

# **USO DE LAS VÁLVULAS “DUCKBILL” PARA MANTENER LA EFICIENCIA DE DIFUSORES DE EMISARIOS SUBMARINOS**

**Autores: Michael J. Duer y Henry J. Salas**

**Michael J. Duer  
Red Valve Company, Inc.  
700 North Bell Avenue  
Pittsburgh, Pennsylvania 15106, U.S.A.  
Teléfono (1) 412 279-0044, fax (1) 412 279-7878  
Correo electrónico: mikeduer@aol.com**

**Henry J. Salas  
Organización Panamericana de la Salud  
Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente  
(CEPIS/HEP/OPS)  
Casilla Postal 4337, Lima 100, Perú  
Los Pinos 259, Urbanización Camacho  
Lima 12, Perú  
Teléfono (51-1) 437-1077, fax (51-1) 437-8289  
Correo electrónico: hsalas@cepis.org.pe**

**PALABRAS CLAVE**

**Emisario submarino, difusor, intrusión,  
hidráulica, válvula “Duckbill”**

## RESUMEN

Las válvulas elastoméricas "Duckbill" se usan en la descarga de efluentes por medio de difusores para prevenir el ingreso de agua salinas y sedimentos y para mejorar la hidráulica interior de los emisarios submarinos. Los difusores convencionales incorporan orificios fijos que no pueden prevenir tal ingreso. Muchos emisarios submarinos en el mundo adolecen de capacidad hidráulica y eficiencia de dilución reducidas debido a que el agua salina y el sedimento ocupan una porción de la tubería del emisario submarino. El costo de evacuar el sedimento de la tubería puede ser significativo, costando a menudo miles a millones de dólares estadounidenses para emisarios submarinos grandes. El costo se multiplica si los mecanismos de ingreso reaparecieran.

Este documento presenta las mejoras prácticas, hidráulicas y de dilución de los difusores con orificios múltiples que incorporan las válvulas "Duckbill". En la introducción, se discuten los mecanismos que dan lugar al ingreso de aguas salinas y sedimentos en los difusores convencionales. Se presenta un estudio de caso de un emisario submarino largo de 1500 metros en Vina del Mar, Chile que incorpora veinte válvulas "Duckbill" de 250 mm.

## PALABRAS CLAVE

Emisario submarino, difusor, intrusión, hidráulica, válvula "Duckbill"

## INTRODUCCIÓN

Los difusores de orificios múltiples se colocan comúnmente al final de los emisarios submarinos para mejorar sustancialmente la mezcla y dilución del efluente con el cuerpo de agua receptor al dispersar las aguas residuales sobre una área amplia. Tres metas primarias del diseño de emisarios submarinos son: 1) poder descargar los flujos máximos con la carga hidráulica disponible, 2) obtener una dilución inicial mínima para cumplir con los criterios de calidad del agua establecidos por los organismos reguladores y para proteger las playas y las costas vecinas de las concentraciones bacterianas altas y 3) mantener la eficiencia hidráulica y de dilución a largo plazo, previniendo el ingreso de aguas salinas y sedimentos en el emisario submarino.

Los difusores de orificios múltiples convencionales incorporan una serie de orificios de diámetro fijo, en forma de perforaciones o extensiones, que se ubican a lo largo del eje longitudinal del emisario submarino. El problema asociado con difusores convencionales es que los emisarios submarinos están expuestos a severas condiciones ambientales tales como olas altas, corrientes fuertes y el transporte de sedimentos. Estos efectos en combinación con una amplia variación de efluentes, a menudo en una magnitud de 10:1, frecuentemente resultan en la intrusión de aguas salinas y sedimento en el emisario submarino.

## MECANISMOS DE INGRESO

### INGRESO DE AGUAS SALINAS

El agua salina ocupa generalmente el emisario submarino antes de su puesta en operación y puede ingresar en el emisario submarino durante su operación si el flujo de la planta es bajo. Puesto que el agua salina es típicamente dos por ciento más pesada que el efluente, ingresará en los orificios del difusor cuando el número desimétrico de Froude del orificio, Ecuación 1, descienda por debajo de la unidad (Charlton, *et.al.*, 1987).

$$F = \frac{V_j}{\sqrt{g'd}} \quad (1)$$

donde:  $V_j$  = velocidad de la salida del chorro;  $g' = (\Delta\rho/\rho)g$ ,  $\Delta\rho = \rho_a - \rho$ ,  $\rho_a$  = densidad de aguas salinas,  $\rho$  = densidad del efluente, y  $d$  = diámetro del orificio.

Para los emisarios submarinos sobre el lecho del mar, las aguas salinas ingresarán sigilosamente en el emisario submarino a través de los orificios y una cuña salina se desarrollará en el fondo de la tubería. La cuña seguirá moviéndose en dirección a la costa hasta que el flujo del efluente sea suficiente para prevenir su progresión adicional.

Para los emisarios submarinos enterrados y de túneles, las aguas salinas ingresarán sigilosamente en la sección horizontal de la extensión y, si el flujo del efluente sigue descendiendo, entrará en la sección vertical. El flujo de aguas salinas aumentará a lo largo de la extensión y con el tiempo detendrá el flujo del efluente. El agua salina seguirá ocupando el túnel y las extensiones en dirección hacia la costa hasta que el flujo del efluente sea suficiente para prevenir la progresión adicional de la cuña de aguas salinas.

Cuando un emisario submarino sobre el lecho del mar o enterrado es ocupado parcialmente con aguas salinas, se desarrolla una circulación de estado permanente inducida por la densidad mediante la cual el agua salina entra a las extensiones aguas abajo mientras el efluente, o una mezcla de efluente y aguas salinas, se descarga aguas arriba (Charlton, *et al.*, 1987). Esto puede conducir a una dilución sustancialmente inferior porque la longitud efectiva del difusor se reduce y la descarga ya no es un efluente tratado, sino una mezcla del efluente y de aguas salinas. Las inquietudes adicionales por el ingreso de aguas salinas son que pueden introducir sedimentos en el difusor, desarrollar crecimientos marinos y aumentar la floculación de las partículas del efluente, que desarrollan agregados más grandes que tienen velocidades mayores de sedimentación (Larsen, 1994).

## **INGRESO DE SEDIMENTOS**

Los sedimentos pueden ingresar al emisario submarino en numerosas maneras como resultado de factores ambientales y actividades realizadas por el hombre.

### **Daño físico**

Los sedimentos pueden ingresar en la tubería del emisario submarino si las extensiones o la misma tubería del emisario submarino se dañaran. Las extensiones son usualmente de metal o plásticas y son propensas a romperse cuando se someten a impactos, tales como el arrastre de anclas o redes de pesca. Las extensiones frecuentemente se rompen cerca o por debajo del lecho marino, permitiendo así que el emisario submarino se llene con sedimentos.

### **Transporte natural de sedimentos**

El transporte natural de sedimentos a menudo lleva el material en suspensión y lo deposita a lo largo de la tubería del difusor. Se desarrollan dunas de sedimento, las que pueden cubrir los orificios del difusor, introduciendo de ese modo sedimentos en el emisario submarino.

### **Cambios hidráulicos**

Los cambios hidráulicos oscilantes causados por el inicio e interrupción del bombeo producen ondas de presión que oscilan en el emisario submarino. Esta presión baja puede dar lugar a una presión diferencial inversa a lo largo de los orificios que introducirían aguas salinas y sedimentos en el emisario submarino. Un video de inspección durante la puesta en operación del emisario submarino de Viña del Mar, Chile, captó este fenómeno y se trata posteriormente.

A veces se usan tanques ecualizadores y cámaras de aire para proteger las tuberías del emisario submarino al moderar las amplitudes de presión. Aunque las amplitudes de presión son pequeñas, las amplitudes de flujo son mucho más grandes en comparación de lo que ocurriría sin estos dispositivos. Esto da lugar en un mayor reflujos a través del difusor.

### **Corrientes y olas**

Las condiciones naturales como las corrientes y las olas a menudo contribuyen a la intrusión (Larsen, 1994). En aguas de poca profundidad, características de los estuarios, las olas que pasan encima del difusor pueden causar variaciones oscilantes en flujos a través de los

orificios o reflujos completos (Grace, 1986). Las olas y las corrientes fuertes pueden erosionar o licuar el material del lecho marino en los alrededores del emisario submarino, causando su hundimiento, haciendo los orificios más propensos a atorarse.

### Orientación del difusor

La orientación del difusor puede hacerlo más propenso al ingreso de sedimentos. A menudo, están orientados para que su eje sea perpendicular a las corrientes que mejora la dilución inicial, pero podría impedir el transporte natural de los sedimentos. También es aconsejable, cuando sea posible, que el difusor sea ubicado en un plano horizontal que simplifique la hidráulica interior. El emisario submarino de Sand Island No. 2 en Hawai tenía su difusor puesto en el plano horizontal de una pendiente y orientado paralelo a la costa. En 1987, se determinó que la combinación de la pendiente 1/9 a 1/8 y el movimiento del agua cerca del lecho fueron responsables de que la arena se extendiera sobre los últimos 250 m del emisario submarino, y del bloqueo de 18 orificios (Grace, 1997). Otros siete orificios se bloquearon con otros elementos como latas de estaño. El costo total para evacuar la arena y para restaurar completamente el emisario submarino fue de US\$1.168.000.

### CAPACIDAD HIDRÁULICA REDUCIDA

Cuando los sedimentos ocupan una porción del emisario submarino, la capacidad hidráulica se reduce porque la carga hidráulica del sistema aumenta. Uno de los componentes de la carga hidráulica del sistema en un emisario submarino es la carga hidráulica debida a fricción en la tubería del emisario submarino y puede ser calculada por la fórmula de Darcy, Ecuación 2.

$$h = f (L / D) (V^2 / 2g) \quad (2)$$

donde:            h = carga hidráulica debida a fricción, m  
                      f = el factor de fricción de Moody  
                      L = longitud del emisario submarino, m  
                      D = diámetro de la tubería, m  
                      V = velocidad en la tubería, m/s  
                      g = aceleración gravitacional, m/s<sup>2</sup>

Por ejemplo, un emisario submarino cuya 1/4 parte está llena de sedimentos, la carga hidráulica se incrementaría por un factor de dos, considerando que el diámetro efectivo del emisario submarino es reducido en 13% y la carga hidráulica debida a velocidad es incrementada en 78%. Un difusor lleno con depósitos hasta la mitad tendría ocho veces más de carga hidráulica de fricción. Estos escenarios no consideran el incremento del factor de fricción de Moody.

Generalmente, los emisarios submarinos, funcionando por gravedad o bombeo, solo tienen disponible una carga hidráulica limitada para descargar el flujo pico. La capacidad hidráulica reducida de un emisario submarino puede requerir operaciones adicionales de bombeo o rebases que obvian el emisario submarino o los tanques de retención. El bombeo no es aconsejable por los costos de energía y mantenimiento. Las descargas de los reboses o flujos obviados del emisario submarino es indeseable ya que generalmente ocurren cerca del litoral, no proveen tanta dilución y pueden contaminar en gran medida las playas y las costas vecinas.

## Eficiencia reducida de dilución

Los difusores de orificios múltiples aumentan sustancialmente la dilución del efluente comparado a emisarios submarinos de una salida al distribuir el campo de las aguas negras sobre una área espacial mayor. Logran una dilución inicial alta y pueden cumplir eficazmente con las normas de calidad del agua en el campo cercano y lejano. Para ilustrar, considere la "ecuación de la pluma" para una mancha ascendente en un ambiente estacionario. Se puede expresar la dilución del centro de la mancha (Roberts, 1996):

$$S_m = \frac{H^{5/3}}{Q^{2/3}} \quad (3)$$

donde,  $S_m$  = Dilución del centro de la mancha,  $H$  = Profundidad del agua,  $Q$  = flujo de orificio

La efectividad del difusor de orificios múltiples es evidente en la Ecuación 3. Al incrementar el número de orificios se reducen los flujos de cada orificio disminuyéndose el parámetro  $Q^{2/3}$ , y de ese modo se genera una dilución inicial mayor.

Por el contrario, cuando algunos de los orificios del difusor ya no descargan como resultado de estar atorados, la dilución inicial se compromete. Por ejemplo, un difusor que tiene la mitad de sus orificios atorados dará lugar a "Q" aumentando en dos, resultado en una reducción de 37% de la dilución inicial.

Esta eficiencia reducida de dilución puede dar lugar al incumplimiento de las normas de calidad del agua en la zona de mezcla, y concentraciones bacterianas mayores en las playas y costas cercanas.

## LA VÁLVULA "Duckbill"

La válvula "Duckbill", como la válvula de Tideflex, se fabrica completamente de caucho vulcanizado reforzado con nilón o tela de poliéster, similar a un neumático de camión. Los tamaños disponibles varían de 25 mm a 2400 mm. El extremo aguas arriba de la válvula es circular y se transforma en una porción aplanada conocida como el "Duckbill", Figura 1. La elasticidad del caucho mantiene el "Duckbill" en la posición cerrada a falta de presión diferencial positiva. La presión diferencial inversa ayuda a mantenerlo cerrado. La presión diferencial positiva abre progresivamente la válvula durante el incremento del flujo del efluente. Al modificar la matriz de elastómero y tela, pueden controlarse características específicas como la velocidad del chorro y la pérdida de carga hidráulica.



Figura

La válvula "Duckbill" no tiene ninguna parte móvil que se pueda corroer o inhabilitar, lo que permite su desempeño excepcional bajo las condiciones adversas de las aguas marinas.

"Duckbill"

Válvula

## Componentes flexibles

Las válvulas "Duckbill" también se pueden fabricar con extensiones y codos de caucho integral reforzado con alambre para reemplazar "tubería dura" encima del lecho del mar. Estos componentes son fabricados de manera similar a las válvulas "Duckbill", pero incorporando el refuerzo de alambre. Son muy duraderos y pueden doblarse y regresar a su forma original cuando se los somete a impactos tales como anclas y redes. Teniendo todos los componentes de caucho encima del lecho se minimizaría o eliminaría el daño físico al emisario submarino.

## HIDRÁULICA DE LAS VÁLVULAS "Duckbill"

La ventaja hidráulica de la válvula "Duckbill" es que es un orificio variable; el área efectiva abierta se incrementa con el aumento del flujo, y disminuye con la reducción en el flujo. El orificio variable de la válvula "Duckbill" genera velocidades mayores de chorro con los flujos menores, y reducción de la carga hidráulica en flujos picos. Las figuras 2 y 3 muestran las características de las válvulas "Duckbill" versus orificios de diámetros fijos. En este ejemplo, la velocidad del chorro y la carga hidráulica son equivalentes al flujo de diseño. Con flujos menores que el del diseño, la válvula "Duckbill" sigue cerrándose y genera una velocidad mayor del chorro. Con flujos mayores que los del diseño, la válvula "duckbill" sigue abriéndose incrementando el diámetro efectivo y generando menor carga hidráulica.

Las velocidades mayores del chorro maximizan el flujo de impulso que aumenta la dilución inicial, especialmente en aguas marinas poco profundas. En profundidades mayores a 20 metros podría no apreciarse la mejora en la dilución inicial, ya que las fuerzas ascendentes la dominan. Las válvulas "Duckbill" también descargan un chorro elíptico. Ensayos independientes en la Universidad de Hong Kong concluyeron que el chorro elíptico produce una dilución inicial mucho mayor que un chorro circular descargando en la misma dirección de la corriente (Lee, *et al.*, 1997).

El ensayo de Hong Kong también confirmó que las válvulas "Duckbill" proveen una distribución de flujos más pareja a través de los orificios del difusor. Esta característica autoregulatoria de las válvulas "Duckbill" mantiene una presión diferencial más consistente a través de los orificios.

## PURGA DE AGUAS SALINAS

Uno de los principales motivos de preocupación de los emisarios submarinos es su capacidad de purgar completamente las aguas salinas. Esta expulsión es especialmente difícil para los emisarios submarinos enterrados o de túneles que tienen extensiones verticales. La cabeza hidráulica requerida para purgar las aguas salinas de una extensión es una función de la densidad diferencial entre el efluente y las aguas salinas y la longitud de la extensión. Hay un flujo teórico requerido para purgar las aguas salinas completamente (Munro, 1981). Dependiendo del diseño del emisario submarino, este flujo puede ser mayor que el flujo promedio diario de la planta.

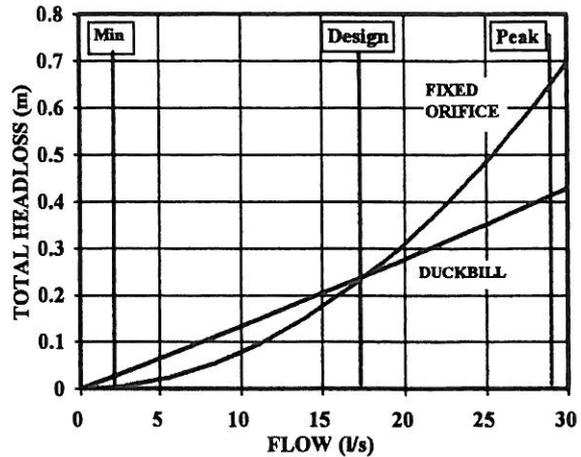


Figura 2  
Comparación de carga hidráulica de válvulas "Duckbill" y orificios de diámetro fijo

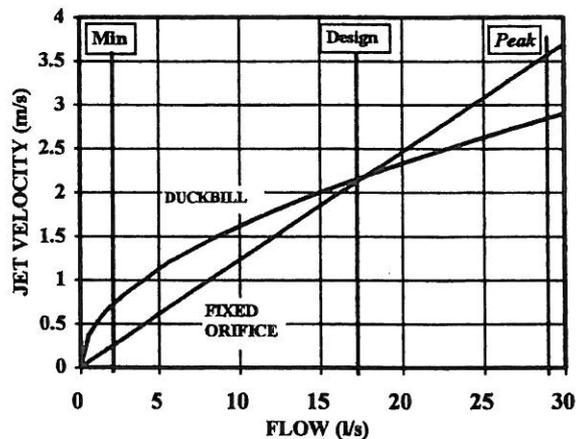
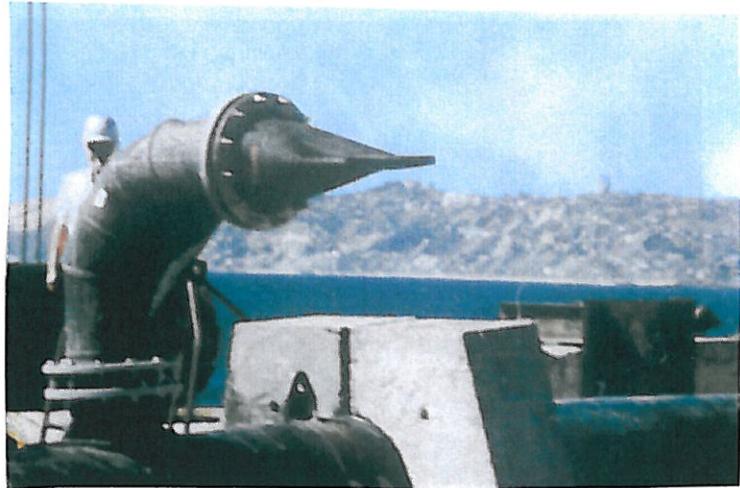


Figura 3  
Comparación de velocidad de chorro entre la válvula "Duckbill" y orificios de diámetro fijo

Considere un emisario submarino que está lleno de aguas salinas previo a su puesta en operación. Cuando el efluente se introduce en el emisario submarino, pero a un flujo menor que el flujo teórico de purga, se desarrolla una circulación de estado permanente, donde el efluente se descarga a través de las extensiones hacia la costa, mientras las aguas salinas se atraen a través de las extensiones hacia el mar. Un emisario submarino con válvulas "Duckbill" impide esta circulación porque las válvulas de retención previenen cualquier reflujos. Ya que las aguas salinas no pueden ingresar, el efluente menos denso fluye a lo largo de la corona de la tubería hasta el final del difusor, ocupa todos las extensiones, luego mezcla y descarga las aguas salinas con el efluente. Los ensayos de Hong Kong descubrieron que los emisarios submarinos con válvulas "Duckbill" purgan las aguas salinas a flujos mucho menores que el flujo teórico requerido para purgar las aguas salinas de un emisario submarino convencional. Esto permitirá que el difusor descargue a través de todos sus orificios, aun cuando los flujos de la planta sean bajos.

### Emisario submarino de Viña del Mar, Chile

El emisario submarino de Viña del Mar es de tubería de polietileno de alta densidad (HDPE) con un diámetro de 1.2 m, una longitud de 1.5 km con un difusor largo de 100 m que descarga en 45 m de profundidad. Este emisario submarino se convertiría en un emisario submarino de emergencia después de la puesta en operación del emisario submarino de Loma Larga. El difusor tiene veinte orificios equipados con válvulas "Duckbill" embridadas de 250 mm, Figura 4. El flujo máximo esperado de la planta es 2.4 m<sup>3</sup>/s.



**Figura** **Válvulas**  
**"Duckbill" de 250 mm en el emisario**  
**submarino de Viña del Mar, Chile**

En 1996, durante la puesta en operación del emisario submarino, se tomaron videos bajo el agua durante la operación. Mientras estaba en funcionamiento, la planta experimentó un corte de energía que detuvo las bombas. Como resultado de la detención del bombeo, se produjeron cambios hidráulicos oscilantes de la presión en la trayectoria de la tubería hacia adelante y hacia atrás. Estos cambios produjeron una presión diferencial negativa, cerrando algunas de las válvulas "Duckbill", mientras que otras estaban descargando efluentes a diversos flujos. Ya que las válvulas "Duckbill" cerraron, el agua salina y el sedimento no se introdujeron en la tubería del emisario submarino y ninguna reducción posterior de la eficiencia operativa fue observada una vez que el flujo se restauró.

### CONCLUSIÓN

Utilizando las válvulas "Duckbill" en difusores para la descarga de efluentes se mantienen a largo plazo las eficiencias hidráulicas y de dilución de los emisarios submarinos, al prevenir la intrusión de aguas salinas y sedimentos en el emisario submarino. Se eliminan los gastos de mantenimiento para limpiar y restaurar el servicio del emisario submarino. El orificio variable de la válvula "Duckbill" también mejora la hidráulica al generar una dilución inicial mayor a flujos bajos, y minimiza la carga hidráulica a flujo picos. Las válvulas "Duckbill" se implementan en diseños nuevos de difusores y pueden ser instalados en emisarios submarinos existentes que están operando a eficiencias reducidas debido a la intrusión de aguas salinas y sedimentos.

## REFERENCIAS

- Charlton J.A., Davies P.A. and Bethune G.M.H. (1987). Seawater intrusion and purging in multi-port sea outfalls. *Proc. ICE Part 2*, **83**, 263-274.
- Grace R.A. (1978). *Marine outfall systems: planning, design, and construction*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A.
- Grace R.A. (1986). Sea outfalls - a review of failure, damage, and impairment mechanisms. *Proc. Instn of Civ. Engrs*, Part 1, **80**, 553-557.
- Grace R.A. (1997). Returning impaired marine outfall diffusers to full service. *J. Environmental Eng.*, **123**(3), 297-303.
- Larsen T. (1994). Diffuser design for marine outfalls in areas with strong currents, high waves, and sediment transport. *Proc. International Specialized Conference on Marine Disposal Systems*, IAWQ 271-277.
- Lee J.H.W., Karandikar J., and Horton, P.R. (1997). Hydraulics of duckbill valve jet diffusers. *Proc. 13th Australian Coastal and Ocean Engineering Conference*, Sept. 1997, New Zealand.
- Munro, D. (1981). Sea water exclusion from tunnelled outfalls discharging sewage. Water Research Center, Stevenage Laboratory, Report 7-M.
- Roberts P.J.W. (1996). *Environmental Hydraulics*, Sea Outfalls - Chapter 3, 63-110. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.