

5. EMISARIO SUBMARINO DE CARTAGENA D.T. Y C.

Este capítulo se elaboró con información suministrada por la empresa prestadora de servicios ACUACAR – Aguas de Cartagena.

5.1. ANTECEDENTES – NECESIDAD

Siendo Cartagena de Indias, una de las cinco ciudades más importantes de Colombia, es llamativo que hasta el año 1997 permanecía aún con cubrimiento de alcantarillado sanitario de un 60%.

El Plan Maestro concebido en ese mismo año por la Empresa operadora recién conformada por la combinación de fondos públicos y privados, definió el horizonte ambicioso de cubrir el 95% de la ciudad y organizar la disposición de las aguas con un tratamiento adecuado, saneando los cuerpos receptores actuales, que son a su vez los tres cuerpos de agua más relevantes de la ciudad, la Bahía de Cartagena, la Ciénaga de Tesca y el mar Caribe.



Figura 5.1 Ubicación de los cuerpos de agua afectados por el proyecto

5.1.1. Problemática de alcantarillado en la ciudad

Hacia el año de 1996, Cartagena contaba con una población aproximada de 750 mil habitantes. Por estar localizada a orillas del mar Caribe, Cartagena es una ciudad turística y un Puerto Comercial por donde se mueven alrededor de 700 mil turistas y 10 millones de toneladas de carga anualmente.

En los últimos 50 años la ciudad creció vertiginosamente (tabla 5.1), y esto generó un gran aumento de los caudales de aguas residuales sin que la ciudad contara con la infraestructura acorde.

Tabla 5.1 Crecimiento demográfico en Cartagena

| Año | Población |
|------|-----------|
| 1960 | 180.000 |
| 1980 | 400.000 |
| 2000 | 800.000 |

Hasta el momento en que inició el estudio de la solución, había sido muy difícil dotar a la ciudad de la infraestructura básica para atender las necesidades de la población, y las dificultades de tipo técnico se daban partiendo por la topografía y disposición del paisaje, pues Cartagena se ubica y crece entre tres cuerpos de agua: Bahía, Ciénaga de Tesca y Mar Caribe y tiene un relieve relativamente plano a excepción de una pequeña área llamada el Cerro de La Popa.

También se presentaban múltiples dificultades de tipo administrativo, pues los recursos para el proyecto no habían sido dispuestos y el antiguo operador no logró construir la infraestructura acorde con las necesidades de saneamiento de la ciudad.

Para el año 1997 las aguas residuales de la ciudad se disponían de la siguiente manera:

Tabla 5.2 Caudales de aguas residuales que descargan a los cuerpos de agua de Cartagena (año 2000)

| Caudal (m ³ /día) | Ciénaga de Tesca | Bahía de Cartagena | Total |
|------------------------------|------------------|--------------------|---------|
| Por el alcantarillado | 62.400 | 44.000 | 106.400 |
| Por caños y lagunas | 25.000 | 12.600 | 37.600 |
| Total | 87.400 | 56.600 | 145.000 |

Con lo que se resume que el 60% de las aguas residuales eran descargadas a la Ciénaga de Tesca (Ciénaga de la Virgen) y el 40% restante a la bahía de Cartagena.

Estos dos cuerpos se comunican con el Mar Caribe, pero no cuentan con los suficientes canales de interacción que permitan que se genere un proceso adecuado de oxigenación, por lo que a la fecha del estudio su estado de contaminación es considerablemente alto. Presentan altas concentraciones de bacterias y materia orgánica, y los impactos asociados a esta situación traen consigo:

- Riesgos de enfermedades por uso de las aguas para consumo y fines recreativos por parte de la comunidad aledaña. Esto se presentaba en la margen contigua a la Ciénaga de Tesca.
- Riesgos de enfermedades, e intoxicación por consumo de alimentos obtenidos de la pesca en estos cuerpos: mariscos, almejas, pescado y demás frutos del mar.
- Pérdida de potencial turístico por el desarrollo de olores fétidos e incremento de zonas de visible afectación que deterioran el paisaje.

5.1.2. Alternativas de solución analizadas

Partiendo de considerar todas las posibles opciones de disposición de efluentes, la ciudad se planteó cuatro grandes opciones:

- 1) Bahía de Cartagena
- 2) Ciénaga de la Virgen
- 3) Mar Caribe
- 4) Reutilización en actividades agrícolas

Las opciones 1 y 2 se eliminan con inmediatez, por la limitada capacidad de asimilar desechos que tienen ambos cuerpos y máxime que después de que han tenido este uso incorrecto extendido durante 40 años, su naturaleza de dilución está agotada.

5.2. MEJOR OPCIÓN

Con el exponencial aumento de la población en el planeta se ha aumentado la cantidad de desechos producto de las actividades diarias del hombre y la industria, que al tener un aumento en la demanda ha incrementado su oferta, y consigo los desechos de sus procesos. Gran parte de las aguas servidas proveniente de las actividades anteriores terminan en aguas continentales, afectando su calidad y la vida que en ellos habita.

Una solución para la reducción de la contaminación en los cuerpos de aguas superficiales como ríos, ciénegas y lagos, es eliminar los vertimientos de aguas servidas y llevarlos hacia aguas marinas a través de emisarios submarinos. Un emisor submarino diseñado apropiadamente provee de un mecanismo eficaz para mitigar la contaminación contenida en las aguas residuales, ya que se pueden alcanzar diluciones inmediatas iniciales del orden de 100 a 1 en forma consistente durante los primeros minutos de descarga, lo que reduce la concentración de materia orgánica y nutrientes a niveles que no tendrían efectos ecológicos adversos en el mar abierto (Comisión Nacional del Agua, 2007).

Frente a la problemática vivida en Cartagena de aumento de población y contaminación de los cuerpos de aguas principales de la ciudad, surgió la necesidad de construir un emisario que ayudará a minimizar los efectos adversos que traía

consigo la gran carga de vertimientos a la Bahía de Cartagena y a la Ciénega de Tesca. Para el diseño y construcción de este emisario se realizó una selección detallada del tratamiento de aguas servidas a realizarse antes de ser vertida al océano, siendo la decisión final un tratamiento preliminar que separa el 99% del material flotante y un 30% de grasas y aceites, impidiendo su llegada al mar. Entre otros beneficios identificados con la implementación de este sistema de vertimiento se encuentran:

- Provee la infraestructura de aguas residuales para permitir el crecimiento organizado del Distrito de Cartagena mientras se protege la salud pública.
- Provee un programa de manejo de desechos sólidos a corto y a largo plazo de manera costo-efectiva para los residentes de Cartagena.
- El plan es flexible y permite la adición de más facilidades de tratamiento en el futuro, si fuese necesario.
- Mejora calidad de vida de los residentes de Cartagena y la economía del Distrito mismo.

Para la construcción del emisario fue necesario contar con una infraestructura complementaria que permitiera la conducción de las aguas hacia su destino final. Esta infraestructura cuenta con la Estación de Bombeo Paraíso ubicada en el suroriente de la ciudad, que recoge las aguas residuales en las áreas de servicio de Bahía y Ciénega de Tesca, para posteriormente ser impulsadas por una tubería de 23,75 km de longitud hacia la planta de tratamiento preliminar ubicada en Punta Canoa, y finalmente dirigidas al mar a través del emisario submarino (Figura 5.2).



Figura 5.2 Sistema de Disposición Final de las Aguas Residuales de Cartagena

5.3. CRITERIOS DE DISEÑO

Para el emisario submarino de la ciudad de Cartagena se tuvieron en cuenta los criterios descritos a continuación.

5.3.1 Caudales de diseño

Las aguas residuales recogidas en las áreas de servicio de Bahía y Ciénaga de Tesca son transportadas mediante interceptores hasta la estación de bombeo Paraíso. Dicha estación de bombeo impulsa las aguas residuales por una tubería de 23,75 kilómetros de longitud hasta una profundidad de 20 metros en el océano. ACUACAR diseñó sus estaciones de bombeo para manejar factores de hora pico de 1,5. Las estaciones han

Ejemplo: Emisario Submarino de Cartagena

sido diseñadas para rebosar a arroyos, caños u otros cuerpos de agua cercanos en el caso que los caudales excedieran ese valor. Se calculó un caudal máximo de 340.000 m³/día para el año 2025.

5.3.2 Consideraciones sobre el bombeo

La carga de bombeo (CDT-metros) es una función de la pérdida por fricción en una tubería larga. Duplicar el caudal resulta en cuadruplicar la carga de bombeo, dado que la pérdida por fricción aumenta en el cuadrado del caudal (Q^2 o V^2). Esto se ilustra en la siguiente tabla:

Tabla 5.3 Carga Dinámica Total (metros)

| Caudal m ³ /día | Diámetro de tubería mm (pulgadas) | | |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------|------------|
| | 1.680 (66) | 1.830(72) | 1.980 (78) |
| 200.000 | 14 | 9 | 6 |
| 250.000 | 21 | 13 | 9 |
| 300.000 | 29 | 19 | 13 |
| 350.000 | 38 | 25 | 17 |
| 400.000 | 49 | 32 | 22 |

**Basado en un coeficiente de rugosidad de Hazen- Williams de 120 y longitud de tubería de 23.700m*

La mayor parte del tiempo los caudales están entre 200.000 y 265.000 m³/día. La carga de bombeo aumenta a medida que crece el caudal.

5.3.3 Hidráulica del sistema

La evaluación hidráulica consiste en calcular las pérdidas que se producen a lo largo de la tubería con el caudal de diseño que definen la carga necesaria que debe tener la caja de salida de la Planta de Punta Canoa para que no existan rebosamientos.

Para realizar los cálculos, la tubería se divide en tres tramos debido a sus diferencias hidráulicas por diferente tipo de material o características hidráulicas. De esta forma, el primer tramo se refiere a la tubería de 1.800 mm de diámetro de GRP (Glass Reinforced Plastic- Plástico Reforzado con Vidrio) en una longitud de 2.038 metros, el segundo tramo consiste en la tubería de PEAD (Polietileno de Alta Densidad) de 2.000 mm de diámetro exterior en una longitud de 3820 metros y el tercer tramo corresponde a la tubería de PEAD de 2.000 mm de diámetro exterior donde se encuentran los difusores en una longitud de 500 metros.

Para identificar las limitaciones hidráulicas del sistema, se calculó un perfil hidráulico con un coeficiente de rugosidad Hazen-Williams de 120. Las elevaciones del terreno fueron verificadas mediante un estudio de reconocimiento de niveles, a lo largo de cada segmento del corredor de la tubería correspondiente y fue calculado con base a:

- Coeficiente de rugosidad Hazen-Williams 120
- Caudal pico 340.000 m³/día
- Longitud de la tubería 23.700 m
- Diámetro de la tubería 1.830 mm (72 pulgadas)

- Pérdida de carga en planta de tratamiento 3 metros

La velocidad de la tubería de 1.830 mm (72 pulgadas) y los caudales de diseño son los siguientes:

Tabla 5.4 Tubería de 1.830 mm de diámetro versus caudales de diseño

| CONDICIÓN | Caudal (m ³ /día) | Velocidad (m/seg) |
|-----------------|------------------------------|-------------------|
| Año 2005 | | |
| Promedio | 180.000 | 0,80 |
| Max | 270.000 | 1,20 |
| Min | 90.000 | 0,38 |
| Año 2015 | | |
| Promedio | 227.000 | 1,00 |
| Max | 340.000 | 1,50 |
| Min | 113.000 | 0,50 |
| Año 2025 | | |
| Promedio | 303.000 | 1,33 |
| Max | 340.000 | 1,50 |
| Min | 150.000 | 0,67 |

5.3.4 Características de las aguas residuales

El diseño se realizó para que en la etapa inicial se contara con tratamiento preliminar consistente de millamices y desarenadores tipo vórtice. La apertura de los millamices varía entre 5,5 y 1,0 mm. Todo el caudal pasa por las bombas, lo que reduce el tamaño de partículas de sólidos a 2 mm o menos. Las características físicas de las aguas residuales crudas se observan en la tabla 5.5.

Tabla 5.5 Características de las aguas residuales domésticas crudas de Cartagena

| Parámetro | Valor |
|------------------------------|----------------------|
| Oxígeno disuelto | 0,9 -1,3 mg/litro |
| Potencial de óxido reducción | (-)240 a (-)280 mv |
| Temperatura | 29-31 ⁰ C |
| pH | 6,9-7,2 |
| Cloruros | 400-1000 mg/litro |
| Sulfitos totales | 5-9 mg/litro |
| Sulfitos disueltos | 4-7 mg/litro |
| DBO ₅ | 200-300 mg/litro |
| SST | 200-350 mg/litro |
| Esfera máxima de sólidos | 2 cm |

SISTEMAS DE VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES A TRAVÉS DE EMISARIOS SUBMARINOS. EJEMPLO DE APLICACIÓN: EMISARIO SUBMARINO DE CARTAGENA.

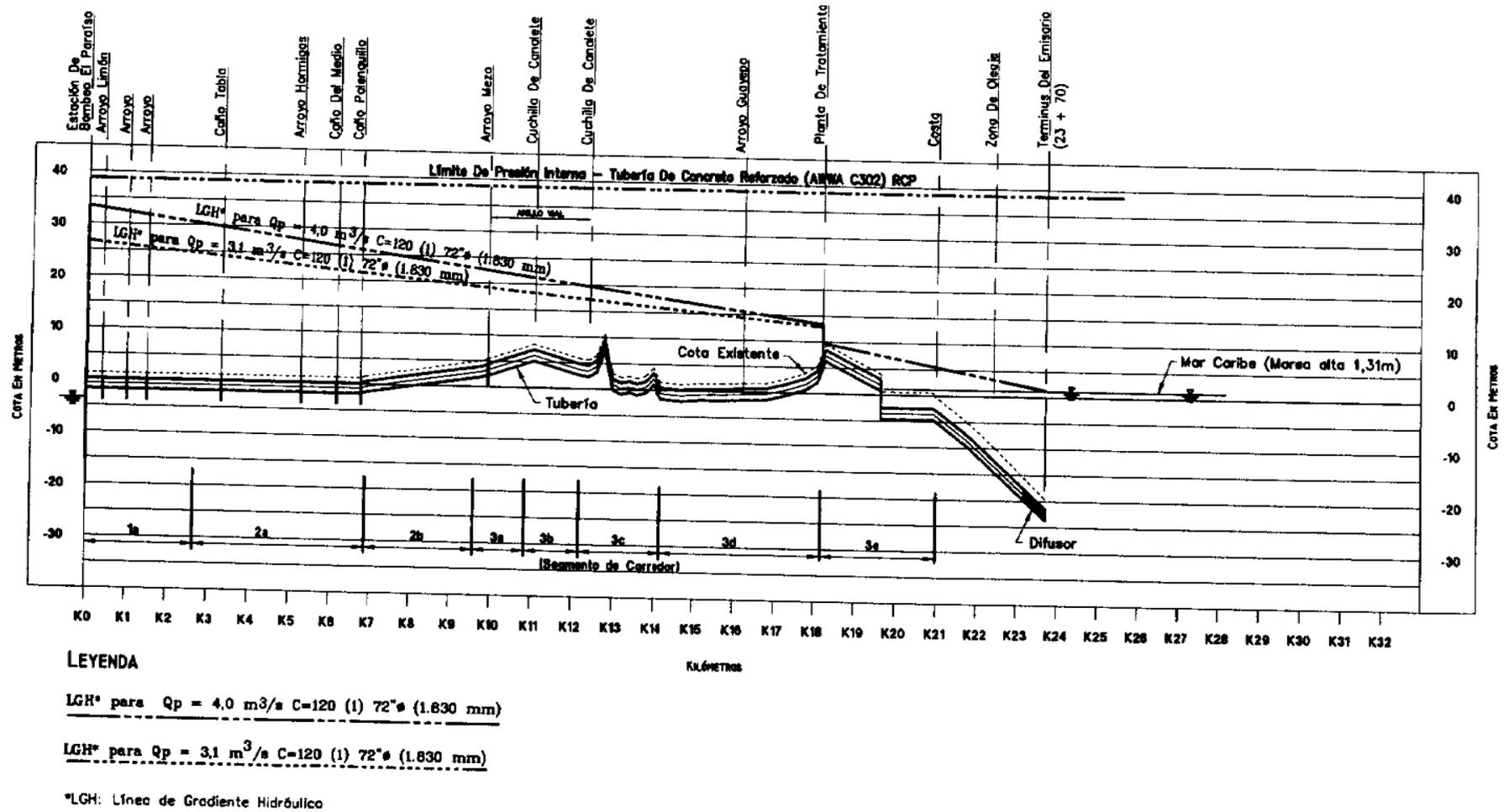


Figura 5.3 Perfil hidráulico

5.3.5 Criterios oceanográficos

* Magnitud de la corriente

Las corrientes en el área de Punta Canoas han sido medidas entre 1 y 80 cm/s promediados en la columna de agua (tabla 5.6). Las corrientes en el sitio del difusor varían durante el día por la hidrodinámica de la zona.

Tabla 5.6 Estadística mensual de las velocidades de la corriente

| Mes | Promedio | Máximo | Percentil | | |
|------------|----------|--------|-----------|------|------|
| | | | 10th | 50th | 90th |
| Enero | 26,5 | 84,1 | 6,0 | 24,9 | 49,5 |
| Febrero | 23,2 | 63,7 | 4,5 | 23,1 | 41,7 |
| Marzo | 23,7 | 84,1 | 5,1 | 20,4 | 48,0 |
| Abril | 24,4 | 65,7 | 5,5 | 24,0 | 42,8 |
| Mayo | 13,1 | 43,8 | 3,3 | 11,1 | 26,3 |
| Junio | 14,8 | 64,5 | 3,7 | 19,9 | 28,7 |
| Julio | 15,2 | 66,6 | 3,4 | 13,0 | 31,1 |
| Agosto | 19,2 | 65,9 | 4,9 | 17,3 | 35,3 |
| Septiembre | 17,7 | 78,2 | 3,7 | 15,3 | 33,8 |
| Promedio | 19,9 | *84,1 | 4,2 | 17,2 | 39,3 |
| *Máximo | | | | | |

* Oleaje

La recopilación de datos de oleaje en el diseño de un emisario es utilizada para determinar las fuerzas que actúan en la tubería del emisario y los periodos de calma que facilitan la construcción del emisario. Los datos de la tabla 5.6 indican que el periodo de mayor oleaje ocurre durante la temporada seca (enero, febrero y marzo). Este patrón de oleaje es consistente con las observaciones de campo llevadas a cabo durante trabajos de medición de las corrientes.

* Dilución inicial

La dilución inicial (explicada en el capítulo anterior) se estimó con el modelo RSB para el difusor propuesto, que incluye 162 orificios instalados en la parte superior de la tubería. Esta simulación se basa en una profundidad de 20 metros. El valor de 100 a 1 para la dilución inicial se utilizó en la modelación para evaluar los impactos del efluente del emisario. Este valor se alcanza con corrientes de mínima velocidad. En realidad, el valor de dilución inicial para el valor de corriente promedia alcanza 188 a 1 (ver tabla 5.7).

Modelo RSB: está basado en estudios descritos en Roberts, Snyder y Baumgartner (1989) sobre ensayos con difusores de múltiples boquillas vertiendo en un medio estratificado con corrientes.

La configuración de dicho difusor corresponde a un tramo recto, de descarga horizontal a través de múltiples boquillas circulares, uniformemente espaciadas y colocadas en ambos lados del difusor. En cuanto al medio receptor, se considera que está estratificado según un perfil definido por el usuario y con corriente constante formando un ángulo arbitrario con el eje del difusor.

Mediante el uso de este modelo se pueden conseguir buenas aproximaciones para plumas características del vertido de aguas residuales urbanas e industriales en aguas costeras y estuarinas. A su vez, puede predecir diluciones en aquellos casos en los que la pluma suba a la superficie, debido a que la descarga se produzca en un medio débilmente estratificado o incluso sin estratificación

Tabla 5.7 Dilución inicial

| Velocidad de la corriente (cm/s) | Dilución inicial |
|---|-------------------------|
| 5 | 96 |
| 10 | 150 |
| 15 | 232 |
| 20 | 188 |
| 25 | 338 |
| 30 | 386 |
| 35 | 430 |
| 40 | 472 |

5.3.6 Requerimientos de Tratamiento para disposición mediante Emisario Submarino

Bajo las alternativas de disposición marina, el efluente de la planta de pretratamiento de aguas residuales es llevado por medio de un emisario a una ubicación y profundidad dados, donde se dispone el efluente de la planta en las aguas del Mar Caribe. El efluente descarga a una velocidad relativamente alta por las boquillas del difusor del emisario, formando una pluma de efluente que se mezcla con el agua salada.

La mezcla y dispersión del efluente ocurre debido a la turbulencia generada por la descarga del efluente y debido a la velocidad de la corriente. Cerca de las boquillas del difusor, la fuente principal de la turbulencia es el esfuerzo cortante, inducido por la inercia de la descarga del efluente y por la fuerza de flotación. Las corrientes locales modifican y aumentan la turbulencia autoinducida. Esta región ha sido denominada el campo cercano, la región de mezcla inicial, o la zona de mezcla hidrodinámica.

La dilución obtenida es equivalente a un sistema de tratamiento que produzca el 99% de remoción. Se muestra la reducción de contaminantes esperada de las aguas residuales por dilución en el Mar Caribe con el emisario y difusor recomendado. El

diseño y localización del difusor permitirá alcanzar una dilución mínima de 100:1 todo el tiempo. La corriente marina del sitio propuesto es de 20 cm/s en promedio, lo cual permitirá alcanzar una dilución de 188:1 en promedio.

Tabla 5.8 Reducción de contaminantes de las aguas residuales de Cartagena por dilución en el Mar Caribe

| Contaminantes | Unidades | Concentración inicial | Concentración después de dilución inicial |
|--|------------|-----------------------|---|
| SST | mg/L | 225 | 2,3 |
| DBO ₅ | mg/L | 200 | 2,0 |
| Nitrógeno total | mg/L | 65 | 0,7 |
| N-NH ₃ | mg/L | 40 | 0,4 |
| Fosforo total | mg/L | 15 | 0,2 |
| Grasas y aceites | mg/L | 35 | 0,35 |
| Coliformes fecales | UCF/100 MI | 10 ⁸ | 10 ⁶ |
| La disolución inicial mínima es de 100:1 con condiciones de corriente típica a una profundidad de 20 m | | | |

La utilización de militamices en la planta y la complementación de la descarga al océano con una dilución mínima de 100:1, no producirán impactos perceptibles. Quiere decir que con la planta de pretratamiento construida y el emisario submarino a 20 m de profundidad en el Mar Caribe del área de Punta Canoa no producirá impactos perceptibles en ningún momento.

5.3.7 Material de la tubería

El emisario se diseñó para ser construido en polietileno de alta densidad (PEAD), que debido a su peso ligero y su flexibilidad, puede ser instalada a menor costo que una tubería más pesada o más rígida. La flexibilidad es extremadamente importante cuando se instala una tubería en un área con condiciones pobres del terreno. Adicionalmente, la flexibilidad permite cambios de dirección (vertical u horizontal) haciendo curvas amplias con la tubería PEAD en vez de emplear codos o piezas especiales.

La tubería es unida (uniones de fusión a tope) y formada antes de ser instalada. La tubería necesitó de pesos para resistir la flotación debido a bolsas de aire o situaciones de terreno fluido. Se instaló lo suficientemente contrapesada para contrarrestar las fuerzas de flotación a largo plazo, asociadas con bolsas de aire localizadas.

5.3.8 Proceso de hundimiento

La fase crítica en la instalación de tuberías de polietileno de alta densidad es el hundimiento. La figura siguiente muestra el comportamiento de la tubería durante la fase de hundimiento.

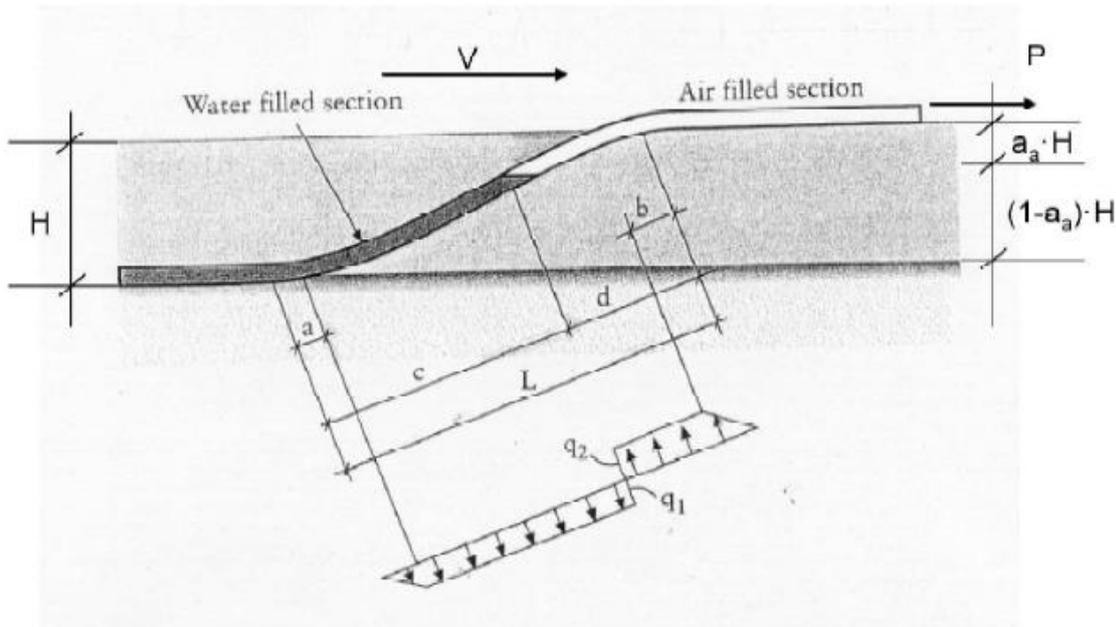


Figura 5.4 Comportamiento tubería en fase de hundimiento

Para llevar a cabo una actividad de hundimiento segura, se balanceó las fuerzas descendentes (q_1) debidas a la selección inundada con agua y las fuerzas ascendentes (q_2) en la sección con aire producto de la boyancia de la tubería. Se debe evitar una aceleración del sistema durante el hundimiento, para ello se controló la velocidad del hundimiento (v) y la presión interna (p).

Los parámetros controlados en este proceso fueron:

- Presión del aire (p): La presión interna de aire depende del grado de carga con los lastres de concreto. El grado de carga del proyecto es de 40% para los 2560 metros iniciales (Zona 1), 60% para los siguientes 1660 metros lineales (Zona 2) y 65% para los últimos 100 metros (Zona 3). (Ver tabla 5.9)
- Fuerza de tiro (P): La fuerza de tiro aplicada en el extremo de la tubería se utiliza para controlar la posición de la tubería e incrementar el radio de curvatura en la configuración S del hundimiento.
- Velocidad de hundimiento (v)

Tabla 5.9 Presión de aire la tubería en el proceso de hundimiento

| Zonas del emisario | Profundidad de instalación | Presión de aire |
|--------------------|----------------------------|-----------------|
| 1 | 6 m | 25.000 Pa |
| 2 | 10 m | 61000 Pa |
| | 15 m | 92.000 Pa |
| | 20 m | 122.000 Pa |
| | 21 m | 128.000 Pa |
| 3 | 22 m | 215.000 Pa |

5.3.8 Detalles de la zanja terrestre

Se ejecutó un programa de perforaciones de suelo, a lo largo del corredor del emisario, hasta una profundidad de 20 m, donde se encontró una capa de limo o lodo con un espesor aproximado de 1 metro y una capa superficial de arcilla de consistencia dura. El perfil de la tubería terrestre se ilustra en la figura 5.5.

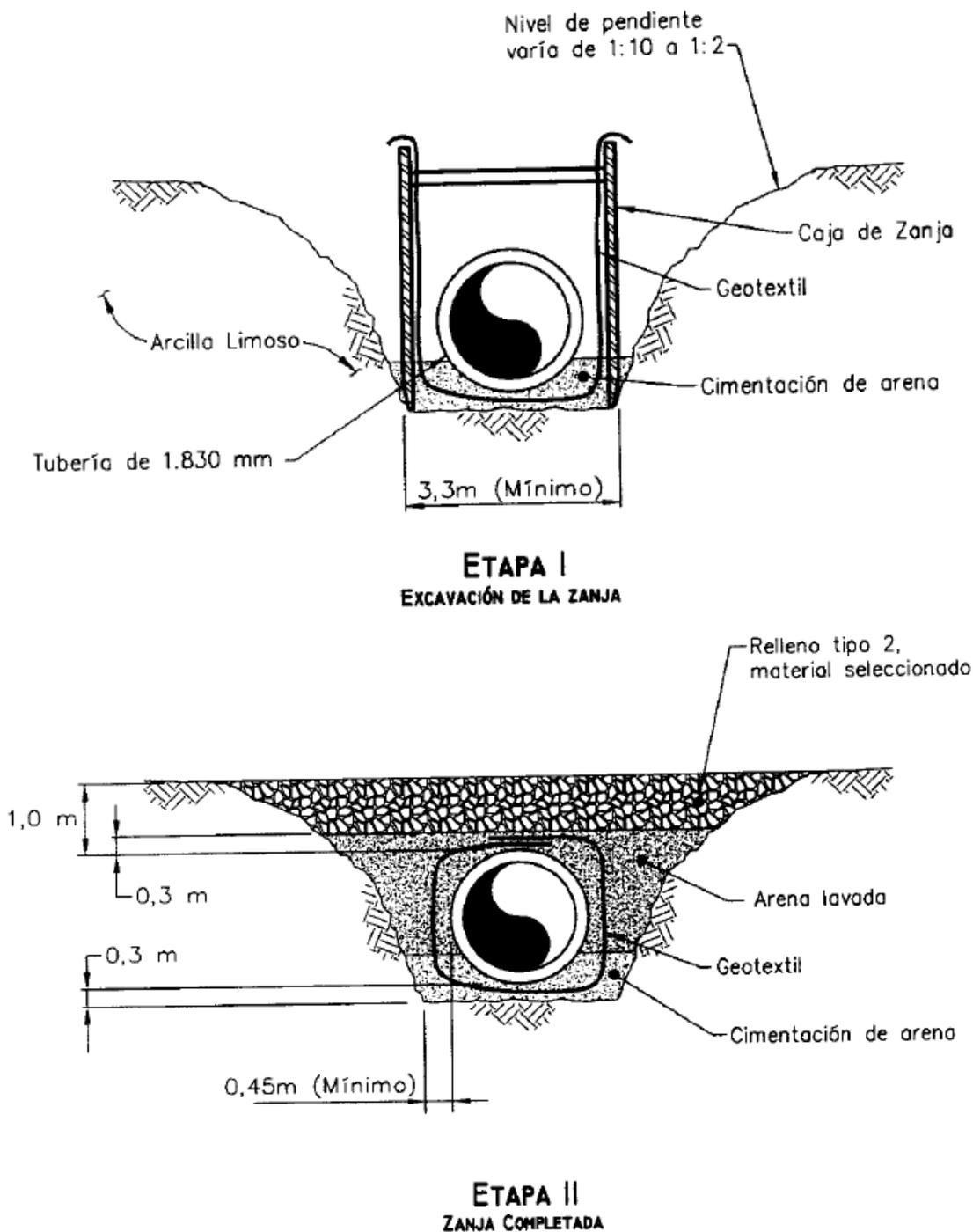


Figura 5.5 Detalle zanja para tubería terrestre

5.3.9 Emisario submarino – Zona de oleaje

Esta zona consiste de la costa hasta una profundidad de 3 metros. En esta zona se hizo un recubrimiento de 3 metros para proteger la tubería de la fuerzas de las olas y tormentas.

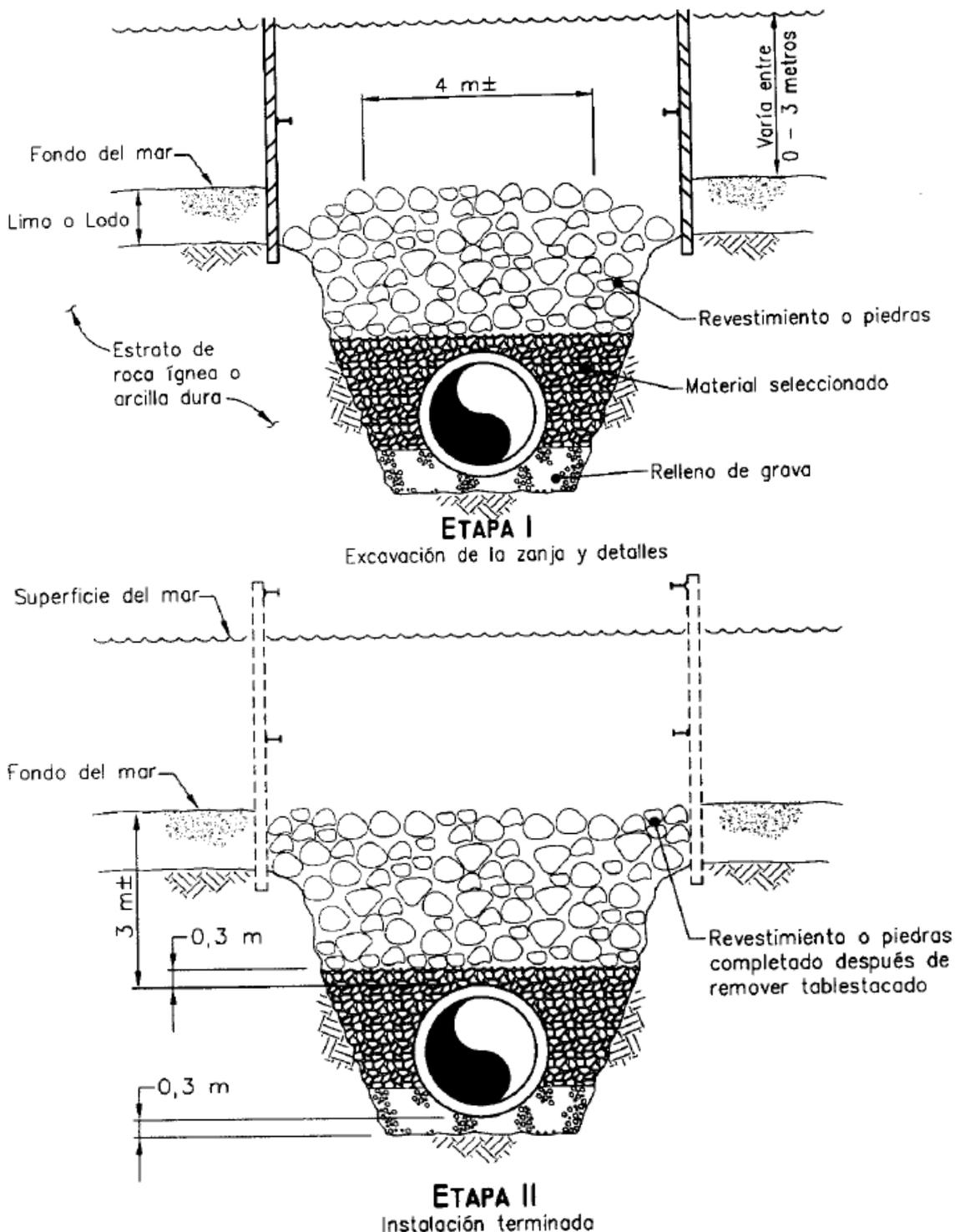


Figura 5.6 Detalle zanja zona oleaje

5.3.10 Emisario submarino – profundidad de 3 hasta 10 metros

En esta zona se requirió un cubrimiento de 1 a 3 metros sobre la tubería.

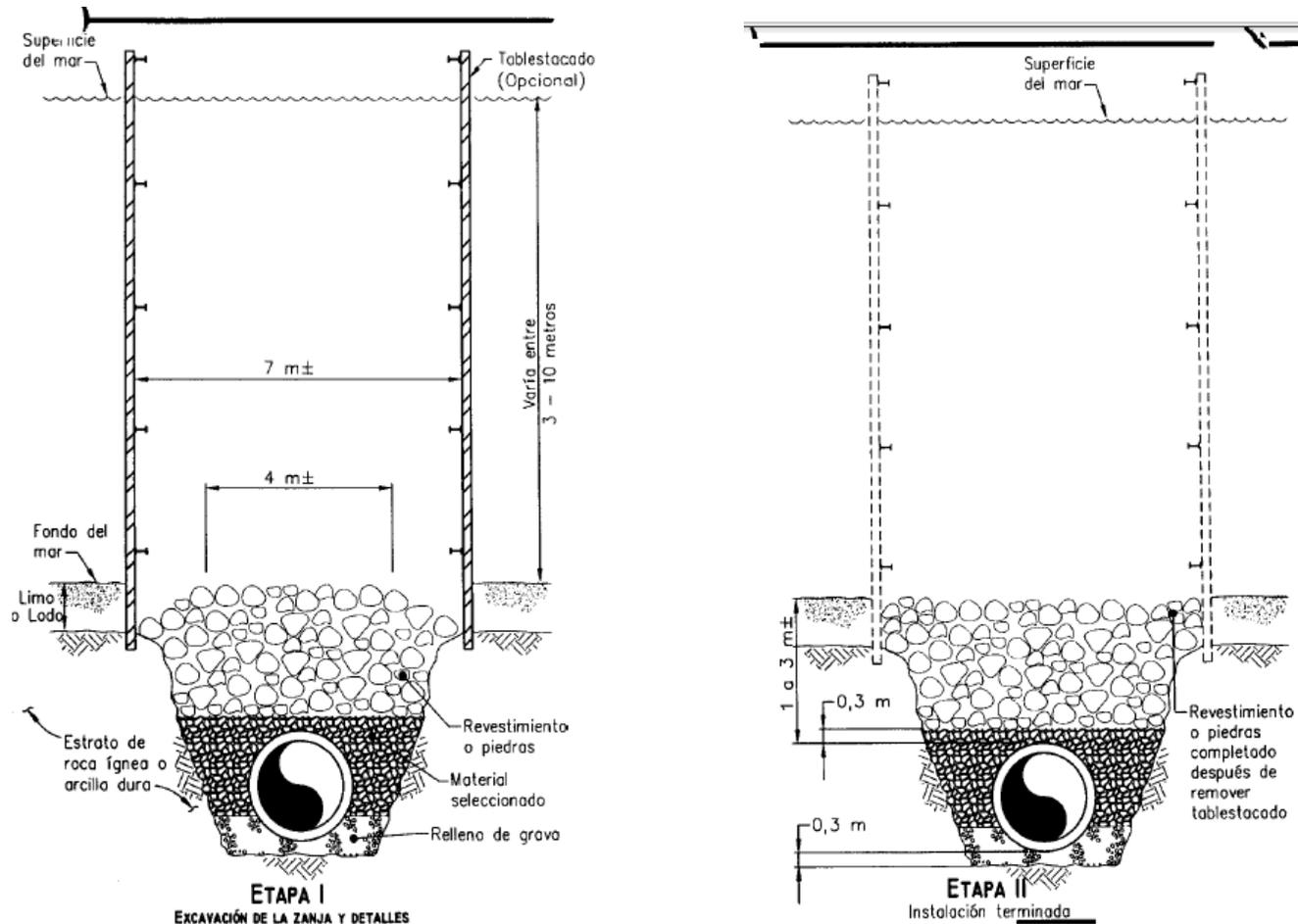


Figura 5.7 Detalle zanja de 3 hasta 10 metros de profundidad

Ejemplo: Emisario Submarino de Cartagena

5.3.11 Emisario submarino – profundidad de 10 hasta 15 metros

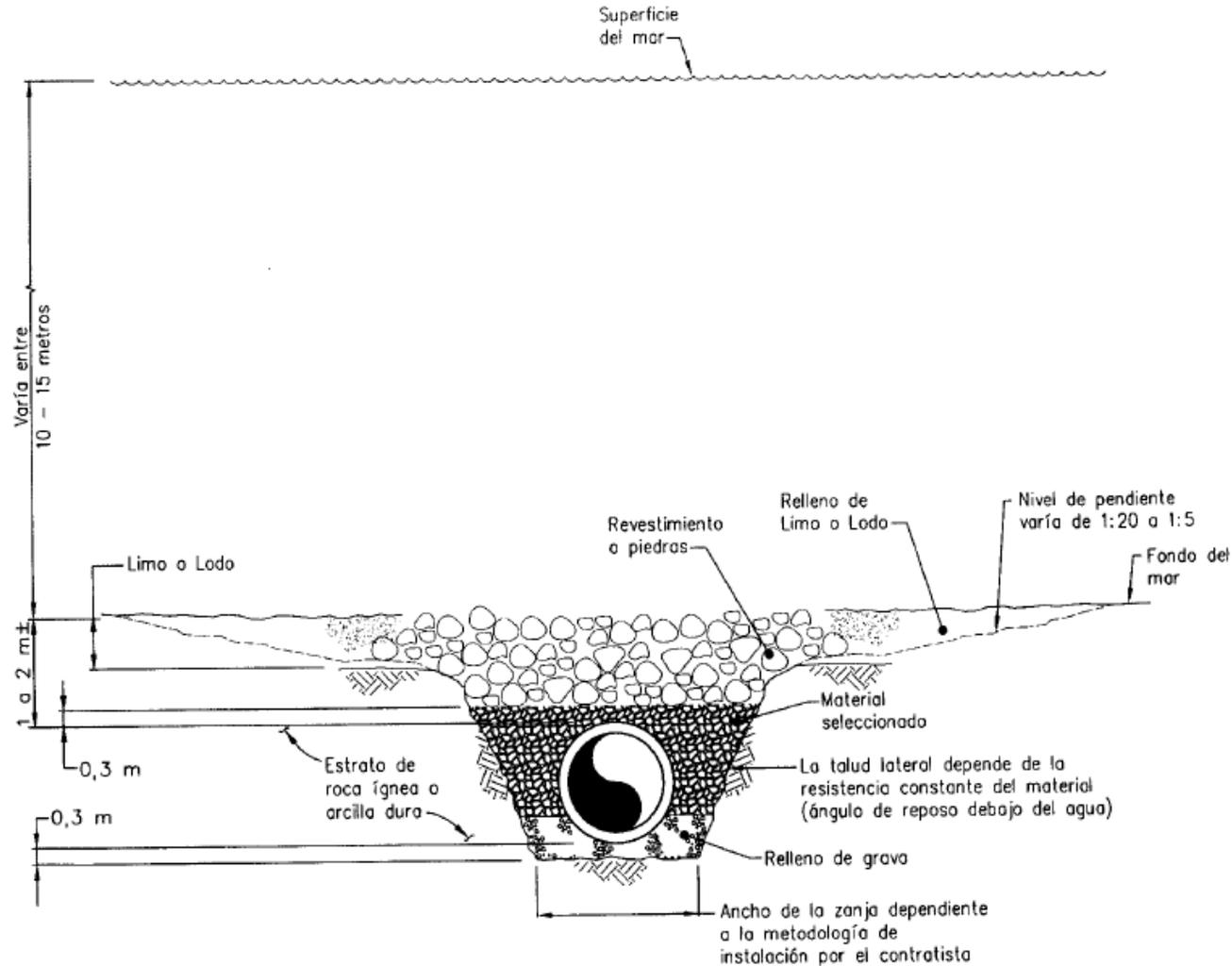


Figura 5.8 Detalle zanja de 10 hasta 15 metros de profundidad

5.3.12 Emisario submarino/Difusor

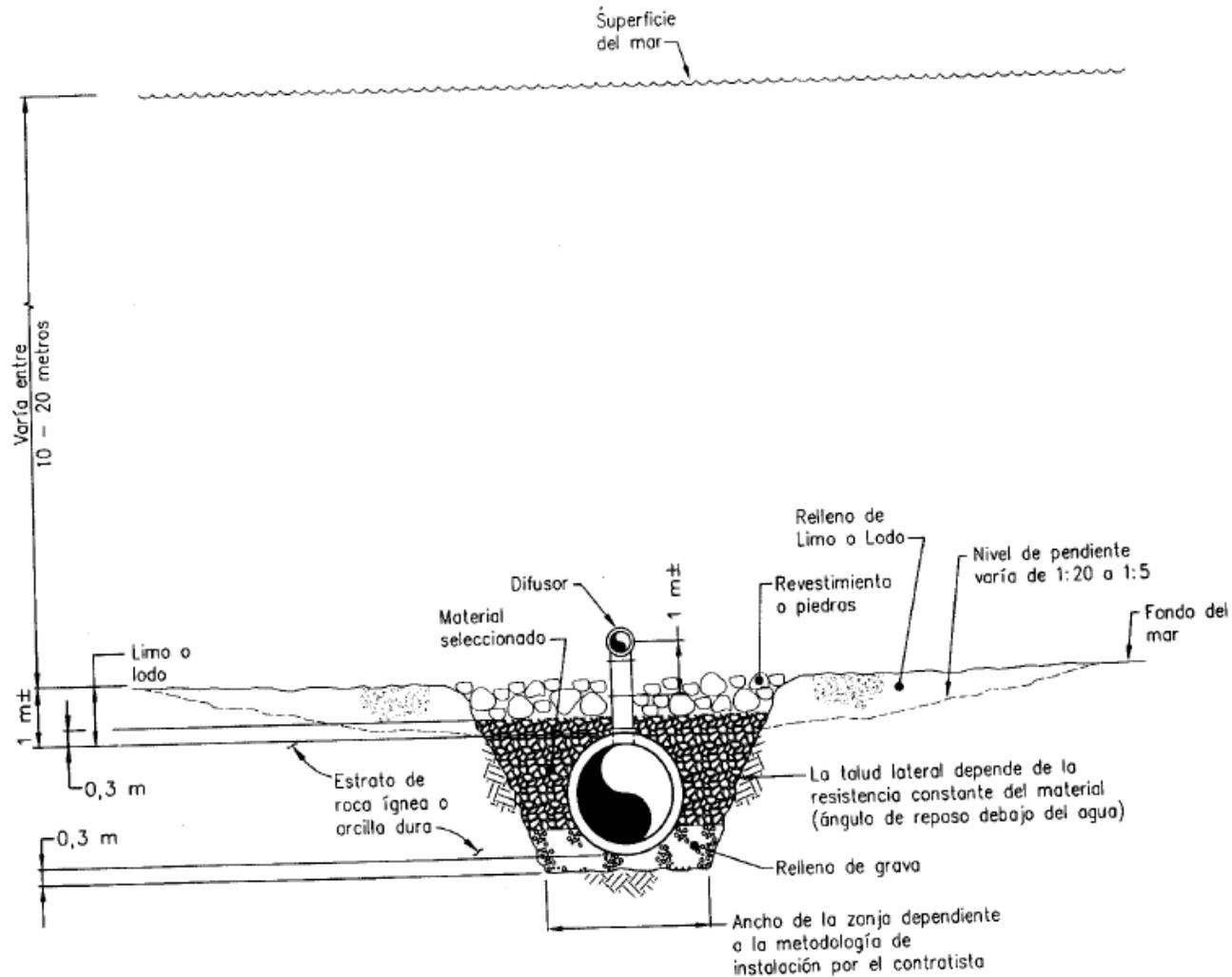


Figura 5.9 Detalle zanja emisario/difusor