

Explicación básica del efecto de la compresión del aire en una tubería estanca sometida a presión

Conocimiento para evitar accidentes en la manipulación de tuberías de agua a presión

Javier Elizondo Osés, experto en redes de agua



Por mucho que se hayan editado, a través del tiempo, innumerables documentaciones en relación con el aire en las tuberías de agua a presión, y la imperiosa necesidad de diseñar y construir con las pautas debidas para lograr tanto su extracción como su aducción en cualquier momento del funcionamiento del sistema de redes e instalaciones, o por cualquier necesidad de operación, es constatable que sigue siendo la variable menos conocida del sistema. No solo por los niveles de dirección, diseño y construcción, sino también a cualquier nivel de operación y mantenimiento, una vez el sistema entra en servicio, con el correspondiente riesgo respecto a fallos en los suministros, como a la merma de la vida útil de ese sistema. Riesgos menores en su importancia respecto al propio riesgo de las personas que operan en él. Es en base a este riesgo de los operarios, por desconocimiento (falta de formación adecuada, principalmente), que este artículo trata de dar unas pinceladas realistas basadas en pruebas específicas para evitar cualquier tipo de incidente o accidente.



Las consideraciones teóricas están soportadas en una prueba real, recreando un incidente de desplazamiento de un tapón (brida enchufe y brida ciega) en una tubería de derivación de DN200FN, en fondo de saco (cerrada en un extremo), cuando se realizaban las tareas de retirada del contrarresto, sin haber despresurizado la tubería (procedieron, exclusivamente, a cerrar la válvula de seccionamiento de la tubería indicada, con objeto de retirar el tapón, para continuar la red en una nueva obra).

Antes de pasar a comentar la recreación indicada anteriormente (la cual puede efectuarse sin problemas, para la optimización de la formación a los operarios), y con objeto de entender claramente lo que en ella se explica, es necesario exponer unos fundamentos físicos básicos para su comprensión.

FUNDAMENTOS BÁSICOS

Todos los fluidos son compresibles, incluyendo los líquidos

En líneas generales se considera como fluido compresible el que muestra una variación significativa de la densidad como resultado de su flujo, y esto sucede cuando la velocidad del flujo es cercana a la velocidad del sonido (por eso es posible evacuar grandes volúmenes de aire en mínimo tiempo por pequeños orificios -de mm- como es el caso de los purgadores, cuestión que no se desarrolla aquí ahora). Por tanto, la compresibilidad viene a ser una medida en el cambio de la densidad del fluido.

Para alcanzar esas velocidades de flujo en los líquidos, se tendrían que generar presiones del orden de las 1.000 atmósferas (que se pueden trasladar en términos generales a la misma dimensión en kg/cm² o bares -bar-, unidades de presión a las que suelen estar más acostumbrados los operadores del sistema). Sin embargo, en los gases (y el aire es un gas), se obtendrían velocidades sónicas con relaciones de presiones de 2:1.

La energía no se crea ni se destruye, se transforma

La primera ley de la termodinámica establece que "al variar la energía interna en un sistema cerrado, se produce calor y un trabajo". Por tanto, en el caso de aire confinado en el interior de una tubería, existirá siempre una variación de energía interna determinada por el desplazamiento de la bolsa de aire (gas), al comprimirse por efecto de la presión del sistema exterior (agua que entra en el conducto cerrado).

Ley de gases

La ley de los gases establece que:

$$P * V = n * R * T$$

donde:

- P = presión absoluta en atmósferas (atm).
- V = volumen aire (gas) en litros.
- n = moles de gas.
- R = constante universal de los gases ideales (R = 0,082 atm*litro/ mol*°K).
- T = temperatura absoluta en grados Kelvin (°K).

Como esta ley se cumple en cada estado (posición), se tendrá un equilibrio entre la situación inicial del gas y el estado final, por lo que $P_1 * V_1 = P_2 * V_2$, y siempre se cumple que cuando en un sistema cerrado se ejerce una fuerza de compresión a través de un pistón o émbolo, la presión que ejerce el gas sobre las paredes del recipiente en el que se encuentra es igual a la presión que ejerce el pistón sobre el propio gas.

RECREACIÓN DE LAS CONDICIONES REALES

Como se observa en la **Figura 1** en relación a la recreación real:

- El recipiente va a ser la tubería estanca y taponada.
- El 'pistón' será el agua que comprime el aire existente dentro de la tubería, por lo que:
 - La tubería, en el momento previo a su llenado tras ser construida, estaba vacía -llena de aire-; al comenzar a llenarla en su día, abriendo la correspondiente válvula, se produjo el empuje del agua sobre el aire existente en el interior; empuje de-

FIGURA 1. Simulación de las condiciones en red.



sarrollado por la presión exterior existente en la tubería principal de la cual derivaba.

- En la prueba se recrea lo mismo: se instala la tubería taponada, y luego se abre para llenarla de agua. La presión del sistema exterior (red de la cual deriva) se obtiene a través de alimentación directa presurizando y manteniendo al valor real que se tenía en la red que se recrea (6 kg/cm^2).
- El contrarresto que existía, se simula a través de la oposición de una carretilla. De este modo, se recrea la retirada del contrarresto de modo rápido, evitando cualquier tipo de riesgo.
- La pendiente real de la tubería (instalada en un vial con esa pendiente), se recrea calzando la tubería.
- En la zona superior de la tubería (extremo contrarrestado) se coloca una toma en carga, para instalar un manómetro. Este queda, por tanto, en contacto directo con la bolsa de aire comprimido. Asimismo, se coloca otro manómetro en el punto de derivación de la tubería (zona de conexión con el sistema a la presión indicada -6 kg/cm^2).

Lo primero a verificar, observando los manómetros instalados, es la certeza de la indicación teórica comentada anteriormente, en relación a la realidad que se observa: la presión del aire (bolsa comprimida por el agua) sobre las paredes interiores de la tubería es idéntica a la presión del agua que la comprime (**Figura 2**). Ello se puede observar en el reflejo de ambos manómetros instalados (la medida corresponde a la fase de compresión, con un valor menor al final que se recrea -6 kg/cm^2).

CONSIDERACIONES DE LO QUE SUCEDE EN EL MOMENTO EN QUE SE CONECTA LA TUBERÍA AL SISTEMA

A considerar:

- Cuando se instalan las tuberías, se instalan -lógicamente- vacías y, por lo tanto, el sistema final está lleno de aire. En el caso que ocupa, estará llena de aire toda la tubería hasta el tapón instalado en el extremo, al cual se le instala un contrarresto (anclaje) para que aguante el empuje que ejercerá la presión interior cuando el sistema se ponga en carga (esté a presión). Este contrarresto se calcula para una presión mucho mayor que la de servicio -golpe ariete, etc.-, pero lo que se recrea es el empuje para esa presión de servicio -6 kg/cm^2 - que ejerce sobre una superficie correspondiente a la tubería

FIGURA 2. Contraste de presiones reales durante la prueba.



de, aproximadamente, diámetro interior 200 mm, que viene a ser de unos 1.880 kg.

- Cuando se abre la válvula para comenzar el llenado de la tubería, el agua empieza a introducirse ocupando un espacio que antes estaba ocupado por el aire. Es decir, viene a ser como un émbolo que empieza a empujar el volumen de aire existente, a través de la energía que le da la presión del sistema de red. Como la tubería no tiene ningún punto por el cual pueda escapar el aire, se recrea un sistema que obliga a un desplazamiento de ese volumen de aire, hasta quedar comprimido en el punto alto existente. Así, la presión interior en la tubería, antes de iniciar la operación de llenado, es, lógicamente, menor que la presión que se tiene en el momento en que se pone en contacto con el sistema de red en carga. Por tanto, al abrir la válvula se rompe el equilibrio del sistema existente, al meter una fuente de energía externa, que se tendrá que traducir en 'algo' (conservación de la energía). Ese 'algo' es el desplazamiento motivado por un empuje (la fuerza generada por la presión de entrada al sistema), lo que se entiende una fuerza (empuje) por una longitud (desplazamiento), que no es otra cosa que un trabajo (energía, $W = F \cdot L$).

- El equilibrio final del sistema llegará cuando el desplazamiento de la 'bolsa de aire' termine. Es decir, cuando la energía de presión existente sea equilibrada por la propia 'bolsa de aire' que impide que le comprima más. Entonces, el sistema estará formado por una tubería con agua a presión en todo su volumen interior, salvo la zona correspondiente al volumen de aire comprimido, que habrá pasado a un volumen mucho menor, y que no se reduce más (comprime más) porque su energía interna está contrarrestando la de la presión existente. Es decir, que todo ese trabajo-energía generado por el desplazamiento que se ha producido (reducción del vo-



FIGURA 3. Desplazamiento final del tapón de la tubería, sin contrarresto.



lumen de aire inicial) tiene que estar en la propia 'bolsa de aire' que ha quedado. Vendría a ser lo que se puede denominar como una energía de compresión. Así, la presión interior en el sistema de la tubería es la misma que en el sistema de red (6 kg/cm^2), pero se le ha añadido (al meterla desde el exterior) una energía suplementaria de compresión que queda en equilibrio. Es el mismo principio de funcionamiento que en cualquier recipiente de un grupo de presión, con un gas entre la membrana elástica y la carcasa metálica del recipiente: la presión de bombeo, incorporada al recipiente -en derivación con la impulsión- comprime la membrana, y esta al gas existente, reduciendo su volumen (gana energía interna). Cuando para la bomba y la presión cae por debajo de la del gas, este se expande (descomprime), liberando la energía necesaria para empujar el agua, a través del empuje sobre la membrana elástica, y que siga llegando donde debe.

CONSIDERACIONES DE LO QUE SUCEDE EN EL MOMENTO EN QUE QUITAN EL CONTRARRESTO SIN DESPRESURIZAR LA TUBERÍA PREVIAMENTE

En el momento en que se le quita el contrarresto al tapón final, se anula la fuerza que se oponía al empuje interior de la presión existente (6 kg/cm^2). Esta fuerza comienza a vencer el peso del sistema de tapón (BE y brida ciega), más la fuerza derivada del esfuerzo de compresión de la junta del BE sobre el tubo, y se inicia un desplazamiento.

En el momento en que comienza el mínimo desplazamiento, el volumen de la 'bolsa de aire' interior se incrementa (nuevo desplazamiento => nuevo trabajo)

y cede energía al sistema. Es decir, la bolsa de aire al descomprimirse traslada energía al sistema exterior, lo que se traduce en un incremento del empuje sobre el tapón, generando un desplazamiento a mayor velocidad a medida que se descomprime. En el momento en que la pieza de tapón pierde el contacto con el extremo del tubo, toda la energía restante se traduce en el desplazamiento del tapón por el aire, tal y como se recrea en la prueba (**Figura 3**). Al salir desplazado el tapón, el sonido que se escucha es el correspondiente a la descompresión final y salida instantánea del aire (un 'cañonazo' en la práctica).

Un ejemplo similar, de andar por casa, es la compresión del gas en una botella de champán y el efecto sobre el corcho una vez se quita el elemento de contrarresto (alambre y precinto) y llega a vencer la fuerza de oposición que genera el corcho -con su forma- en el cuello de la botella. Observando la 'fuerza' desarrollada por el tapón, es posible hacerse una idea clara de lo que supone un sistema como el comentado.

NOTAS DE INTERÉS QUE REFUERZAN EL CONOCIMIENTO SOBRE LO OBSERVADO

Debe tenerse en cuenta que:

- Si una tubería queda instalada horizontalmente (a evitar en todo momento, pues no habría forma de extraer el aire de modo normal), el volumen de aire comprimido se hubiese desplazado ocupando la parte superior de la tubería, por lo que el desplazamiento hubiese sido menor y, por lo tanto, su energía de desplazamiento mucho más reducida. Esto se hubiese traducido en un efecto mínimo en el desplazamiento del tapón, en comparación con lo observado, con la tubería instalada en pendiente, y el taponado en el punto alto.

- A mayor pendiente de tubería, mayor será la velocidad de desplazamiento del tapón y, por tanto, su alcance. La cuantía dependerá del ángulo al que se sitúe la tubería (pendiente de instalación), llegando más lejos horizontalmente con un ángulo de 45° , y más alto con una salida vertical (ángulo de 90°).

- Si la tubería hubiese sido purgada en su momento (por ejemplo si se ha dejado llenar de agua, saliendo el aire por un orificio superior de la brida ciega), se tiene que:

- Quitado el contrarresto, tras cerrar la válvula de seccionamiento, sin despresurizar la tubería, el desplazamiento del tapón hubiese sido mínimo, ya que el interior se hubiese despresurizado sobre la longitud ganada.

» El fundamento principal en cualquier operación sobre una red/instalación de agua no solo debe residir en cerrar la válvula de paso de agua, sino en asegurar que el sistema se encuentre despresurizado

- Quitado el contrarresto, sin cerrar la válvula de seccionamiento (tubería bajo presión), el desplazamiento del tapón se verifica, aunque con un alcance mucho menor que de existir aire comprimido en su interior. Porque el agua no se comprime y, por tanto, no existe una energía de desplazamiento ganada al introducir el agua a presión, por cuanto al no existir aire en el interior, no ha existido esa compresión-reducción de volumen. Es decir, no ha existido trabajo-energía incorporada al sistema y, por tanto, no existe descompresión-conversión de energía interna derivada en empuje contra el tapón, cuando se retira el contrarresto. En este caso de actuación con válvula abierta, una vez desplazado el tapón, la salida de agua produce un rápido anegamiento del pozo donde estén los operarios, con posibles resultados críticos (Figura 4).

$$\text{Presión} = 6 \text{ kg/cm}^2 = 60 \text{ mca}$$

$$\text{Velocidad teórica máxima de salida} = (2 \cdot g \cdot h)^{1/2} = (2 \cdot 9,81 \cdot 60)^{1/2} = 34,31 \text{ m/s}$$

$$Q \text{ (caudal)} = S \text{ (sección tubo 200)} \cdot v \text{ (velocidad)} \cdot 0,60 \text{ (coeficiente reducción)} = 0,0314 \text{ m}^2 \cdot 34,31 \text{ m/s} \cdot 0,60 = 0,65 \text{ m}^3/\text{s} = 650 \text{ l/s}$$

Por supuesto, esas velocidades no se van a generar, por cuanto la presión en el punto de salida se vería reducida ostensiblemente por las pérdidas de carga

del sistema y, por lo tanto, los caudales reales serían mucho menores, pero sirve como ejemplo de las consecuencias que pueden generarse.

- Se observará salir 'humo' por la boca del extremo de la tubería, como consecuencia de los efectos de la compresión (incremento de temperatura del gas) y los 'roces' (velocidad) de la descompresión (Figura 5).

CONCLUSIÓN

El fundamento principal en cualquier operación sobre una red/instalación de agua no solo debe residir en cerrar la válvula de paso de agua, sino en asegurarnos que el sistema se encuentre despresurizado. En el ejemplo recreado, se puede verificar con un simple taladro, de dimensiones mínimas, en la zona más próxima a la pieza brida-enchufe (BE) del tapón. No solo se asegura la despresurización, sino que se verifica si la válvula que se ha cerrado es completamente estanca, evitando sorpresas que deriven en afecciones de cortes de suministro más amplios, sin aviso previo.

También debe tenerse en cuenta la influencia de las bolsas de aire sin extraer en el fenómeno del golpe de ariete. Se ha comprobado que una bolsa de aire confinada dentro de una tubería, en situación de reposo, no va a ejercer sobre las paredes interiores de la tubería una presión mayor que la existente en el sistema. En esta condición de reposo (aire acumulado en un punto alto real -PAR- o ficticio -PAF-) se genera una pérdida

FIGURA 4. Desplazamiento con tubería purgada en inicio.



FIGURA 5. Disipación de calor en la descompresión.



FIGURA 6. Rotura de la tubería por efecto del golpe de ariete.



de sección útil y, por tanto, una pérdida de carga que deriva en una menor capacidad hidráulica del sistema. Puede llegar a ocasionar obstrucciones muy relevantes al paso de agua (e incluso su impedimento), en un PAR, ante el fallo del elemento de purga automática si el empuje del agua no es capaz de vencer el paso por ese punto.

Si se tiene una bolsa de aire interior y se produce el fenómeno denominado golpe de ariete (ondas de presión-depresión ocasionadas por una perturbación dentro del sistema, como pueden ser, por ejemplo, arranques y paradas de bombas o manipulaciones en cierres), se producirán desplazamientos de la bolsa de aire por los efectos de compresión y descompresión generados por esas ondas. En estas condiciones, las paredes interiores de las tuberías van a soportar el incremento de presión generado, más los efectos de la energía de descompresión de la bolsa cuando la onda retrocede, lo que acentúa el esfuerzo-empuje sobre ellas y ayuda a la generación del inicio de la rotura. En el momento en que empiece a producirse, el aire se descomprime a través de ella y la energía interior de la bolsa se libera, acentuando-acelerando la rotura completa (**Figura 6**). Se puede saber que la rotura se debe a la acumulación de aire sin extraer cuando se observe que se ha producido en la clave superior del tubo.

Por último, una bolsa de aire en desplazamiento actuará como un elemento de estrangulación instantánea del paso en el momento en que sea frenada al quedar atrapada en un punto alto, originando por sí misma el golpe de ariete. 🌊



AGITADORES INDUSTRIALES



DOSIFICACIÓN DE REACTIVOS



EQUIPOS DE PREPARACIÓN DE POLIELECTROLITO



DOSIFICACIÓN DE PRODUCTOS EN POLVO O GRANULADOS



VÁLVULAS DE MANGUITO



BOMBAS NEUMÁTICAS DE DOBLE MEMBRANA



BOMBAS DOSIFICADORAS



BOMBAS CENTRÍFUGAS

