la presión a la cual cierra el primer flotador. Todo ello resulta interesante para los usuarios a fin de adecuar el funcionamiento del dispositivo a las condiciones del sistema.

Las ventosas en expulsión en las que se produjo un cierre dinámico fueron 11 de las 29 ensayadas. Esto condiciona la presión máxima de trabajo en las operaciones de llenado. Se observa desde la de menor presión (modelo 10.1.D80 a 0.02 bar y 1012 m³/h en CI) hasta la de mayor presión (modelo 10.1.D100 a 0.91 bar y 4835 m³/h en CI).

La comparativa de resultados comerciales y experimentales en las curvas de expulsión en condiciones normales presenta un promedio de desviación de un 19.9%. La ventosa cuyos resultados son más aproximados a la comercial es la de 1.1.D80 (3.0 %) y la menos aproximada la 8.1.D80 (62 %).

La comparativa de resultados comerciales y experimentales en las curvas de admisión presenta un promedio de desviación global de un 57.4 %. La ventosa cuyos resultados son más aproximados a los comerciales es la 10.1.D80 (9.1 %) y la menos aproximada la 8.1.D80 (411.11 %).

Las ventosas en las que el caudal de expulsión ensayado ha resultado inferior al comercial para los mismos valores de presión, sin producirse cierre dinámico en el intervalo ensayado, han sido seis con una desviación entre 10.2 y 62 %. Y en el caso del ensayo de admisión las ventosas en las que el caudal ensayado ha resultado inferior al comercial para los mismos valores de presión fueron ocho con una desviación promedio entre el 4.3% y el 41.9 % entre la curva comercial y la experimental en condiciones normales.

En la mayoría de los catálogos, los fabricantes no hacen referencia ni a la forma en la que se han realizado los ensayos para determinar la curva P-Q que presentan en sus catálogos, ni a los laboratorios en los que se han llevado a cabo los ensayos.

Tampoco se referencian las normas UNE-EN 1074-1 y/o ISO 9635-4. Cabe pensar, dadas las desviaciones encontradas, que en algunos casos los ensayos no se han llevado a cabo o que se han hecho de una forma no adecuada.

Cabe pues indicar que en el tema de las ventosas aún hay un camino por recorrer, para ello, ayudaría mucho el que los fabricantes certificaran sus ventosas con arreglo a normas, para que en los catálogos los datos técnicos presentados fueran lo más fiables posible. Asimismo, además de la curva P-Q, sería deseable que aparecieran también los valores de la presión máxima para no producir cierre dinámico y de la presión a la que sube el primer flotador en las ventosas NS.

En cualquier caso, pensamos que el presente trabajo puede ayudar a mejorar el conocimiento del comportamiento de las ventosas existentes en el mercado, con el fin de contar con datos técnicos que ayuden a la elección de la ventosa más adecuada para realizar las operaciones de llenado y vaciado.

Los resultados obtenidos son fundamentales para aumentar la precisión de los modelos matemáticos de simulación de las operaciones de llenado y vaciado de conducciones, dado que la ventosa es uno de los elementos principales que interviene en estos procesos.

AGRADECIMIENTOS

La caracterización de ventosas a desarrollar en este artículo forma parte de un Contrato de Investigación y Desarrollo firmado entre la empresa Global Omnium y la Universitat Politècnica de València, para elaborar un protocolo para el llenado y vaciado de grandes conducciones.

REFERENCIAS

- AENOR (Asociación Española de Normalización). 2001. *UNE-EN 1074-4. Válvulas para el suministro de agua. Requisitos de aptitud al uso y ensayos de verificación. Parte 4: Purgadoras y ventosas.*
- Abreu, J., Cabrera, E., Espert, V.B., García-Serra, J., Sanz, F. 2012. *Transitorios Hidráulicos. Del régimen estacionario al golpe de ariete.* Editorial UPV. Valencia.
- Arregui, F., García-Serra, J., Kruisbrink, A.C.H., Cabrera, E., Fuertes, V.S., Palau, C.V., Gascón, L. 2003. Air valve dynamic behaviour. *Pumps, electromechanical devices and systems applied to urban water management, PEDS 2003.* 623-632. Abril 2003. Valencia
- Phu D. Tran, 2017. Pressure Transients Caused by Air-Valve Closure while Filling Pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering ASC E. Vol 143, Issue 2.* DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001245.
- International Organization for Standardization, 2014. *ISO 9635-4:2014 Agricultural irrigation equipment -- Irrigation valves -- Part 4: Air valves*