

# ***Criterios de diseño en emisarios con tuberías de PE***

*E. Pita*

*Ingeniero de Caminos, Canales y Puerto*

*Director General de Ingeniería Creativa Pita, S. L. (INCREA)*

*epita@increa.eu*

## **Introducción**

Aunque en esta ponencia se hablará de emisarios submarinos (terminología que, en sentido literal, designa al vertido de efluentes al mar), casi todas las afirmaciones que se hacen pueden extenderse a otras instalaciones similares, como son las conducciones submarinas de transporte de agua, tomas de agua, etc., tanto en el mar como en otros medios acuáticos.

Los tubos de PE se han impuesto frente a otros materiales para su uso en emisarios submarinos dado que tienen enormes ventajas.

Para la elección del material que constituye un emisario submarino, se debe realizar un estudio de las diferentes alternativas, teniendo en cuenta, no sólo el coste del tubo, sino también el coste de la instalación, la facilidad constructiva, la dependencia del estado del mar, la corrosión, la durabilidad, etc. El Polietileno de alta densidad (PEAD) presenta indudables ventajas, principalmente en el proceso constructivo.

En esta ponencia mostraremos inicialmente las ventajas e inconvenientes del PE para su uso en emisarios. A continuación, describiremos los criterios de diseño de un emisario submarino de cualquier material y, por último, las particularidades del diseño de emisarios en PE.

## **Ventajas de las tuberías de PE**

El PE es el material que presenta más ventajas para su uso en emisarios submarinos, pudiendo destacarse las siguientes:

- Su gran resistencia a la corrosión, lo cual lo hace idóneo en un ambiente tan agresivo como es el agua de mar.
- Su capacidad para montar largos tramos, lo cual simplifica su transporte y reduce la necesidad de ejecutar uniones en el mar. Estas uniones, tanto en la superficie como en el fondo del mar, representan un coste muy elevado, sobre todo a grandes profundidades
- Excelente comportamiento frente a las acciones del mar, por su gran flexibilidad, que le permite adaptarse para resistir sus embates, mediante su deformación sin sufrir deterioro.
- Su comportamiento frente al sismo es inmejorable (podría soportar problemas de licuefacción del terreno).
- Su flexibilidad, que permite reducir los costes de instalación, ya que se puede fondear por métodos muy económicos, como el fondeo controlado por inundación progresiva. Además, permite que se generen curvaturas de radio muy pequeño, lo cual facilita su control durante el remolque en la superficie.



*La flexibilidad de las tuberías de PE es una gran ventaja*

- Rugosidad baja, lo cual mejora el comportamiento hidráulico, lográndose mayores capacidades hidráulicas con la misma sección de otros materiales.
- Menor adherencia de seres vivos en su superficie, lo cual mejora el comportamiento hidráulico a largo plazo y reduce otros problemas asociados a la proliferación de seres vivos en su superficie.



*La adherencia de seres vivos en el interior de conducciones submarinas es un gran problema con cualquier material*

## Desventajas de las tuberías de PE

La principal desventaja es su densidad, inferior a  $1 \text{ t/m}^3$ , lo cual obliga al empleo de lastres que hagan que la tubería sea estable en el fondo del mar, tras su fondeo. Sin embargo, un inteligente diseño de los lastres permite que a éstos se les confiera otras funciones adicionales.

Otro aspecto con el que se debe tener especial cuidado es la falta de robustez del PE frente a acciones accidentales de efecto “cortador”, como pueden ser los cables y aparejos de pesca. Por ello, se recomienda cubrir la tubería con algún elemento de protección, en cualquier caso.



*Tubería de PE rota por accidente*

## Criterios de diseño de emisarios en general

### Comportamiento hidráulico: toma y vertido.

El cálculo hidráulico de un emisario de vertido de aguas residuales no difiere del de otras conducciones, aunque deben tenerse en cuenta los siguientes condicionantes:

- Debe asegurarse una velocidad de flujo suficientemente alta, en ciertas fases del funcionamiento, para arrastrar las posibles deposiciones de material en el fondo del tubo. Si ello no se lograra con los caudales circulantes, será necesario hacer un “flushing” con cierta periodicidad.
- Todos los difusores deben expulsar efluente (de la manera más homogénea posible) sin que aparezca ningún estado durante el trabajo en que el agua marina se introduzca en el emisario.
- Existe una pérdida de carga en la salida al mar por diferencia de densidades entre el efluente y el agua de mar.

### Protección de la tubería, el lastrado y el perfil longitudinal.

El emisario debe ser estable frente al oleaje y corrientes, a cualquier profundidad, a lo largo de toda su vida útil

Cuando un tubo está en el fondo marino, en libre contacto con el movimiento del mar, experimenta unas fuerzas que pueden originar su desplazamiento. El posible desplazamiento transversal se analiza mediante la formulación de Morrison.

Para evitar movimientos del tubo, el peso sumergido del emisario (conjunto tubería más lastres) debe ser suficientemente grande teniendo en cuenta el periodo en el que va a estar desprotegido y las posibles acciones incidentes. Además, el lastrado sirve como base de apoyo de la tubería en el fondo de la zanja.

Normalmente lo más aconsejable en el caso de emisarios colocados sobre el lecho marino es la disposición del mismo en zanja hasta la zona en que la ola no rompe por fondo (es decir, fuera de la “surfing zone”). Si la zanja es de material no rocoso, se protege, bien con escollera, bien tapando la tubería con el mismo material del fondo, con suficiente espesor. En zanjas en roca, la tubería podría ir recubierta con una capa de hormigón.

En la zona donde el emisario no va en zanja, es necesario colocar alguna protección sobre él. Esta protección podría ser:

- Escollera.
- Elementos prefabricados, algunos a modo de lastres secundarios.
- Mantas de hormigón.
- Mantas bituminosas.

La escollera crearía un dique sumergido que protege al mismo con una o varias capas (cuando se hacen necesarios filtros intermedios entre la escollera exterior y la grava que pueda rodear el tubo).

Además de la defensa frente a la acción del mar, la protección es necesaria para evitar posibles acciones accidentales sobre el tubo:

- Caída de objetos.
- Impacto de anclas.
- Impacto o arrastre de aparejos de pesca.

A la hora de definir un perfil longitudinal, normalmente, se busca reducir la altura de tierras sobre la clave para que los esfuerzos ovalizantes sean más pequeños y que el volumen a dragar disminuya. En la zona de rompientes, sin embargo, habrá que estar atentos a que las variaciones del perfil de playa no lleguen a dejar la tubería “al aire”.

Por lo anterior, habitualmente, la altura de tierras es más pequeña que en el caso de tuberías terrestres.

## **Dimensionamiento estructural de la tubería**

Un emisario submarino debe ser diseñado teniendo en cuenta el proceso de construcción del mismo ya que durante éste se producen esfuerzos que condicionan el material, el tipo de solución, las características mecánicas de la tubería, etc.

La tubería deberá ser capaz de soportar las presiones interiores y exteriores, así como las cargas debidas al relleno. La abolladura puede condicionar las dimensiones de su pared.

En el caso de vertidos, la diferencia entre presión interna y externa es muy baja, ya que el vertido se hace a poca distancia y, por tanto, las pérdidas de carga son reducidas. Por ello, por condiciones de servicio, el timbraje puede ser muy pequeño.

Sin embargo, las condiciones de fondeo pueden exigir timbrajes muy superiores a los de servicio.

Cuando el vertido se hace a través de válvulas antirretorno y el mar presenta marea, pueden producirse sobrepresiones externas que den lugar a problemas de abolladura.

En el caso de tomas de agua, la presión exterior es mayor que la interior, por lo que se deberá tener en cuenta el comportamiento frente a la abolladura.

El lastrado puede ser dimensionado para que funcione como rigidizador, lo cual incrementa la resistencia de la tubería frente a la abolladura.

### **Bocas de hombre.**

Para la inspección de la tubería, es habitual colocar bocas de hombre cada 300 m (aproximadamente), que permitan el acceso de equipos e, incluso, de buzos (en el caso de tuberías de gran diámetro). Conviene señalarlas para su fácil localización.

### **Balizamiento y anti-arrastreros.**

Para que los barcos no puedan afectar a las partes más sensibles de un emisario (tramo difusor, torre de toma, tramos colocados en el fondo sin protección), normalmente se señalizan con un balizamiento adecuado y se colocan elementos antiarrastreros en el fondo, para evitar que las artes de pesca puedan afectar a las conducciones.



*Antiarrastreros, acopiados en tierra, antes de su instalación.*

### **La construcción: dragado, fondeo, juntas y protección.**

La construcción de un emisario es complicada (y, por ello, costosa) dado que no se trata de una obra portuaria, es decir, normalmente no hay abrigo del mar, por lo que resulta difícil encontrar ventanas de buen tiempo que permitan trabajar a las embarcaciones.

La primera tarea a ejecutar en obra sería la ejecución de las zanjas (dragado).

En paralelo con esto, en tierra se irá preparando la tubería (formación de tramos, en el caso del PE).

A continuación, se ejecuta el fondeo de la tubería (que puede venir precedido por el rasanteo del fondo de la zanja, si esta es rocosa). Durante la instalación de la tubería, será necesario ejecutar juntas entre tubos o tramos de tubería.

Tras la instalación de la tubería, será necesaria su protección con los elementos arriba citados.

### **Elementos singulares: el difusor y la estructura de toma.**

En el caso de emisarios de vertido de aguas residuales, la tubería termina en un tramo difusor que tiene una geometría tal que origine una correcta dilución del efluente en el medio que le rodea. Habitualmente consiste en un tramo de tubería con numerosas bocas colocadas a ambos lados del tubo principal y que permiten la descarga en dirección horizontal, a través de válvulas tipo “pico de pato”.

En el caso de un difusor para el vertido de salmuera, el ángulo de salida está comprendido entre 45 y 60° con el plano horizontal. Además, no lleva válvula.

En el caso de tomas de agua, en el extremo de la conducción se coloca una estructura de toma que permita la entrada del agua a baja velocidad y a suficiente distancia del fondo y de la superficie del mar.

## **Particularidades del PE**

A continuación mostramos algunas singularidades que presenta el PE cuando es empleado como material constitutivo de las tuberías para conducciones submarinas.

### **Comportamiento hidráulico**

El PE es un material de rugosidad muy baja, lo cual reduce las pérdidas de carga lineales.

### **Protección de la tubería, el lastrado y el perfil longitudinal.**

Es aconsejable que el árido en contacto con el tubo sea de pequeño tamaño, para que el contacto sea más homogéneo y no dañe al tubo.

Su lastrado es imprescindible, ya que el PE tiene densidad menor que el agua.

En relación a la estabilidad de la tubería en el fondo cuando un temporal actúa contra la tubería apoyada en el fondo del mar, la flexibilidad del PE y la naturaleza cíclica de las acciones del oleaje permiten que la tubería “culebree” sin sufrir ningún daño

### **Dimensionamiento estructural de la tubería**

Durante la construcción de una conducción submarina de PE, la tarea más compleja y específica es la fase de instalación ya que determina las propiedades mecánicas de las tuberías de polietileno (principalmente el espesor de pared y la inercia longitudinal) debido a que, en servicio, la resistencia requerida es mucho más pequeña.

Las tensiones generadas en el tubo deben ser inferiores a la máxima admisible, prestando especial atención a la posible abolladura por sobrepresiones exteriores.

Podemos resumir las particularidades citadas, de forma breve, diciendo que “la clave es la instalación”.





*Transporte flotando de la tubería del Emisario de La Taboada (Lima-Perú). Tramo difusor.*

### **La construcción: el fondeo y protección.**

La principal singularidad de la tubería de PE es su fondeo, que se hace en grandes tramos, lo cual reduce la necesidad de ejecutar juntas en el mar. El fondeo de tuberías de PE por el método de fondeo controlado por inundación progresiva tiene innumerables ventajas, dado que se reducen enormemente las operaciones submarinas, que siempre son caras, peligrosas, difíciles y largas.

La ejecución de juntas se describe en el siguiente apartado.

Para **tuberías de diámetros pequeños** (1600 mm e inferiores), hemos recomendado, históricamente, el fondeo controlado por inundación progresiva de la tubería. Este sistema constructivo consiste en la fabricación de tramos de tubería en tierra (en una zona que puede estar alejada de la ubicación definitiva del tubo), su traslado flotando hasta destino y su hundimiento controlado, mediante llenado con agua.

Para emplear este método es necesario que el tubo sea de gran flexibilidad, como es nuestro caso.

Durante el transporte lo más adecuado es no forzar la alineación en planta de la tubería en flotación, con objeto de no producir excesivas tensiones.

Sin embargo, durante el posicionamiento de la tubería sobre la zanja será necesaria una colocación que normalmente es perpendicular a las corrientes, con lo que el tubo se ve sometido a un empuje horizontal, cuyas consecuencias deben ser evaluadas

Para evitar tensiones excesivas en el tubo durante el fondeo es necesario controlar la curvatura producida en el tubo, a lo largo de todo el proceso.

En los últimos años, las necesidades de empleo de tuberías de mayores diámetros nos han empujado a la necesidad de diseñar métodos alternativos. Por ello, estamos proponiendo el fondeo controlado mediante el uso de flotadores. De este modo, el fondeo se hace en dos etapas: primero se inunda la tubería, que queda colgando de los flotadores y, posteriormente, se inundan los flotadores.

Este método hace innecesario aplicar un tiro longitudinal durante el fondeo, lo que permite simplificar enormemente la instalación, especialmente la realización de las juntas en el fondo del mar.

Gracias al uso de este método, las conducciones sufren menores esfuerzos, lo que genera mayores márgenes de seguridad.

Para poder beneficiarse de las importantes ventajas de estos métodos es preciso, previamente, tener un conocimiento claro del comportamiento estructural de la tubería puesto que, de lo contrario, pueden producirse problemas por la flexión longitudinal de la misma.

En cada caso particular, será necesario realizar cálculos precisos que modelen todas las situaciones por las que pasa la tubería. Sólo empresas altamente especializadas pueden dar este servicio.

### **Las juntas entre tramos**

Vamos a describir el proceso de ejecución de juntas entre tramos, cuando se emplea el método de fondeo tradicional, es decir, el adecuado para pequeños diámetros.

Cuando el fondeo es con la ayuda de flotadores, la ejecución de juntas difiere ligeramente.



*Unión embridada entre dos tramos de tubería de PE. Tubería de 1.800 mm de diámetro interior.*

#### *Unión de tramos en el fondo*

El tramo que está en el fondo permanece fijo en su situación final.

El nuevo tramo a unir se transporta flotando, lleno de aire, hasta la zona de unión.



Se introduce progresivamente agua por un extremo, con lo que empieza su hundimiento por dicho extremo (en el extremo contrario, la válvula de aire permanece ligeramente abierta para permitir su salida). En un momento dado, el tubo toca el fondo y su extremo va inclinándose hasta que descansa en cierta longitud sobre el lecho marino, mientras que el otro extremo flotará sobre la superficie.

En este instante se procede a la unión de ambos tramos, abriéndose las bridas ciegas, acercándose ambos extremos y ejecutando la brida de unión de los mismos. Lógicamente, la válvula de salida del aire debe estar cerrada para mantener fijada la posición del nuevo tramo. Una vez que ya se han llevado los dos extremos a la posición buscada, se prosigue la inundación del emisario, con lo que éste va hundiéndose y apoyando en el fondo.

#### *Unión de tramos en la superficie*

Consiste en ejecutar la unión sobre una plataforma de trabajo.

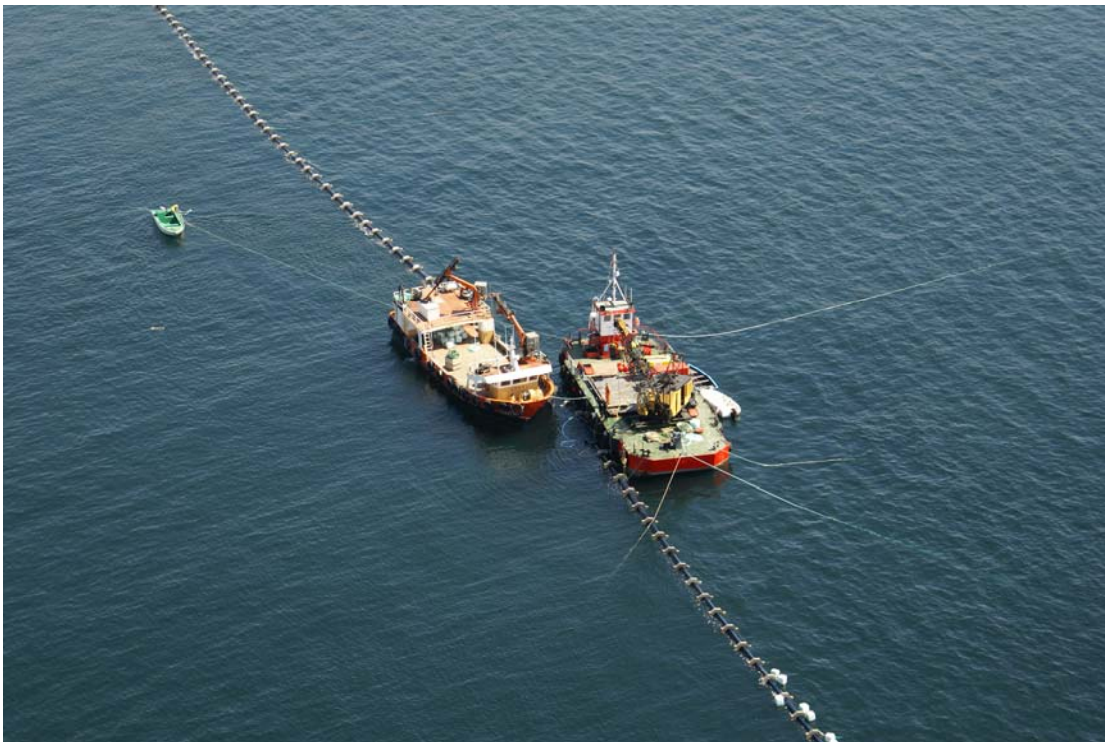
Lógicamente, realizar la unión al aire facilita la operación. Sin embargo, se necesita una altura de ola más baja que uniendo en el fondo.

Los estados tensionales que sufre el tubo son similares a los del caso de unión de los tramos en el fondo, pero se genera mayor presión exterior en la tubería.

En primer lugar, el tubo está sobre el fondo. Al introducirle aire, su extremo asciende hasta que aparece en la superficie y forma la característica “S”. En este momento, se iza el tubo a una plataforma de trabajo, donde se unirá al siguiente tramo, que permanecía flotando en la superficie.

Si la plataforma está suficientemente baja y la longitud del tubo en la superficie del mar es suficientemente grande antes de izarlo a la plataforma, los esfuerzos en esta fase son similares a los de la fase en que se forma la “S”. Tras realizarse la unión, el conjunto formado por los dos tramos se deja sobre la superficie del mar, con lo que la forma de la curva vuelve a ser la correspondiente a la “S”.

Para evitar tensiones locales y esfuerzos excesivos durante los izados, es siempre imprescindible el empleo de un balancín con eslingas adecuadas. A medida que el agua inunda el tubo, la “S” se desplaza hacia el extremo vacío. Llega un momento en que el extremo vacío desaparece de la superficie, hundiéndose hasta que se apoya en el fondo.



*Unión de tramos en superficie. Tubería de 500 mm, SDR 9.*