

4. CRITERIOS DE DISEÑO DE UN EMISARIO SUBMARINO

Para este capítulo se tuvo en cuenta información consultada en Salas (2000) y en una publicación realizada por la Comisión Nacional del Agua (2007), en los cuales se describe en forma detallada cada criterio a tener en cuenta para diseñar un emisario submarino.

En el diseño conceptual de un emisario submarino se establecen sus dimensiones: longitud, diámetro, ubicación y profundidad de descarga. Así mismo, en esta fase se completa el diseño hidráulico del difusor.

En el diseño final estructural se especifican los materiales de tubería y las técnicas de construcción y requerimientos para sostener la tubería en el fondo. La información detallada sobre la magnitud de las olas es necesaria en esta fase del proyecto.

Una vez que se conoce el caudal que se debe verter a través de un sistema de depuración y los usos que se le den a la playa o al sitio de descarga, se diseña una primera aproximación de las características físicas del emisor tomando como base la selección de las principales variables, es decir, se realiza una revisión del sitio y de las condiciones en el lugar o lugares posibles de la ubicación del emisor y del punto de la descarga. Así deben, también, manejarse variables geomorfológicas, oceanográficas, hidrometeorológicas y topográficas con el fin de disponer de la información necesaria (figura 4.1). Con base en esto se realiza una primera propuesta de diseño, para la cual otra serie de estudios deben de realizarse como son la configuración del emisor que implica la tubería principal, sistema difusor, longitudes, diámetros, y otros más. Además, deben de revisarse las relaciones costo-beneficio y los estudios de impacto ambiental, tanto en la zona de descarga como en las zonas por proteger (Comisión Nacional del Agua, 2007).

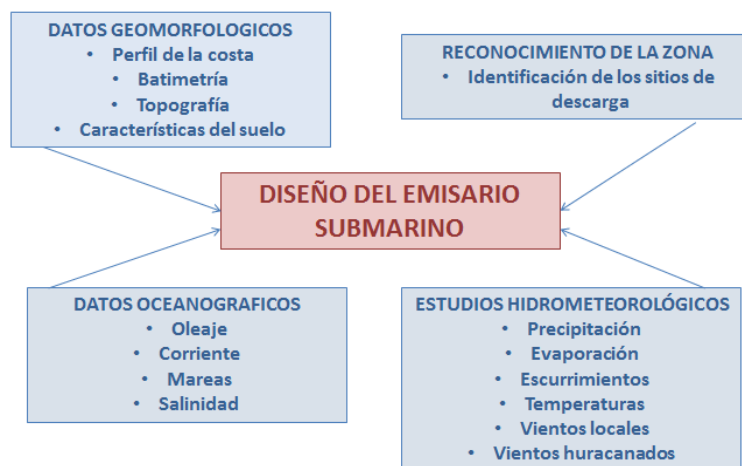


Figura 4.1 Componentes del diseño de emisarios submarinos (Comisión Nacional del Agua, 2007)

4.1 DILUCIÓN

El diseño apropiado de un sistema de emisario submarino puede lograr diluciones suficientes de la descarga de aguas residuales para reducir las concentraciones de contaminantes a niveles establecidos como normas de calidad de agua. Una dilución mínima de 100:1 es común, permitiendo que la alternativa de un emisario submarino supere la de las plantas de tratamiento convencionales.

Hay varios mecanismos que controlan las características de dilución de un emisario submarino. Estos mecanismos usualmente se consideran en tres fases: dilución inicial que ocurre durante los primeros minutos al salir las aguas residuales del emisario submarino y ascender en la columna de agua recipiente; transporte y dispersión horizontal del campo de aguas residuales; y las reacciones cinéticas que ocurren en el mar. Para la descarga de aguas residuales, el mecanismo de mayor importancia para el diseño es el de la desaparición de organismos indicadores como son los coliformes.

Tres fenómenos afectan la dilución inicial: mezcla causada por el impulso de las aguas servidas al salir del emisario submarino; fuerza ascendente causada por la diferencia de densidad entre las aguas residuales y las aguas de mar (diferencias en temperatura y salinidad) que hace que el campo de aguas servidas ascienda en la columna de agua extendiéndose en el proceso y, por lo tanto, mezclándose con agua de mar; y finalmente, el efecto de la corriente que causa una mezcla lateral de agua de mar renovadora en el campo de las aguas residuales.

El campo de aguas residuales diluido puede ascender a la superficie, o llegar a un nivel sumergido, dependiendo del grado de estratificación de la columna de agua. Brooks (1983) ha desarrollado un modelo que estima la dilución inicial que se puede lograr en función de los parámetros de profundidad, diámetro y velocidad de salida y diferencias en densidad. Posteriormente, Roberts (1977, 1987) desarrolló un modelo que permite estimar la dilución inicial para diferentes estructuras de corrientes, con o sin estratificación. El diseño apropiado del difusor del emisario submarino es crítico para alcanzar el nivel deseado de dilución. La longitud, profundidad y orientación así como el área y separación de los orificios de descarga, son parámetros claves del diseño. Rawn, *et al.* (1961), han presentado métodos para el diseño de difusores y éstos han sido incorporados en un programa simple de computadora por Salas (1983).

Dispersión horizontal y transporte son función del régimen de corrientes locales así como la dispersión turbulenta (mezcla lateral causada por corrientes turbulentas). Brooks (1960) ha desarrollado un modelo que caracteriza adecuadamente estos procesos para estimar la dilución horizontal.

Un modelo simple logarítmico de mortalidad bacteriana provee una predicción adecuada de la desaparición de coliformes con el fin de diseñar emisarios submarinos. El modelo es el siguiente:

$$S_b = 10^{\frac{T}{T_{90}}}$$

En donde:

S_b = "dilución" de coliformes (adimensional)

T = tiempo de traslado del campo de aguas residuales a las áreas a proteger, por ejemplo, playas (horas)

T_{90} = tiempo necesario para la desaparición del 90% de los coliformes (horas)

La dilución total obtenida como resultado de los tres procesos descritos es simplemente el producto de las diluciones individuales. Esto es para bacteria:

$$S_T = S_i \times S_h \times S_b = \frac{C_o}{C_T}$$

En donde:

S_T = Dilución total (adimensional)

S_i = Dilución inicial (adimensional)

S_h = Dilución horizontal (adimensional)

S_b = Desaparición de coliformes (adimensional)

C_o = Concentración inicial de coliformes en las aguas residuales (mg/L)

C_T = Concentración de coliformes después de T horas, en las playas (mg/L)

La dilución inicial y la mortalidad bacteriana usualmente son mucho más significativas que la dilución horizontal. Por ejemplo, valores típicos son:

S_i : 50 - 200

S_h : 2 - 3

S_b : 500 - 10,000

S_T : 5×10^4 - 6×10^6

Para sustancias conservativas (no biodegradables), la dilución inicial es el factor más importante.

Los parámetros ambientales más importantes en el diseño de emisarios submarinos generalmente son la estructura de la densidad de las aguas de mar recipientes, el

Criterios de diseño

régimen de corrientes y el T_{90} (para aguas servidas). Por lo tanto, las campañas de recolección de datos deben concentrarse en obtener mediciones buenas de estos fenómenos.

4.2 TIPOS DE AGUAS DESCARGADAS

La composición de los caudales de aguas residuales de una comunidad depende del tipo de sistema de captación de aguas residuales que se emplee, y puede incluir los siguientes componentes:

- Agua residual doméstica: Procedente de zonas residenciales, instalaciones deportivas, comerciales, públicas y similares.
- Agua residual industrial: Aquella en la que predominan los vertidos provenientes de industrias.
- Infiltración y aportaciones incontroladas: Agua que entra tanto de manera directa como indirecta en la red de alcantarillado. La infiltración hace referencia al agua que penetra en el sistema a través de juntas defectuosas, fracturas y grietas, o paredes porosas. Las aportaciones incontroladas corresponden a aguas pluviales que se descargan a la red por medio de alcantarillas pluviales, drenes de cimentaciones, bajantes de edificios y tapas de pozos de registro.
- Aguas pluviales: Agua resultante de los escurrimientos superficiales.
- Aguas residuales termales: Una descarga de agua térmica se define como aquella en la que la disposición de calor es el propósito primario; el calor proviene de un intercambiador antropogénico y los contaminantes adicionales presentes se originan a partir de aditivos, tratamientos y anticorrosivos adicionados en el sistema más que en el proceso de manufactura.
- Descargas salinas: El incremento en la salinidad del agua puede deberse a diversas actividades humanas. Por ejemplo en las refinerías de petróleo se generan aguas con altos contenidos de sal (≈ 120.000 ppm) como resultados del proceso de lavado y separación de las aguas del aceite. Estos aguas de desecho se vierten sea al subsuelo o se dispone de ellas en el mar a través de un emisor submarino. Por otro lado, al pasar el agua por un sistema municipal, incorpora inevitablemente, sales de diversos procesos, como por ejemplo: la recarga de suavizantes con cloruro de sodio.

4.2.1 Característica física de las descargas sumergidas

En la mayoría de los casos, las aguas receptoras no están homogéneamente mezcladas en la profundidad; es decir, son más densas en el fondo que cerca de la superficie, lo que produce una estratificación. Debido a su densidad, que es aproximadamente igual a la de las aguas dulces, las aguas residuales tienden a subir al ser descargadas en el fondo del

mar y por consiguiente, incrementan su peso, más que el agua superficial. Este cambio en la densidad con la profundidad tiene un efecto significativo en la dilución inicial y puede evitar que la pluma alcance totalmente a la superficie provocando que los desechos queden atrapados bajo la superficie, y esto es deseable usualmente por razones tanto higiénicas como estéticas, formando un campo de contaminantes sumergido (figura 4.2). Las capas superficiales con aguas residuales pueden moverse a grandes distancias por la influencia de vientos y olas, frecuentemente hacia la línea costera. Además, las corrientes subsuperficiales son usualmente menores que las superficiales, así que el tiempo de viaje hacia la línea costera se incrementa y se alcanza un mayor tiempo para la degradación del agua residual.

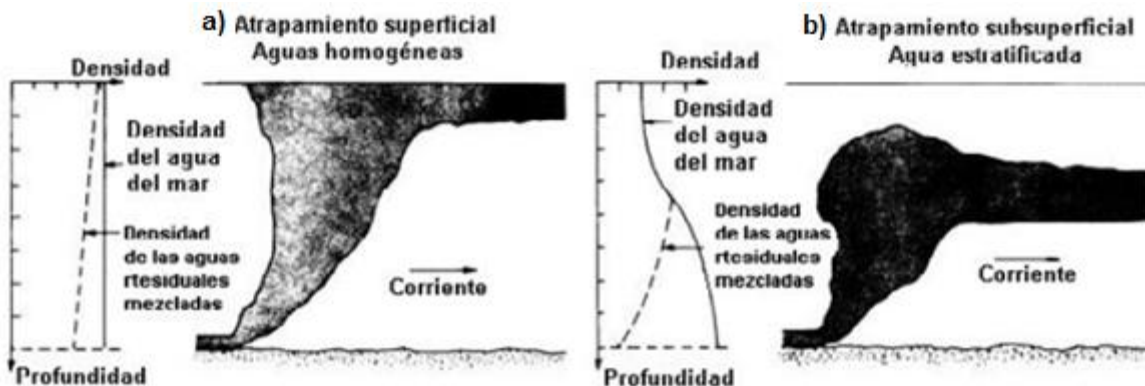


Figura 4.2 Atrapamiento de aguas residuales en aguas de densidad homogénea (a) y estratificada (b)

La variación de la densidad con respecto a la profundidad puede calcularse con la relación dp_a/dz y será negativa moviéndose hacia la superficie. La variable z representa la dimensión vertical; $\rho_a(Z_0)$ es utilizado para referir la densidad del mar al nivel de la descarga del difusor (Z_0). La profundidad a la cual la pluma se elevará y la dilución mínima que ocurrirá dentro de la pluma puede calcularse relativamente fácil si se asume un cambio lineal en la densidad del agua de mar.

4.3 MEDICIONES DE CORRIENTES

El diseño de un emisario submarino requiere de una definición adecuada de las corrientes dominantes del área de estudio. En general se recomienda instalar correntógrafos con registros incorporados para medir continuamente la velocidad y dirección de las corrientes a tres metros de la superficie y a 2 metros del fondo, en la ubicación más probable de la descarga del emisario submarino y otras ubicaciones, las que dependerían de la circulación marina del área y de la cercanía a las playas que se pretende proteger. En general, estos correntógrafos se instalarían durante dos o tres meses en las épocas lluviosa y seca. La figura 4.3 presenta un posible sistema de anclaje para los

correntógrafos. Se deben combinar con estudios de flotadores superficiales y así mismo, se debe medir el nivel de mareas durante el mismo período.

Existe una nueva generación de correntógrafos continuos "Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)" que pueden ser fijados en el fondo, a cualquier profundidad, o en la superficie. También pueden fijarse a las embarcaciones. Estos nuevos correntógrafos usan la tecnología de sonar, midiendo el movimiento de partículas en el agua. Uno de los fabricantes, RD Instruments, de California, manifiesta que uno de éstos puede medir la velocidad en la columna de agua hasta en 128 profundidades. Por lo tanto, puede reemplazar un buen número de los correntógrafos antiguos.

En el caso que no se disponga de correntógrafos continuos, como alternativa mínima se recomienda utilizar correntógrafos de medición instantánea, tomando mediciones cada 15 minutos durante períodos extendidos. Observaciones diarias desde embarcaciones serían necesarias durante varias semanas en cada época y estas se deben combinar con estudios de flotadores superficiales y subsuperficiales lanzados periódicamente en las estaciones de medición de corrientes. La posición de los flotadores sería registrada cada hora, por un período de uno a cinco días dependiendo de las características del área de estudio, por medio de observaciones visuales de una embarcación a través de alineamientos en tierra y/o radar.

Se deben analizar los datos de corrientes con técnicas armónicas o de filtración. Sería útil la presentación visual de promedios y valores probables de 80% ó 90%, dependiendo en la norma de calidad de agua, en gráficos rosetas (histogramas de coordenadas polares). Los datos de los flotadores y de los correntógrafos usualmente se presentan también en gráficos de vectores progresivos (gráficas de secuencia "cola a cabeza") (Salas, 2000).

4.3.1 Corrientes de marea

En zonas costeras las corrientes dominantes son aquellas inducidas por el movimiento periódico en el nivel del mar. En áreas poco profundas y con fuertes variaciones en el nivel del mar las corrientes tienden a ser de gran magnitud. Las corrientes de marea son el principal mecanismo de transporte de la descarga del emisor y por lo tanto es fundamental establecer su intensidad y dirección para establecer parámetros tales como la excursión de la marea (distancia que se mueve una partícula durante un ciclo de marea).

La velocidad de la corriente de marea en la vertical puede ser descrita mediante un perfil logarítmico en donde la velocidad es casi uniforme en toda la columna de agua y decrece rápidamente cerca del fondo (Figura 4.4). Sin embargo, el perfil vertical de velocidad para flujos oscilatorios, con periodo (T) como la marea ha sido descrito por Prandle (1982). Por

lo tanto la ecuación que describe la estructura vertical de la corriente de marea está dada por:

$$\frac{U_T(z)}{\bar{U}} = \frac{e^{by} + e^{-by+2bH}}{R} + Q$$

Donde

U_T = Velocidad vertical para flujos oscilatorios, con periodo T (m/s)

\bar{U} = Es el promedio vertical de la velocidad (m/s)

z = Distancia vertical desde la superficie (m)

H = Profundidad del tirante de agua (m)

y = Variable que depende de z y H

b = Variable que depende de ω y N_z

ω = Frecuencia de la marea

N_z = Coeficiente de viscosidad de remolinos (Kg/m/s)

$$y = 1 - \frac{z}{H}$$

$$b = \left(\frac{i\omega}{N_z} \right)^{1/2}$$

$$R = (1 - \exp(2bH)) \times \left(\gamma - \frac{1}{bH} - 1 \right) - 2\exp(2bH)$$

$$Q = \frac{\gamma \times (1 - \exp(2bH)) - 1 - \exp(2bH)}{R}$$

$$\gamma = \frac{3\pi N_z b}{8k |\bar{U}|}$$

Considerando una distribución lineal para $N_z = \alpha \bar{U} H$ y con valores de:

$k=0.0025$ (adimensional)

$\alpha=0.0012$ (adimensional)

El perfil de Prandle provee una muy buena aproximación de la estructura vertical de la corriente de marea.

4.3.2 Corrientes inducidas por el viento

En zonas costeras el viento tiene una fuerte influencia sobre la superficie del agua. El viento transfiere energía o movimiento a la superficie del agua generando lo que se

conoce como circulación inducida por el viento. Asimismo, contribuye significativamente en la generación de oleaje y mezclado en la capa superficial. El esfuerzo del viento actúa sobre la superficie en dirección del viento y es expresado como:

$$\tau_s = C_D \rho_a W^2$$

Dónde:

τ_s = Esfuerzo del viento (Pa)

C_D = Coeficiente de arrastre, considerado como 1.3×10^{-3} (Adimensional)

ρ_a = Densidad del aire (Kg/cm^3)

W = Magnitud del viento (grados)

El esfuerzo del viento actuando sobre la superficie genera una corriente de deriva y modifica el esfuerzo cortante en la vertical. Se ha determinado empíricamente que la corriente inducida por el viento, en la superficie, es proporcional a la magnitud del viento. Típicamente, la corriente superficial (W_s) es considerada alrededor de 3% de la magnitud del viento (W).

Estudios experimentales llevados a cabo por W_u (1975) han mostrado que inmediatamente, debajo de la superficie libre, hay una capa, de espesor z_o , la cual se mueve uniformemente a una velocidad U_{ws} . El espesor de esta capa no se ha podido determinar pero se considera que es muy delgada. A partir de la profundidad z_o , la distribución vertical de velocidad tiene características del tipo de capa límite, con un fuerte gradiente de velocidad cerca de la interface agua-aire. Este puede ser representado por un perfil logarítmico que decrece en la vertical

$$U_W(z) = U_{ws} \left(1 - \frac{\ln(z/z_o)}{\ln(z_c/z_o)} \right)$$

Dónde:

U_w = Velocidad de deriva a la profundidad z (m/s)

U_{ws} = Velocidad de deriva a la profundidad z_o (m/s)

z_o = Espesor de la capa superficial (m)

z_c = Profundidad máxima a la cual el efecto del viento tiene influencia (m)

(Ver figura 4.4)

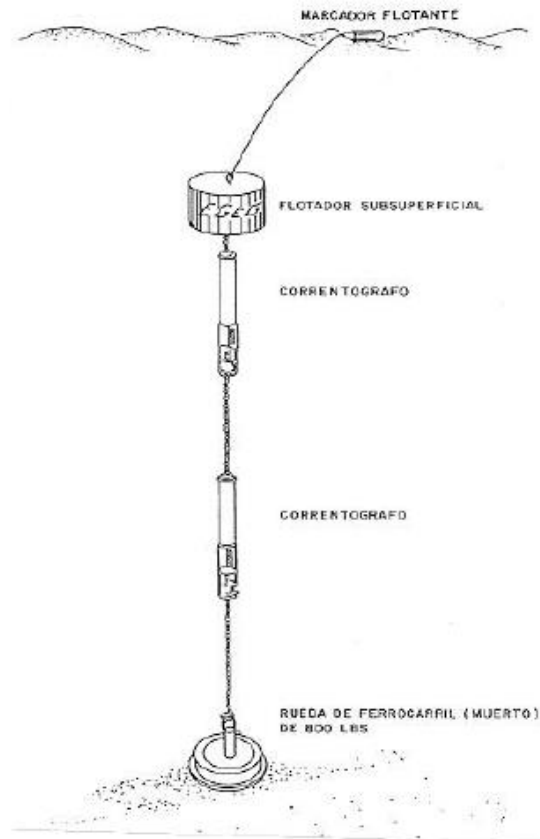


Figura 4.3 Amarre para dos correntógrafos (Hydroscience 1974)

4.4 OLEAJE

El oleaje tiene un efecto sobre las estructuras y también produce un transporte en dirección de la propagación de la onda debido a la derivada de Stokes. La deriva o transporte de Stokes depende de las características del oleaje que se esté presentando en el área de la descarga del emisor. La corriente superficial que se genera es también un parámetro importante en el transporte y dispersión de la pluma del emisor. El flujo horizontal debido al oleaje y el gradiente vertical de velocidad está dado por:

$$U_s(z) = \frac{\sigma k a^2 \cos h(2k(H - z))}{2 \sinh^2(kH)}$$

Dónde:

U_s = Gradiente vertical de velocidad (m/s)

z = Profundidad desde la superficie (m)

H = Profundidad de la columna de agua (m)

σ = Frecuencia de la onda $\{2\pi/T\}$ (rad/s)

k = Número de onda $\{2\pi/\lambda\}$ para ondas de periodo T y longitud de onda λ (rad/m)

Las características del perfil generado por el oleaje se describen en la figura 4.4.

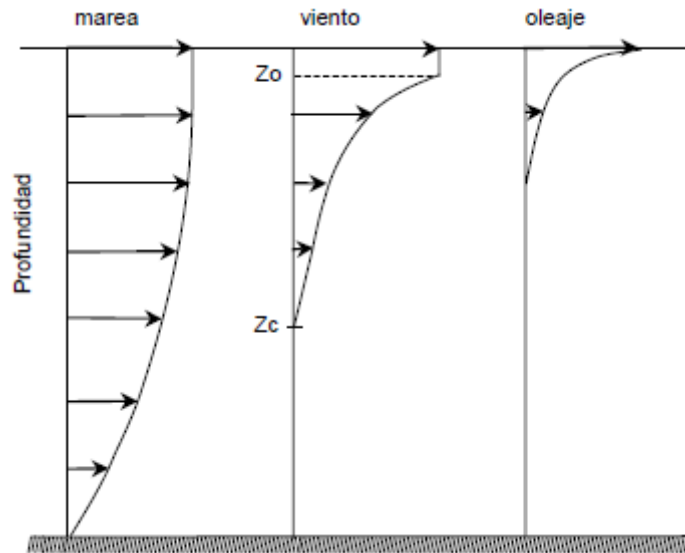


Figura 4.4 Esquema de los perfiles verticales de velocidad inducidos por la marea, el viento y el oleaje

4.5 MEDICIÓN DE T_{90}

La medición de T_{90} (tiempo necesario para la desaparición del 90% de coliformes) se puede efectuar en varias formas, y a continuación se presentan tres de éstas:

4.5.1 Medición in situ en mancha artificial

Se transporta un volumen grande de desechos al área propuesta de descarga y luego se mezcla con éste un trazador conservativo apropiado como Roadmina WT o una sustancia radioactiva. Esta mezcla se descarga en forma instantánea al medio marino y se toman varias muestras en el centro de la mancha y se mide la concentración inicial tanto del trazador como de los organismos indicadores (por ejemplo, coliformes totales y/o fecales). Se podría usar un fluorómetro a bordo que brindaría mediciones rápidas para definir concentraciones pico de tinte; esto es, la ubicación en donde deberían tomarse las muestras para realizar análisis subsiguientes de laboratorio para organismos indicadores.

Pearson (1971) sugiere que las muestras se tomen a 0,6-0,9m y a aproximadamente 3m debajo de la superficie, en el punto inicial de descarga y en posiciones subsiguientes en tiempos sugeridos de 10, 20, 30, 45, 90, 120, 180 y 240 minutos. No obstante, se requiere ajustes de campo y el criterio básico es que las muestras sean recolectadas en el lugar de la concentración pico del trazador. Los datos de coliformes resultantes se modifican para

dilución física, multiplicando la concentración de coliformes observada por la razón de la concentración inicial de tinte a la concentración de tinte observada en cualquier momento. Una línea recta de mejor correlación con los datos se dibuja en un gráfico semilogarítmico de datos modificados de coliformes versus el tiempo desde el cual se puede leer el valor de T_{90} .

Se hace notar que esta metodología incurre en altos costos debido a los grandes volúmenes de desechos y trazador requeridos, lo que depende de las condiciones ambientales.

4.5.2 Medición in situ en mancha existente

En esta metodología se descargan flotadores y tinte en un área de descarga existente de aguas servidas y se toman muestras, como se describe anteriormente, en la vecindad de los trazadores.

Estas muestras se analizarían para determinar el nivel de organismos indicadores (por ejemplo, coliformes totales y/o fecales) y otro parámetro de la descarga que pueda considerarse como conservativo en el ambiente marino sin sedimentación. La selección de este último parámetro dependerá de las características de la descarga de las aguas residuales. Aun cuando no se le considera como un parámetro conservativo, el ortofosfato disuelto ha sido utilizado con este propósito por ENCIBRA (1969) con la justificación que su decaimiento es, relativamente, mucho más lento que el de los organismos coliformes indicadores. Los datos resultantes se analizan tal como se describió anteriormente pero modificados con los datos del parámetro considerado como conservativo.

4.5.3 Medición en botellones

En esta metodología se usan bolsas transparentes o botellones, en los cuales se diluyen aguas servidas con agua de mar en razones esperadas después de la dilución inicial, por ejemplo, 1:100. Se colocan estos receptores en ubicaciones fijadas en el medio marino justo debajo de la superficie, cerca del litoral para mantener condiciones ambientales de temperatura y luz. Las muestras son tomadas cada 15 minutos para ser analizadas para coliformes totales y/o fecales. Este procedimiento reduce sustancialmente el costo y equipo eliminando el uso de un trazador conservativo y reduciendo los volúmenes requeridos de aguas servidas. Estos datos se grafican, versus tiempo, en papel semilogarítmico, tal como se describió anteriormente, pero no modificados. El uso simultáneo de receptores opacos (por ejemplo, pintados en negro) para simular condiciones nocturnas puede brindar información sobre las tasas nocturnas de mortalidad.

El uso de bolsas de diálisis puede complicar la situación en que se tiene que determinar las tasas de intercambio con las aguas marinas y los efectos de predadores no están incorporados.

Se señala que Acra *et al.* (1990) reporta que el vidrio ordinario transmite 90% de la radiación ultravioleta incidente considerando el componente germicida más importante de la luz solar. También, reporta que materiales plásticos transparentes, tales como plexiglás y otros acrílicos, así como materiales translúcidos tales como polietileno, son buenos transmisores de los componentes germicidas de la luz.

Por su simplicidad y bajo costo, en general, se recomienda esta metodología.

4.6 PROGRAMA DE MUESTREO DE CALIDAD DE AGUA

A fin de determinar una línea de base de calidad de agua en la zona de posible emplazamiento de una descarga que sirva como referencia para evaluar el desempeño de cualquier sistema de emisario submarino posterior a su construcción, se recomienda, siempre y cuando existan recursos, efectuar campañas de monitoreo incluyendo la toma de muestras en estaciones ubicadas estratégicamente desde el área de descarga hasta 300 metros aguas afuera de las playas más cercanas con un elevado uso para recreación.

En el caso de mar abierto, los parámetros primarios de medición serían los siguientes:

- Temperatura (perfil vertical)
- Salinidad (perfil vertical)
- Coliformes Totales o Fecales
- Oxígeno Disuelto (Preferentemente en la superficie, a media profundidad y sobre el fondo)
- pH (Preferentemente en la superficie, a media profundidad y sobre el fondo)
- Disco Secchi
- Sólidos suspendidos
- Grasa y aceite

La frecuencia de medición dependería de las condiciones locales, pero en general, dos o tres veces durante distintas épocas (por ejemplo, épocas lluviosa y seca) sería adecuada.

Para sistemas sin tratamiento o únicamente con pretratamiento, sería recomendable una evaluación para identificar y cuantificar los organismos de fondo para asesorar el posible impacto de la sedimentación de las partículas de la descarga.

Este programa se debe combinar con mediciones de la cantidad y calidad de aguas servidas. También sería de interés incluir mediciones de la cantidad y calidad de la escorrentía del área de estudio. Esto permitiría una evaluación del posible impacto de esta fuente de contaminación que continuaría posteriormente a la construcción del emisario submarino. Asimismo, se permitirán comparaciones entre las masas contaminantes provenientes de escorrentía y las de aguas servidas.

Además de lo anterior, se debe efectuar un programa rutinario de vigilancia de la calidad bacterial del agua en las principales playas, para coliformes totales y fecales u otro indicador en que se base las normas. De conformidad con las normas de calidad del agua para recreación de contacto primario en países tales como Brasil, México, EE.UU. entre otros, se recomienda una frecuencia de medición que sería de cinco veces al mes. En vista de los recientes estudios de Cabelli (1984), sería conveniente incluir la medición de Enterococci (U.S. EPA, 1985) en el programa de vigilancia, si fuera posible.

Cuando existe la posibilidad de eutrofización, como en el caso de la descarga en una bahía con limitado intercambio con el mar, los parámetros secundarios adicionales de medición serían los siguientes:

- Serie de Nitrógeno (N-orgánico, NH_4 , NO_2 , NO_3) (Preferentemente en la superficie, a media profundidad y sobre el fondo).
- Fósforo total y orto-fosfatos (Preferentemente en la superficie, a media profundidad y sobre el fondo).
- Clorofila 'a' (zona eufótica).
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (Preferentemente en la superficie, a media profundidad y sobre el fondo).

Sin embargo, se destaca que en la situación de descargas en mar abierto, la medición de estos parámetros secundarios no se considera imprescindible.

4.7 ESTUDIOS METEOROLÓGICOS

Concurrente con la medición de corrientes se debe registrar la velocidad y la dirección del viento cada hora a fin de correlacionar estos fenómenos.

4.8 ESTUDIOS BATIMÉTRICOS Y GEOLÓGICOS

Se debe estudiar la geología del fondo mediante un “botalón” sondas sonoras y buzos a fin de determinar la mejor ruta, evitando al máximo formaciones de rocas irregulares y

formación de corales si fuese posible. Se debe recolectar la información detallada de la batimetría a lo largo de la ruta propuesta para el emisario a la hora de diseñar.

4.9 UBICACIÓN DEL EMISOR

La ubicación del emisor debe hacerse con base en la consideración de factores, como:

1. Área requerida para que el difusor pueda ser fijado sin mayores problemas en el fondo marino.
2. Suficiente profundidad para que la densidad del agua del mar del fondo a la superficie permita atrapar la mayor parte del año la descarga de aguas residuales.
3. No se recomiendan profundidades mayores de 60 m, ya que esto incrementa sustancialmente los costos de construcción, instalación, así como los costos de mantenimiento e inspección.
4. Una vez determinada la ubicación y el tipo de difusor, se recomienda un trazo en línea recta de la tubería principal, con una ligera pendiente favorable al vertido por gravedad: de igual forma se recomienda evitar pendientes adversas.
5. Una localización adecuada en donde los vientos y las corrientes resultantes no favorezcan el movimiento de las descargas hacia las zonas a proteger
6. Evitar las zonas de corrientes marinas de fondo persistentes.

De igual forma, se recomienda que la zona de entrada al mar cumpla con las siguientes recomendaciones:

1. Cercanía a la planta de tratamiento o a los sistemas de bombeo.
2. Fácil acceso para la construcción e instalación y para los trabajos de supervisión posteriores.
3. Una zona estable en términos de la morfología de la zona costera.
4. Una zona libre de material rocoso, peñascos o acantilados.
5. Acceso rápido a canales submarinos de aguas profundas.

4.9.1 Análisis hidráulico de la tubería principal del emisor

Generalmente las plantas de tratamiento se encuentran localizadas algunas o decenas o centenas de metros de la línea de costa, por lo que el análisis hidráulico del emisor debe de incluir tanto la parte superficial como la parte submarina hasta antes de la unión con el sistema difusor. El análisis hidráulico debe realizarse con condiciones de operación mínimas, condiciones normales, y situaciones de emergencia como pasos súbitos de los sistemas de bombeo, lo que obliga a llevar a cabo una revisión de los transitorios. De la

misma forma el sistema difusor debe revisarse para estos casos de operación, conforme a la disposición y características físicas de los orificios o boquillas de descarga.

En el proceso de análisis de los diversos factores que determinan las características físicas del emisor dos parámetros son de importancia; la longitud y el diámetro interno de la tubería principal. Una vez seleccionados estos parámetros se procede a la revisión hidráulica de la tubería del emisor con diferentes condiciones de operación, como las que se enlistan en las tablas 4.1 y 4.2:

Tabla 4.1 Parámetros para el diseño hidráulico del emisor submarino

Parámetro	Definición
$Q_{\text{máx}}$	Gasto máximo de descarga
$Q_{\text{mín}}$	Gasto mínimo de descarga
Q	0.0 (Paro súbito)
Y	profundidad en la descarga
L_E	longitud de la tubería principal
L_z	longitud entre el eje de emisor y la zona de protección
D_E	Diámetro interno (con el que se calcula el área interna A_E)
V_E	Velocidad dentro de la tubería principal
Sc	Pendiente del terreno
So	Pendiente del fondo marino

Tabla 4.2 Recomendaciones para el diseño hidráulico del emisor y del difusor

Tubería principal del emisor	
1	$0.60 \text{ m/s} \leq V_E \leq 5.0 \text{ m/s}$; velocidad del flujo en el emisor
2	$Y \geq 15.00 \text{ m}$; profundidad de la descarga.
Diseño del difusor	
3	$L_D \geq 0.03 L_E$; longitud del difusor
4	$0.60 \text{ m/s} \leq V_D \leq 5.0 \text{ m/s}$; velocidad del difusor
5	$nA_B \leq 0.75 A_E$; área total de boquillas; siendo n el número de boquillas; A_B el área de cada boquilla y A_E el área del emisor
6	$S = Y/3$; separación de boquillas
7	$d \geq 0.075 \text{ m}$, diámetro de cada boquilla
8	$V_B \leq 5.00 \text{ m/s}$; velocidad en la salida o boquilla

La revisión hidráulica debe tomar en cuenta las recomendaciones contenidas en la tabla 4.2 (Verbestel et al, 1981; Aarne, 1995). Las variables de la tabla 4.2 están indicadas en las figuras 4.5 y 4.6.

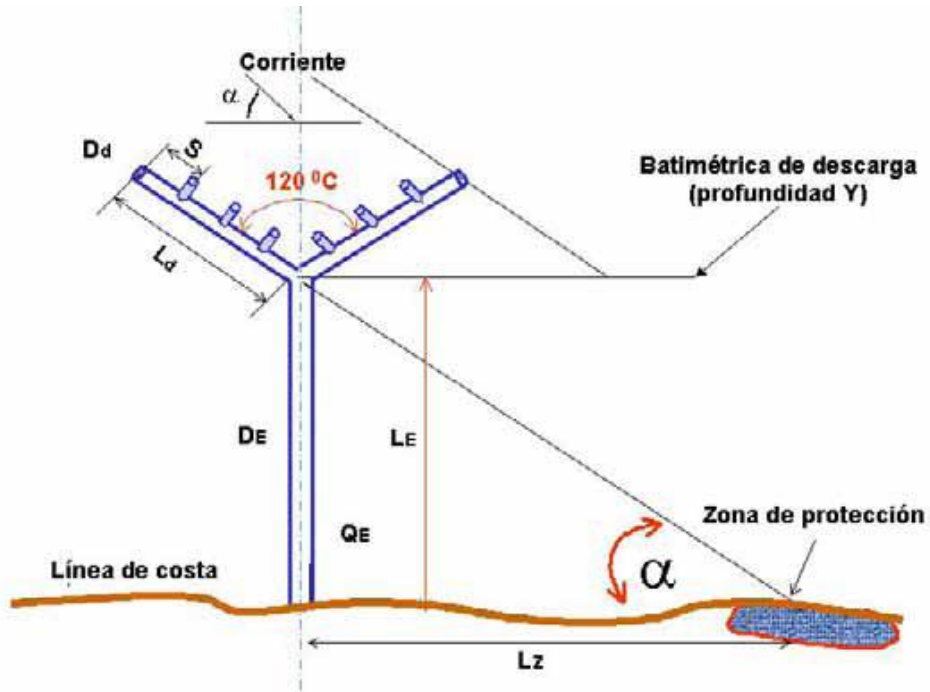


Figura 4.5 Variables y elementos geométricos para el diseño del emisor y difusor submarino

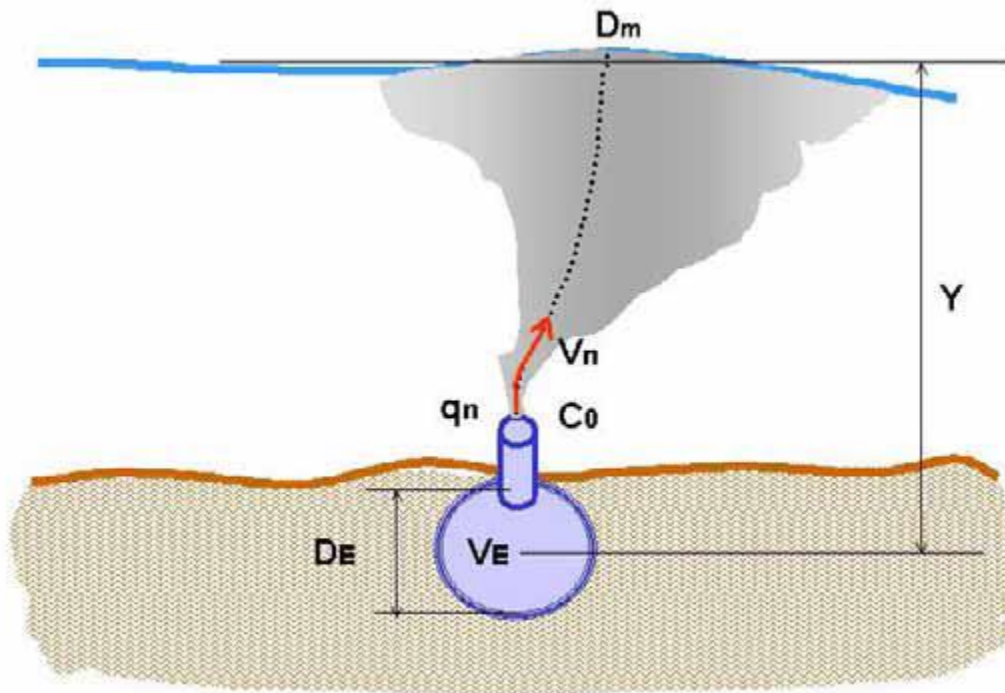


Figura 4.6 Definición de variables en el difusor submarino

Así para una configuración como la que se indica en la figura 4.7, en donde se incluye una disposición convencional y sin cambios abruptos de pendiente, entre los tramos 1-2 y 2-3, y se supone que el flujo escurre completamente por gravedad desde la salida de la planta de tratamiento hasta la llegada al difusor. El balance de energía entre los puntos 1 y 2 puede calcularse con la relación de las energías (o carga hidráulica), con respecto a un cierto nivel de referencia, como se indica en la siguiente ecuación:

$$H_{1-2} = E_2 - E_1 + \sum h_{f1-2} = \left(Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \right) - \left(Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} \right) + \sum h_{f1-2}$$

Dónde:

H_{1-2} = Balance de energía entre los puntos 1 y 2

$\sum h_{f1-2}$ = Suma de todas las perdidas en el tramo, por fricción y locales si es que las hubiera (m)

E_2 y E_1 = Cabeza de energía en el punto 2 y en el punto 1, respectivamente (m)

Z_2 y Z_1 = Cabeza de posición en el punto 2 y en el punto 1, respectivamente (m)

$\frac{p_2}{\gamma}$ y $\frac{p_1}{\gamma}$ = Cabeza de presión en el punto 2 y en el punto 1, respectivamente (m)

$\frac{V_2^2}{2g}$ y $\frac{V_1^2}{2g}$ = Cabeza de velocidad en el punto 2 y en el punto 1, respectivamente (m)

Se asumen los coeficientes hidrodinámicos de Boussinesq,

α_1 y $\alpha_2 = 1$

De anterior puede llegarse a la formulación siguiente para establecer la velocidad en la sección 2:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2gh}{\left(1 + f \frac{L_{1-2}}{D_{1-2}}\right)}}$$

Dónde:

V_2 = Velocidad en la sección 2 (m/s)

f = Factor de fricción (adimensional)

h = Diferencia de posición entre Z_1 y Z_2 (m)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

L_{1-2} = Longitud entre los puntos 1 y 2 (m)

D_{1-2} = Diámetro entre los puntos 1 y 2 (m)

Esta formulación nos lleva a un proceso iterativo que está en función de la rugosidad, del factor de fricción, del diámetro del tubo y de la misma velocidad. La velocidad V_2 que se obtenga debe de cumplir con la recomendación hidráulica 1 indicada en la Tabla 4.2.

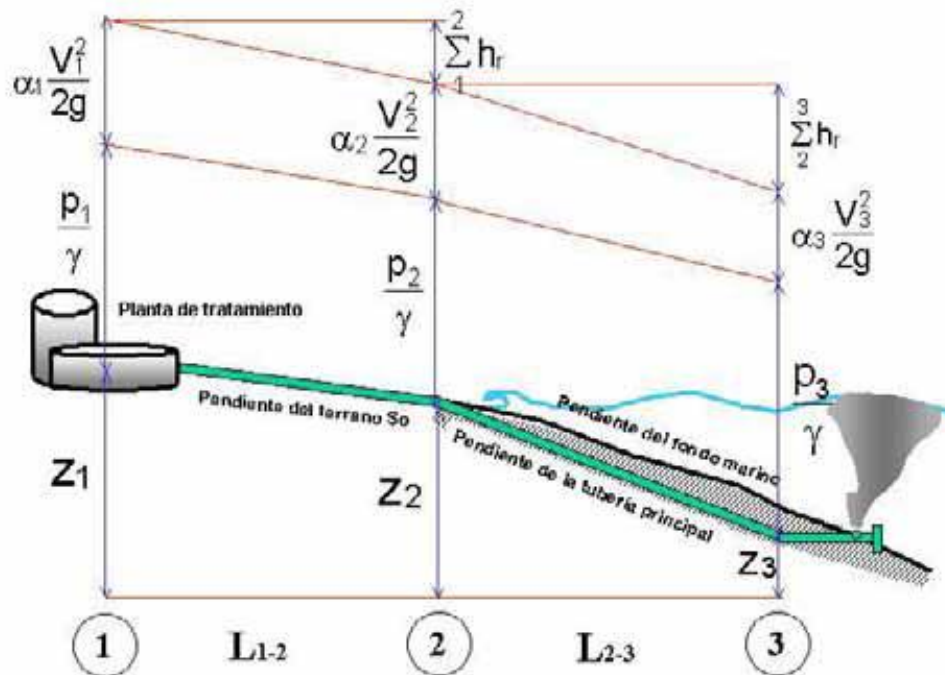


Figura 4.7 Disposición convencional de un sistema emisor submarino

De la misma forma debe de revisarse la disposición de energía del tramo submarino que va de la línea costera (2) al punto de unión con el difusor (3) y la velocidad V_3 con que se llega a la estructura difusora. En todos los cálculos que se realicen deben de revisarse que se cumpla con las condiciones hidráulicas enunciadas anteriormente.

Para el caso de que existan topografías accidentadas, para cuando la planta de tratamiento se encuentre lejos de la línea de costa, deberá revisarse la necesidad de incluir sistemas de bombeo para satisfacer los requerimientos necesarios. En este caso se requerirá de incluir en las ecuaciones de balance energético la carga adicional proporcionada por estos sistemas. Situación similar se requerirá si no se tiene la energía necesaria para cumplir con las recomendaciones hidráulicas de la tabla 4.2.

Por último, deberá revisarse el sistema para condiciones extraordinarias, por ejemplo, cuando existan fallas de los sistemas de bombeo, cierres en el difusor, por cuestiones de operación o de mantenimiento del emisor. En estas condiciones las sobrepresiones producidas deberán incluirse en el balance de energía. Sea cual fuera el resultado de la maniobra que se realice, de este análisis deberá decidirse si se requieren de sistemas o dispositivos aliviadores de presión y la ubicación de los mismos.

4.10 REVISIÓN HIDRÁULICA DEL DIFUSOR

La dilución inicial se incrementa sustancialmente si se diseña un difusor de bocas múltiples. Sin el uso de difusores, permaneciendo invariables las otras condiciones, se requieren salidas mucho más largas en aguas profundas para proporcionar el mismo grado de dilución, sobre todo si se descarga por la misma tubería. En la literatura especializada se reportan recomendaciones de difusores de una sola salida, cuando el diámetro del emisor es menor 0.150 m (Verbestel *et al*, 1981), sin embargo, suelen encontrarse diseños de diámetro mayor. Existen también difusores de gran diámetro con varios puertos de salida y de diferentes tipos de material que pueden ser entre otros, tuberías de polietileno de alta densidad.

Para difusores de dos brazos existe la recomendación de que ambos brazos sean de igual longitud y que éstos sean conectados en forma de “Y” con ángulo interno entre ellos de 120° (Verbestel *et al*, 1981; Aarne, 1995).

Para un difusor con varios puertos de salida se requiere que a lo largo del difusor exista suficiente energía hidráulica para asegurar la salida de las aguas residuales a través de las boquillas; se recomienda utilizar la siguiente ecuación:

$$q_i = C_{Di} A_b \sqrt{2gE_i}$$

Dónde:

q_i : el gasto por la boquilla “i” (m^3/s)

C_{Di} : coeficiente de descarga (adimensional)

A_{bi} : área de la boquilla “i” (m^2)

E_i : carga total en la tubería en una sección inmediatamente aguas arriba de la boquilla “i” (m)

g : aceleración de la gravedad (m/s^2)

Si la boquilla del extremo (hacia el mar) se le asigna el número 1, el gasto será:

$$q_1 = C_{D1} A_{b1} \sqrt{2gE_1}$$

Donde $E_1 = h_1 + V_1^2/2g$

Siendo:

E_1 = Cabeza de energía en el punto 1 (m)

h_1 = Diferencia de cargas de presión a la salida de la boquilla y en la sección del difusor inmediatamente aguas arriba de la boquilla (m)

$V_1^2/2g$ = Cabeza de velocidad en el punto 1 (m)

Para la penúltima boquilla designada con el número 2, el gasto será:

$$q_2 = C_{D2} A_{b2} \sqrt{2gE_2}$$

En esta última ecuación,

E_2 = Energía en el punto 2, resulta ser $E_1 + h_f$ (m)

Donde h_f (m) es la pérdida de carga entre dos boquilla consecutivas

Para el resto de las boquillas se procede de igual forma.

Con las energías necesarias para lograr la salida de los gastos de cada boquilla y conocida la pérdida de carga del difusor, que sumada a la pérdida de carga a lo largo de la tubería principal del emisor desde la salida de la planta de tratamiento, se puede determinar bajo la utilización de la ecuación de la energía si existe una energía remanente y si es necesario calcular cajas rompedoras de presión para contar con la carga hidráulica necesaria de operación.

En el diseño y la revisión hidráulica del difusor deberá de tomar en cuenta las recomendaciones dadas en la tabla 4.2.

4.11 ASPECTOS TÉCNICOS DE DISEÑO

Como se ha mencionado, una descarga submarina tiene siempre un propósito fundamental y la selección de la conducción se realiza con un procedimiento que puede definirse con los siguientes pasos:

- Elegir un horizonte de planeación o de vida útil, que puede ser de 30 a 50 años
- Determinar la longitud total de la tubería y el diámetro
- Determinar el tipo de material de la tubería principal. Lo cual está ligado con un espesor mínimo de la tubería.
- Determinar las cargas piezométricas a lo largo de la tubería de conducción.
- Estimar el total de pérdidas en la conducción.
- Calcular los esfuerzos a los que estará sometida la tubería.
- Calcular los refuerzos a lo largo de la tubería; los refuerzos pueden ser tanto internos como externos y están en función de la presión hidrostática, las sobrepresiones máximas, los esfuerzo de trabajo del material de la tubería, los esfuerzos de la dinámica del mar, efectos extraordinarios como los requerimientos para soportar el paso de huracanes, etc. Además debe de considerarse un factor de seguridad en el cálculo de los esfuerzos.

El diámetro del emisor se determina en función de los volúmenes de agua por verter, los cuales a su vez, están en función del número de habitantes por servir. Una relación de

Criterios de diseño

diámetros y número de habitantes por servir se encuentra en la tabla 4.3, aunque es indispensable que cada caso se revise para las condiciones y requerimientos particulares.

Tabla 4.3 Relación diámetro/habitantes para el diseño de emisores submarinos

Diámetro (mm)	Habitantes
160	5,000
200	8,000
225	14,000
250	20,000
280	26,000
315	35,000
355	43,000
400	60,000
450	75,000
500	86,000
252	100,000

NOTA: 200 litros/persona/día

Relación de gastos max/min = 2

Velocidad del gasto máx 1,5 – 2,5 m/s

Con respecto a los refuerzos, éstos casi siempre son necesarios y van en diferentes proporciones en conjunto con la tubería, en general se tienen refuerzos internos en forma de anillos y refuerzos externos que pueden ser cinturones envolviendo la tubería o bien líneas de refuerzo longitudinales que acompañan a la tubería (figura 4.8).

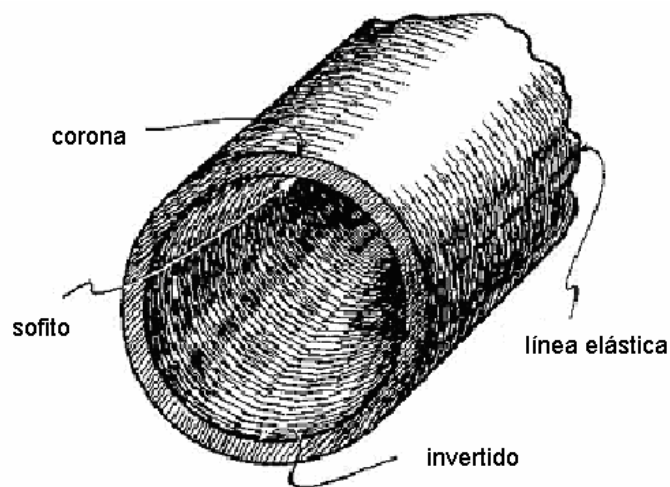


Figura 4.8 Términos descriptivos de una tubería de acero

4.12 SELECCIÓN DEL MATERIAL

La elección del material depende de varios factores como son: el tipo y la calidad de las aguas por verter, el rango de gastos, el tipo de suelo, la longitud total de la tubería, la topografía del fondo, el procedimiento de construcción, el área de manipulación para la instalación, etc. Es común encontrar diseños con diferentes materiales, por ejemplo combinaciones en acero y concreto, o acero con polietileno de alta densidad.

Pearson (1956) da una estadística de 145 emisores submarinos y sus materiales en el mundo: de éstos, 65 son de hierro fundido o moldeado; 39 de concreto reforzado (acero-concreto); 19 de hierro forjado; 15 de acero 4 de madera tratada; 2 de acero corrugado y 1 de arcilla tratada. Desde 1956 no aparecen reportados algunos de estos materiales como hierro fundido o forjado, madera tratada, acero corrugado y arcilla tratada. Por el contrario tuberías de concreto reforzado ha venido a ser muy popular así como las tuberías de acero. Recientemente se han venido utilizando tres tipos de materiales sintéticos; polietileno de alta densidad (PEAD), poli-cloruro de vinilo (PVC) y tuberías de fibra de vidrio reforzada.

En las tablas 4.4 y 4.5 se indican algunas de las características físicas, químicas y biológicas, que agrupan la resistencia de los materiales contra la tensión, corrosión, microorganismos, flexibilidad y un referente en cuanto a que tan costoso pudiera ser la elección de un tipo de material.

Tabla 4.4 Características de los materiales usados

Clase de material	Resistencia contra				Flexibilidad del sistema
	Tensión	Impacto	Corrosión	Micro organismos	
Hierro fundido	Buena	Mala	Mala	Media	Mala
Hierro dúctil	Excelente	Excelente	Mala	Media	Media
Acero	Superior	Superior	Mala	Media	Buena
Concreto	Buena	Buena	Buena	Buena	Mala
Fibra de vidrio	Media	Media	Buena	Buena	Media
PVC	Mala	Mala	Buena	Mala	Buena
PEAD	Mala	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Poli-propileno	Mala	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Poli-butileno	Media	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente

Tabla 4.5 Estimaciones de costos referentes al tipo de material

Clase de material	Costos		
	Material	Construcción	Facilidad de construcción.
Hierro Fundido	Medio	Alto	Medio
Hierro Dúctil	Medio	Alto	Medio
Acero	Medio	Medio	Fácil
Concreto	Bajo	Alto	Difícil
Fibra de vidrio	Alto	Medio	Medio
PVC	Bajo	Medio	Fácil
PEAD	Medio	Bajo	Fácil
Poli-propileno	Medio	Bajo	Fácil
Poli-butileno	Medio	Bajo	Fácil