

EL NUEVO EMISARIO SUBMARINO DE LA PLANTA DEPURADORA DEL BESÓS

Celedonio Gómez y Josep Túnica

Empresa Metropolitana de Sanejament S.A. (EMSSA)

RESUMEN: En un emisario submarino de 2900 m longitud y 2.6 m de diámetro exterior, con una profundidad de vertido de más de 40 m, entró en servicio en Mayo de 1995 en el litoral de Barcelona.

La adecuada elección tanto de los procedimientos constructivos como de los medios de obra empleados y un riguroso control de la obra, permitieron fondear el emisario en tan solo 26 días.

Con esta importante infraestructura, se logra la disolución del efluente de la planta depuradora del Besós, con un caudal máximo de $12.4 \text{ m}^3/\text{s}$, de forma que se adecúa a las normas comunitarias, mejorándose la calidad del agua a lo largo de la costa.

INTRODUCCIÓN

Las playas del litoral norte del Area Metropolitana de Barcelona gozan, desde Mayo de 1.995, de los beneficios producidos por la puesta en servicio del nuevo emisario submarino de aguas residuales de la planta depuradora del Besós.

Se trata de una gran tubería continua de acero recubierta de hormigón armado, con una longitud total de 2.900 m. y un diámetro interior de 2,10 m. En sus últimos 800 m., dispone de 15 difusores por los cuales son vertidas al mar las aguas residuales depuradas a profundidades que oscilan entorno a los 40 y 50 m.

El emisario fué construído por tramos en tierra, siendo posteriormente arrastrado por el fondo marino hasta su posicionamiento final. Un exhaustivo y estricto control

se desarrolló en todas las operaciones de fabricación y lanzamiento del emisario.

Medios muy singulares de dragado y tiro fueron empleados para excavar la zanja y arrastrar la tubería. La operación de lanzamiento fué realizada en sólo 28 días, aspecto que conllevó un trabajo continuado, día y noche, para poder realizar las operaciones de arrastre, soldadura y hormigonado para la unión de todos los tramos.

Antes de iniciarse los trabajos de arrastre, se tuvieron que ejecutar obras especiales para solucionar el cruce con otras dos infraestructuras: un gaseoducto submarino en servicio y un dique de abrigo en proyecto.

El rango de caudales de funcionamiento del emisario, entre $3,1$ y $12,4 \text{ m}^3/\text{s}$, ha hecho necesario la incorporación de una gran estación de bombeo con el objeto de posibilitar su evacuación.

Artículo recibido el **18 de marzo 1996** y aceptado para su publicación el **25 de marzo 1996**. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.



Figura 1. Vista aérea de las obras y de la planta depuradora. Al fondo, litoral de la ciudad de Barcelona.

UN PROYECTO METROPOLITANO

El nuevo emisario submarino del Besós es una infraestructura del Plan de Saneamiento Metropolitano, cuyo objetivo es verter al mar las aguas residuales después de ser depuradas en la planta del Besós, de forma adecuada para que ese gran caudal de agua no produzca impacto ambiental, mejorándose el vertido anterior realizado mediante un antiguo emisario de 600 metros de longitud.

De este modo, el diseño del emisario cumple las normativas tanto nacionales como comunitarias y permitirá que las aguas depuradas se mezclen con el agua del mar de una forma perfectamente asimilable por el medio natural, al tiempo que mejorará notablemente la protección, desde un punto de vista sanitario, del agua de las playas del litoral norte del Área Metropolitana.

La depuradora del Besós trata las aguas residuales de una gran parte del Area Metropolitana de Barcelona, que comprende, aproximadamente, el setenta por ciento del término municipal de Barcelona, y la totalidad de los de Badalona, Montgat, Sant Adrià de Besós, Santa Coloma

de Gramanet y Tiana, con una carga contaminante equivalente a una población de algo más de 1,6 millones de habitantes.

La Entitat Metropolitana de Serveis Hidràulics i Tractament de Residus (EMSHTR) es la responsable del desarrollo de esta obra, que contribuirá a la protección y mejora del medio ambiente en su zona de actuación: el Área Metropolitana de Barcelona.

La Empresa Metropolitana de Sanejament (EMSSA) es el ente público de la EMSHTR que en su condición de responsable del saneamiento en el Área Metropolitana, ha gestionado y dirigido la ejecución de las obras.

La inversión, presupuestada en 5.000 millones de pesetas, se financia con fondos del Plan de Saneamiento, gestionados por la Junta de Sanejament del Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya y obtenidos, básicamente, mediante la recaudación de la tarifa de saneamiento que grava el consumo de agua.

LA SOLUCION ELEGIDA

En el diseño del emisario se tuvieron en cuenta dos aspectos fundamentales: la obtención de la dilución y dispersión necesaria para cumplir los objetivos de calidad establecidos y las condiciones geomorfológicas que presenta el fondo marino.

Para poder analizar el fenómeno de dilución y dispersión y determinar la longitud del emisario, fueron utilizados los siguientes modelos:

- para la distribución del penacho inicial se empleó el modelo de dilución inicial ULINE de la E.P.A..

- en la simulación de las condiciones hidrodinámicas generales y locales (vientos, corrientes marinas, densidades, temperaturas) se empleó el modelo tridimensional TIDEFLOW, utilizando dos tipos de mallas:

- *para el flujo general se cubrió una zona de 80 km paralela a la costa y 30 km en sentido perpendicular. Se dividió esta zona en mallas cuadradas de 1 km de lado, distribuyéndose en 10 capas de 30 m de espesor, llegándose a la batimétrica -1.000 m.

- *el flujo local se estudió en una zona de 23 km paralelamente a la costa y 6 km en sentido perpendicular, formándose mallas cuadradas de 150 m de lado y dividida en 10 capas de 5 m de espesor, llegando a batimétricas entre la -50 y -100 m.



Figura 2. Zona del Area Metropolitana de Barcelona a la que presta seivicio el nuevo emisario.

-la dispersión bacteriana se simuló con el modelo PLUME RW-3D, en base a los campos tridimensionales obtenidos previamente con TIDEFLOW. Estos dos modelos han sido desarrollados por H.R. Wallingford.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluyó que la longitud total del emisario debía ser de 2.900 m. La zona de difusión se estableció entre los puntos 2.100 y 2.900 m de la línea de costa, con una profundidad de vertido entre los 40 y 50 m, mediante 15 campanas difusoras, provistas cada una de ellas de 4 bocas dotadas con válvulas antirretorno, y distantes 60 m una de otra.

La decisión sobre el material y el sistema constructivo que debía ser utilizado venía condicionada, fundamentalmente, por las características del fondo marino. Así, la zona de ubicación del emisario corresponde al prodelta del Besós. Ello significa un fondo marino con cierta inestabilidad, formado por capas de depósitos con características y grados de

consolidación variables de forma marcada con la profundidad de la capa. Estos materiales fueron estudiados en base a una compleja campaña de reconocimiento geofísico y geotécnico de la zona.

Con las conclusiones de los estudios y una vez analizadas las alternativas, se diseñó el emisario como una tubería continua -sin juntas- de acero recubierta de hormigón armado de 2,10 m de diámetro interior. Esta alternativa era la que puede soportar en mejores condiciones las solicitaciones mecánicas derivadas de la inestabilidad del lecho marino. Tal elección obligó a realizar todo el proceso constructivo en tierra y posicionar la tubería en su lugar en el fondo marino mediante el método de "arrastre por el fondo".

El rango de caudales de funcionamiento del emisario, entre 3,1 y 12,4 m³/s, hizo necesaria la incorporación de una gran estación de bombeo a fin de hacer posible su evacuación.

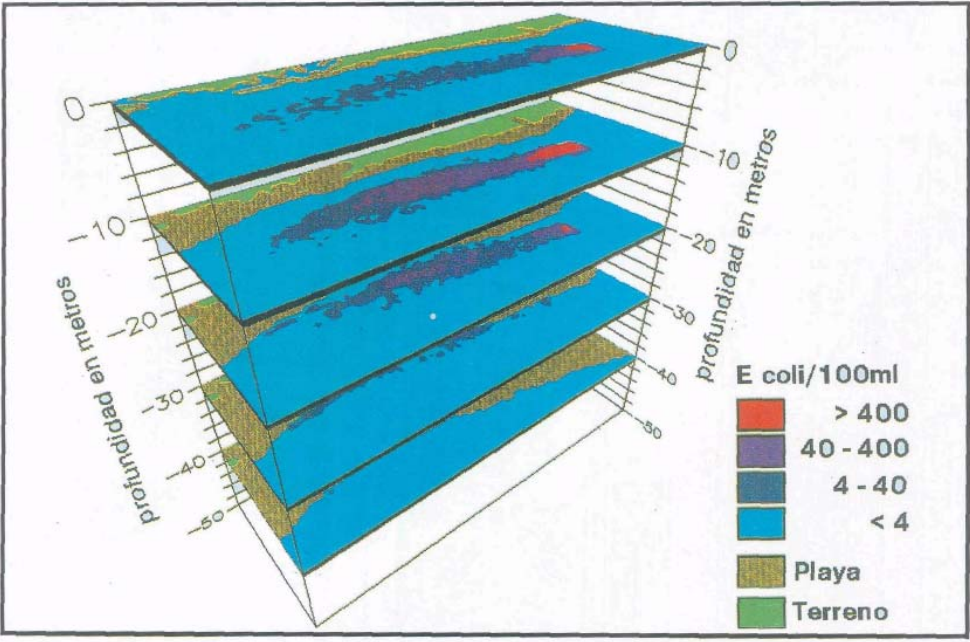


Figura 3. Ejemplo de simulación tridimensional de la dilución

LEYENDA

- Fangos superficiales sin consistencia. Important presencia de materia orgánica
- Fangos con arcillas limosas negras blandas o muy blandas. Presencia significativa de materia orgánica.
- Arcillas limosas negras blandas o muy blandas. Presencia de materia orgánica con intercalaciones importantes de arena.
- Gravas con intercalaciones de limos i arenas.
- S Sondeo.

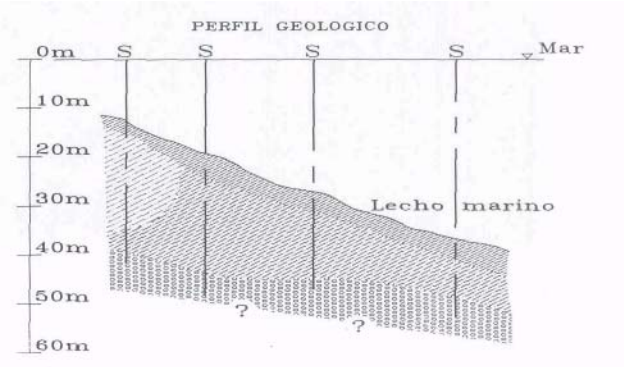


Figura 4. Perfil geológico en la traza dd emisario.

ESQUEMA BASICO DE FUNCIONAMIENTO

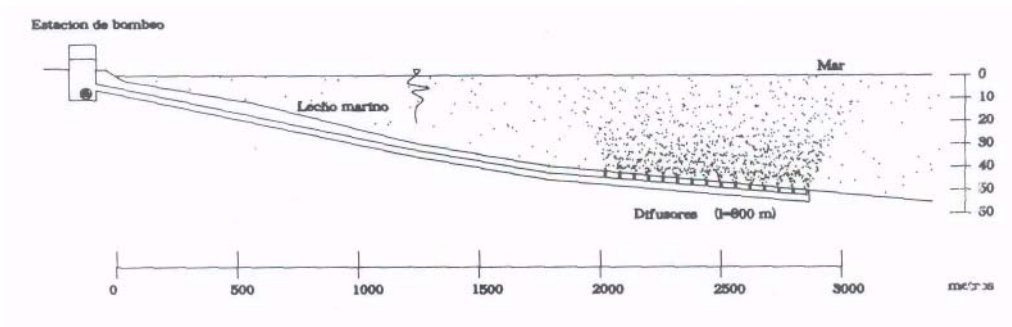


Figura 5. Esquema básico de funcionamiento del emisario.

PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL EMISARIO

La estrategia de construcción, fuertemente condicionada por el método de instalación escogido, se basó fundamentalmente en el adecuado diseño de cuatro elementos fundamentales:

La tubería

Fue elaborada en módulos individuales de 9 metros de longitud en fábricas especializadas. Se trata de una sección de acero y hormigón armado con un diámetro interior de 2,10 metros.

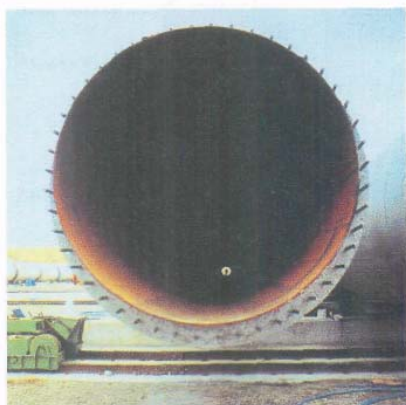


Figura 6. La tubería.

El parque de tubos

Para el ensamblaje y tiro de la tubería fue necesario habilitar una gran esplanada para almacenar los tubos previamente fabricados. De esta manera se iban uniendo los tubos de 9 metros de longitud para conformar tramos de 117 metros. Estos tramos eran desplazados transversalmente mediante un sistema hidráulico sobre vías hasta el lugar de acopio.



Figura 7. El parque de tubos.

La rampa de lanzamiento.

Unas vías situadas sobre una rampa de lanzamiento protegida por tablestacas permitieron introducir los sucesivos tramos de la tubería, ya unidos, en el mar, deslizándose por el fondo marino. La tubería fue arrastrada mediante una pontona de tiro situado mar adentro.



Figura 8. La rampa de lanzamiento.

El dragado

Embarcaciones altamente especializadas realizaron las operaciones de dragado de la zanja donde fue instalada la tubería.



Figura 9. Draga de succión en marcha.

En las páginas siguientes se abundará en la descripción de estos elementos

FABRICACION DE LA TUBERIA

El nuevo emisario submarino consiste en una tubería de 2.100 mm de diámetro interno, construida en acero de 19 mm de grosor según norma API 5L. Está recubierta con una capa de 222 mm de hormigón armado, con armaduras transversales y longitudinales, que actúa como protección y lastre de la estructura.

Se ha prestado una especial atención a las características del hormigón y a su proceso de fabricación con objeto de asegurar, además de unas buenas condiciones estructurales la máxima impermeabilidad, y, por consiguiente, limitar su porosidad. Se consigue así una adecuada protección de la tubería y se garantiza que su peso sumergido sufra las mínimas alteraciones durante el proceso de lanzamiento como consecuencia del agua absorbida por el hormigón.

Otras medidas para proteger la tubería metálica de la corrosión fueron la aplicación de una capa mortero de 2 cm interiormente y una película de brea epoxi de 500 micras de espesor en el exterior. Además las armaduras exteriores se protegieron por medio de resina epoxi adherida por fusión.

La tubería fue elaborada en módulos individuales de 9 metros de longitud en fábricas especializadas. En su construcción le fue aplicado hormigón con una disposición vertical para de este modo obtener una mayor densidad y uniformidad del mismo, prescindiendo del uso de aditivos y asegurar su geometría, siendo este último aspecto esencial para asegurar el éxito durante el proceso de ensamblaje de módulos y el de unión de tramos durante el tiro.

Todo el proceso de fabricación fue sumamente cuidado para garantizar la calidad del producto resultante (la tubería), tanto en lo que se refiere a la resistencia como a la geometría y peso de cada tramo.

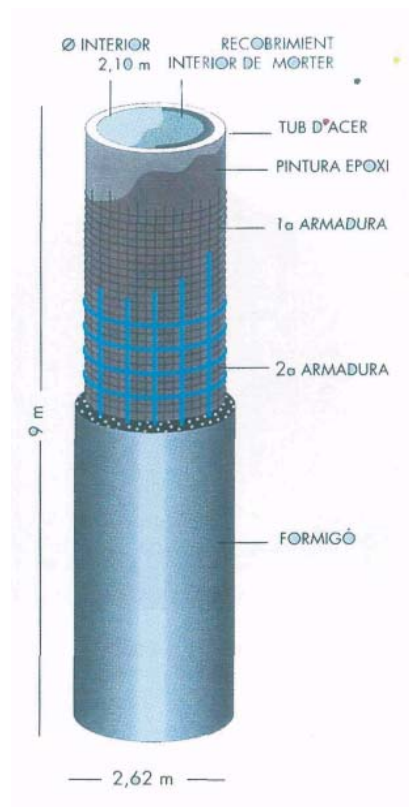


Figura 10. Sección de la tubería.



Figura 11. Fabricación del tubo de acero.



Figura 12. Tubo de acero.



Figura 13. Introducción de las armaduras.

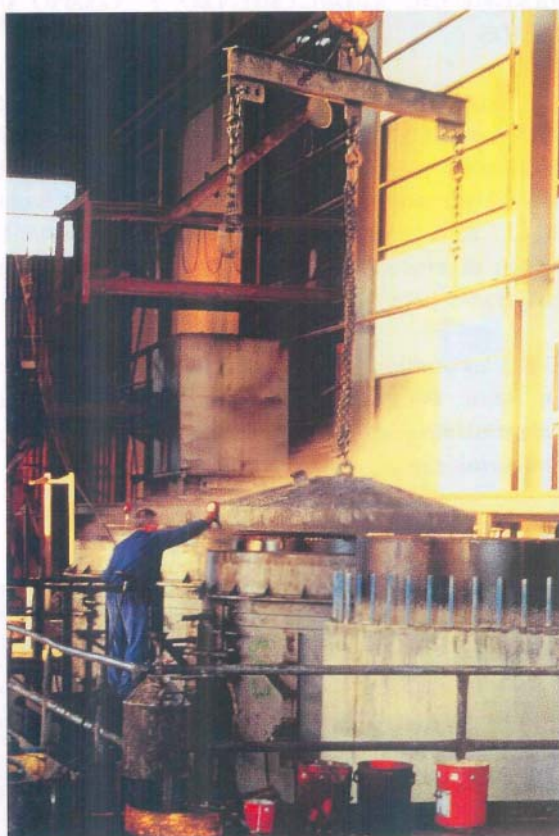


Figura 14. Hormigonado y curado al vapor de los módulos.



Figura 15. Vista general de la nave de fabricación del forro de hormigón armado.

PARQUE DE ACOPLAMIENTO Y ACOPIO DE TUBOS

Los tubos con hormigón de 9 m de longitud fueron unidos para conformar tramos de 117 m. Cada tramo, constituido por 13 de estos tubos, pesaba aproximadamente 662 toneladas. Un total de 25 tramos de 117 m, una vez unidos, formaron el emisario. En menos de cinco meses se tuvieron todos los tramos preparados para su instalación.

Todas las operaciones de ensamblaje fueron realizadas en tierra. Para ello fue habilitado un parque de

acoplamiento y acopio en la zona adyacente a la rampa de lanzamiento.

Esta rampa presentaba una inclinación del 4% y se adentraba en el mar a través de una sección protegida mediante tablestacas.

Unidos, en un extremo del parque, los tubos de 9 m formando tramos de 117 m, éstos eran trasladados transversalmente hasta la zona de acopio mediante la acción de siete carretones provistos de sistemas hidráulicos de elevación y traslación interconectados que aseguraban la homogeneidad del movimiento de estos medios de transporte.



Figura 16. Terreno destituido al parque de tubos en las inmediaciones de la depuradora.



Figura 17. Llegada de los tubos procedentes de la fábrica y colocación en el parque de tubos



Figura 18. Centrador de tubos.

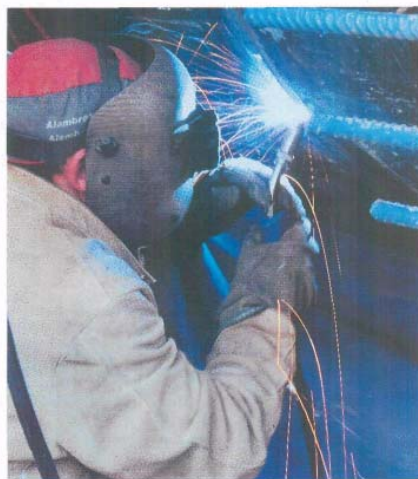


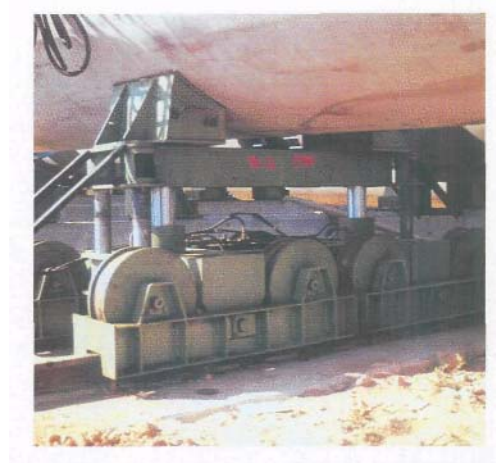
Figura 19. Proceso de soldadura



Figura 20. Conexión de tubos.



Figura 21. Hormigonado de las conexiones entre tubos.



Figuras 22 y 23. Sistema hidráulico para el desplazamiento de los tramos.

EL DRAGADO

Simultáneamente al ensamblaje de la tubería, se realizaron también las operaciones de dragado de la zanja en la que permanecerá instalada la tubería del emisario.

Debido a la inestabilidad del fondo marino del prodelta del Besós, puesta de manifiesto en los diversos estudios realizados, y a fin de asegurar la estabilidad de la zanja desde el momento del dragado hasta el arrastre, se exigió una anchura mínima de la base de la zanja de 15 metros y unos taludes máximos de 1/4.

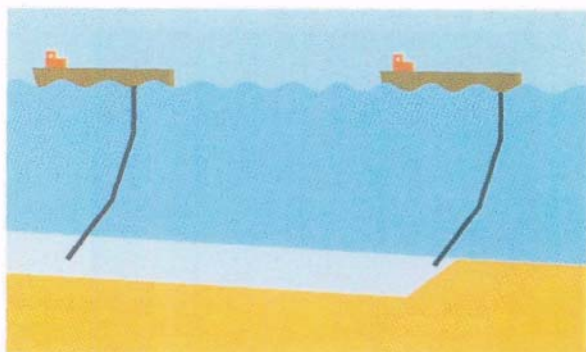


Figura 24. Excavación de la zanja en el fondo marino mediante dragado.

La gran profundidad que fue preciso alcanzar y las estrictas tolerancias en el perfil longitudinal comportaron la utilización de medios especiales. En el mundo existen pocas embarcaciones con capacidad de producción para llegar a tales profundidades.

Así, el dragado general, excepto en la zona costera, fue llevado a cabo con una draga de succión en marcha cvapaz de alcanzar profundidades de 55 m. En la zona de aguas someras, y por razón de calado, la zanja se excavó con una draga de succión con cortador. En el cruce con el gaseoducto y debido a las especiales condiciones de seguridad con las se debió trabajar se empleó una draga estática dotada de bombas de succión sumergibles. El dragado en la zona del futuro dique y el relleno de la zanja se realizó con otra draga de succión en marcha.

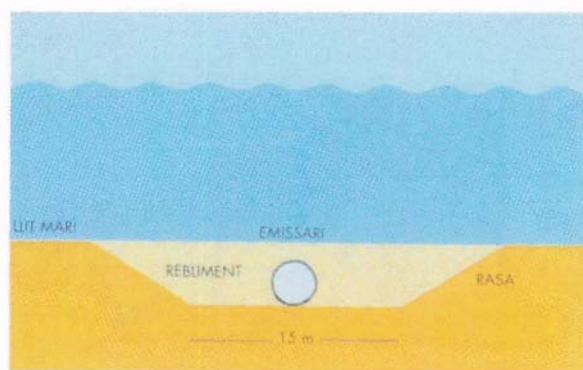


Figura 25. Sección de la zanja

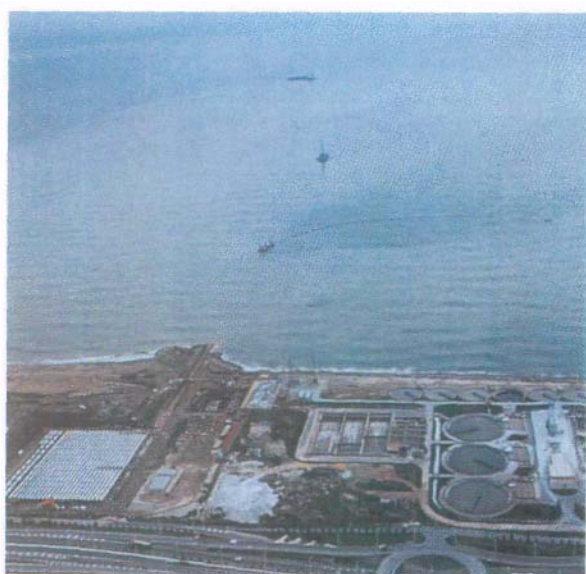


Figura 26. En primer termino draga de cortador.

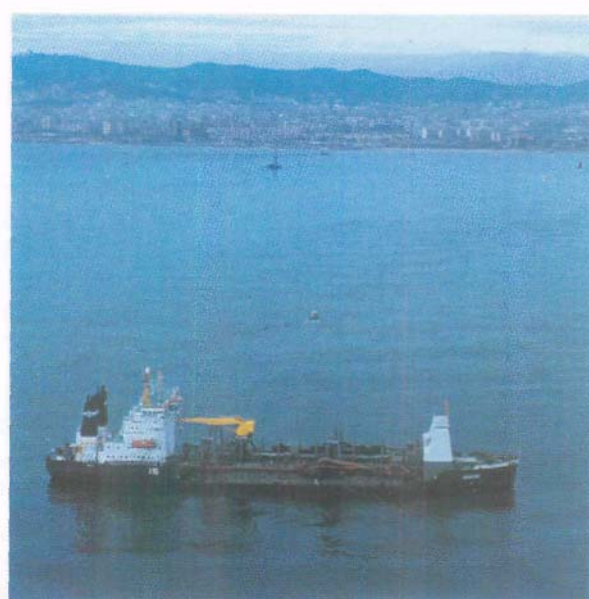


Figura 27. Draga de succión en marcha.

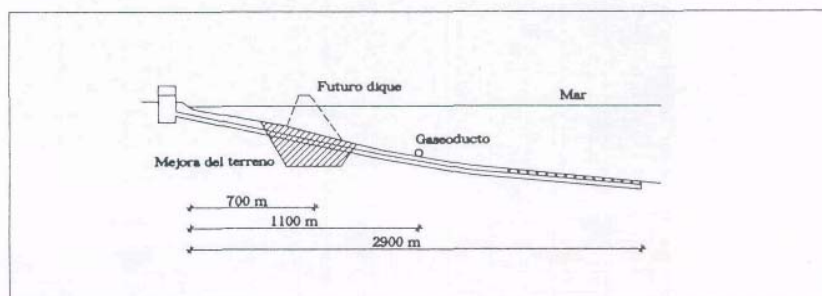
PUNTOS SINGULARES DE CRUCE

En el trazado del nuevo emisario submarino existían dos puntos singulares de cruce que requirieron unas obras de ingeniería notablemente delicadas.

Por un lado, el cruce del emisario con la zona en la que, según las previsiones urbanísticas del municipio de Sant Adrià de Besòs, se ubicaría el dique de protección de un puerto deportivo. Por ello fue necesario sanear los materiales deltáicos de la zona, hasta los 16 metros de profundidad, y proceder a sustituirlos por otro de tipo arenoso, con unas características geotécnicas capaces de asegurar que los asentamientos derivados del peso del citado dique se mantendrán en unos rangos compatibles con las posibilidades de deformación, sin entrañar peligro de rotura de la tubería del emisario. Para asegurar esta condición, el material una vez vertido se

compactó mediante un proceso de vibroflotación.

Por otro lado, el área definida para la construcción del emisario resultaba afectada por una conducción de gas de 800 mm de diámetro exterior de la empresa Gas Natural, S.A. La presencia de esta conducción -que constituye el cierre, por la línea de costa, del anillo principal del abastecimiento en alta de Barcelona-obligó, dada la imposibilidad de suspender temporalmente el servicio, a llevar a cabo una obra especial de cruce entre aquella y el emisario. La obra consistió en la realización de una estructura en forma de "U" invertida, de 60 metros de longitud y 40 toneladas de peso, que fue fondeada sobre la conducción, abrazándola enteramente. La estructura fue anclada al fondo marino con cuatro pilotes de 16 metros de profundidad, destinados a impedir eventuales desplazamientos de la misma. Esta estructura fue, por último, retirada una vez instalado el emisario.



Figuras 28 y 29. Esquemas de localización del emisario con la conducción de Gas Natural y el futuro puerto.

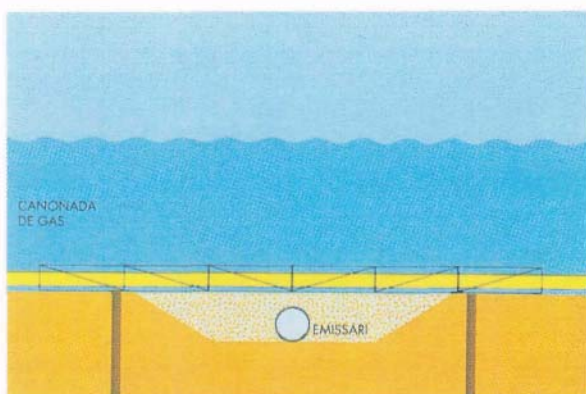


Figura 30. Esquema de la obra de soporte de la conducción de gas durante la construcción.



Figura 31. La estructura en el momento de ser transportada.

MANIOBRA DE TIRO Y LANZAMIENTO

Para emplazar la tubería del emisario en la zanja, ésta fue arrastrada por el fondo marino mediante una pontona de tiro dotada de una capacidad de tracción de 600 toneladas y fijada al fondo marino con cuatro anclas. A fin de facilitar y soportar esa operación, fue acoplado un cabezal de tiro, fabricado en acero, al tubo correspondiente al extremo final del emisario.

Para el lanzamiento, los tramos de 117 m fueron trasladados, mediante los ya citados siete carretes hidráulicos, hasta la rampa de lanzamiento, donde eran sometidos a la operación de tiro, asentados sobre unos carretes de arrastre colocados sobre vías.

Cada tramo era unido al ya lanzado gracias a las

correspondientes operaciones de ensamblaje de la tubería, realizándose la soldadura de los cilindros de acero y todas las operaciones de aplicación del hormigón, hasta dar lugar a una nueva unión sin juntas.

La duración de este ciclo de tiro y ensamblaje era de 24 horas, lo que significa que la colocación del emisario avanzaba cada día una longitud de 117 metros.

Con objeto de facilitar el trabajo de lanzamiento, el dimensionado y la construcción de la tubería fue realizado de forma que el peso efectivo de la misma, sumergida y vacía, fuera de 150 kg/m lineal, en lugar de los 5.600 kg/m lineal de peso bruto. La estanqueidad de la tubería se logró por medio de la colocación de unas tapas temporales que obturaron los huecos de las bases de los difusores hasta el fin de la operación de tiro.

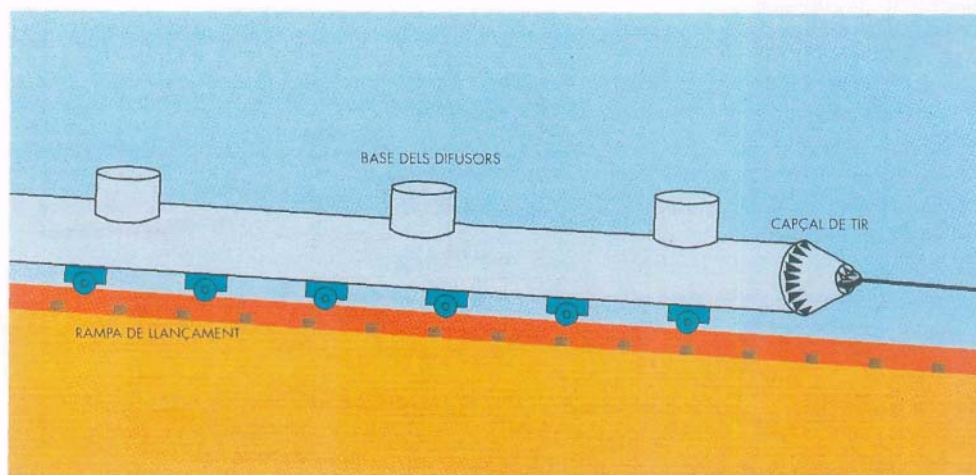


Figura 32. Esquema del Lanzamiento



Figura 33. Cabezal, de tiro.



Figura 34. Rampa de lanzamiento protegida con tablestacas.



Figura 35. Tiro de los últimos tramos de la tubería

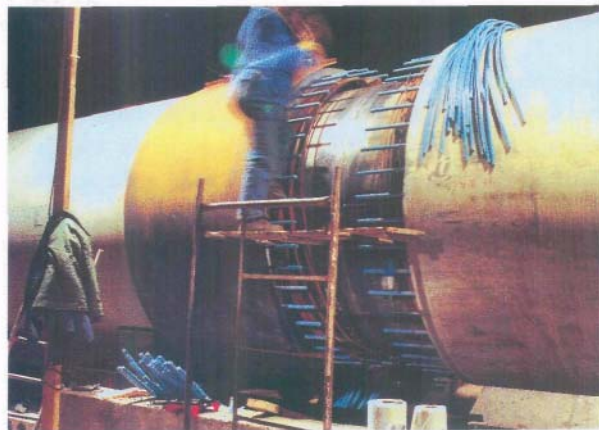


Figura 36. Ensamble nocturno durante el lanzamiento

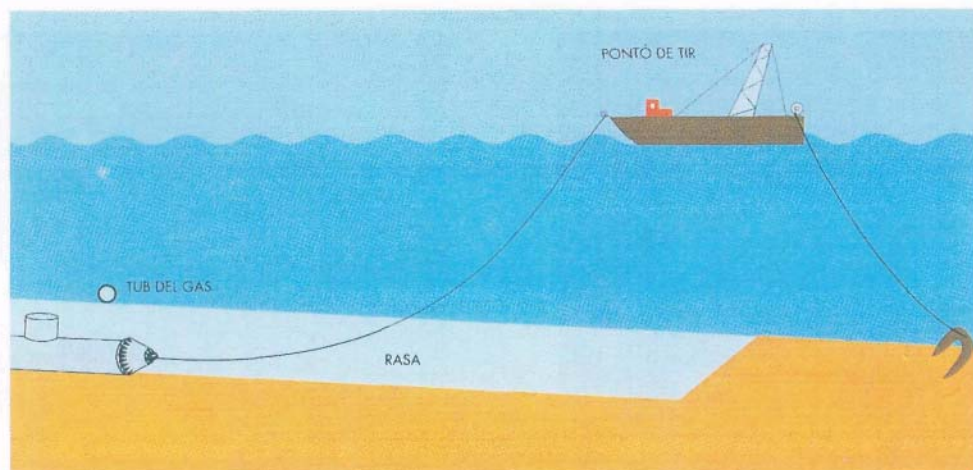


Figura 37. Esquema de la maniobra de tiro.



Figura 38. Pontana de tiro trabajando.

OPERACIONES FINALES

Una vez finalizada la operación de tiro, es decir, una vez que el emisario fue colocado en su lugar en la zanja, se procedió a realizar una serie de trabajos finales. En primer lugar, la tubería fue llenada de agua mediante la apertura de unas válvulas situadas en el extremo del emisario y se retiraron las tapas temporales de los difusores.

A continuación fueron insertadas las 15 campanas difusoras, de hormigón armado y camisa de chapa, provistas, cada una de ellas, de 4 bocas con válvulas

antirretorno, en sus bases correspondientes.

Una vez colocados los difusores, se llevó a cabo el relleno de la zanja con arena para estabilizar y proteger el emisario.

Las últimas operaciones consistieron en señalar el extremo del emisario con una boya luminosa, efectuar la conexión del emisario submarino con la estación de bombeo y la planta depuradora, e instalar el sistema de protección catódica por corriente impresa con el que se podrá monitorizar el grado de protección de la tubería frente a la corrosión.



Figura 39. Base de los difusores.

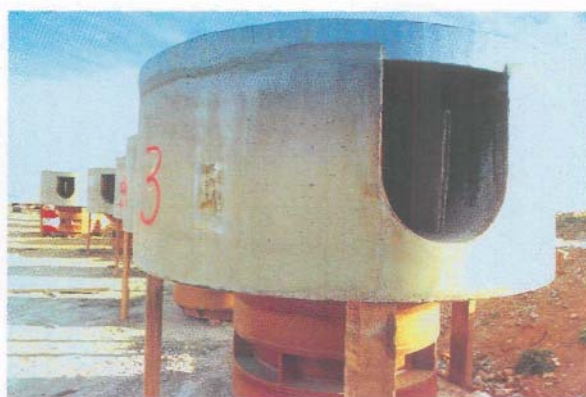


Figura 40. Las campanas difusoras.

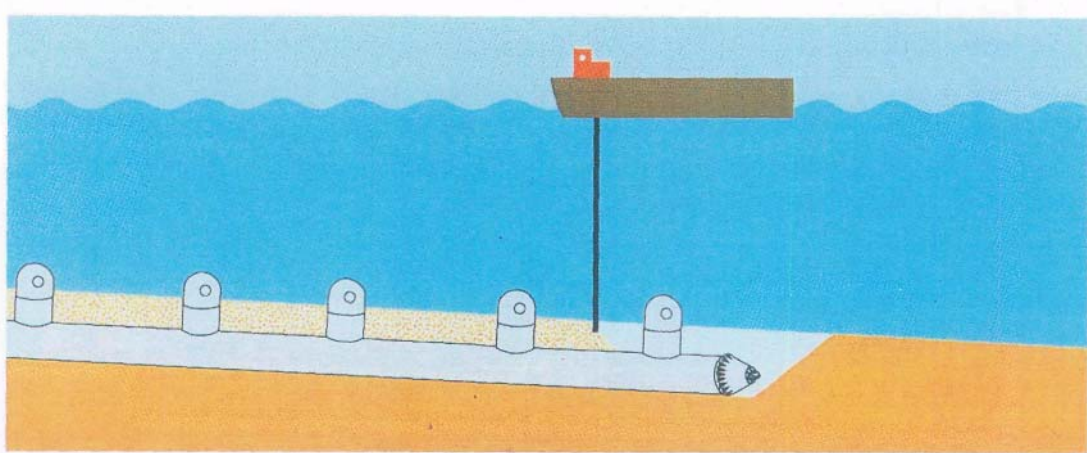


Figura 41. Relleno de la zanja con arena y colocación de los difusores.

LA ESTACION DE BOMBEO

Los caudales de funcionamiento del emisario se sitúan entre 3,1 y 12,4 m³/s que se corresponden con los caudales punta mínimo y máximo, respectivamente, previstos en la depuradora. Si bien el nuevo emisario permite un vertido por gravedad de un caudal de hasta 4,5 m³/s, para poder evacuar caudales superiores, es preciso impulsar las aguas, razón por la cual fue diseñada y construída una gran estación de bombeo.

La tipología del bombeo se corresponde a una impulsión contra cámara de carga, de forma que se evita la entrada

de aire en la conducción y los golpes de ariete. Considerando su gran peso, con una columna de agua de 15 metros de altura sobre el nivel del mar, la estación fue cimentada en terrenos con suficiente capacidad portante por debajo del nivel freático.

El óptimo funcionamiento de la estación, para el que fue elaborado un minucioso estudio de diseño hidráulico, queda garantizado por 6 bombas sumergibles de flujo axial, con una potencia instalada de 2.360 kw.

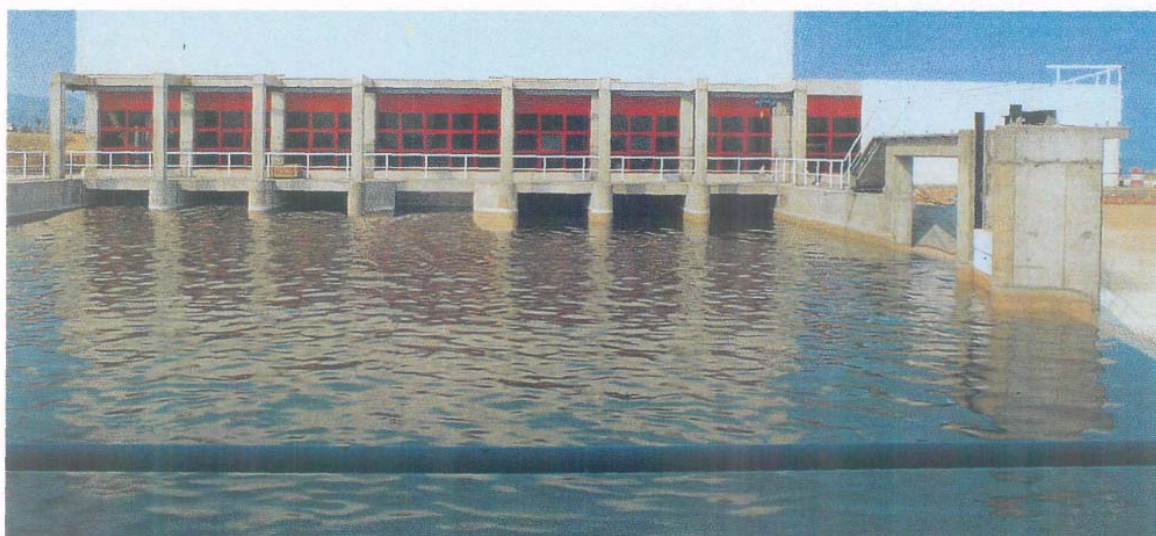


Figura 42. Edificio de bombeo.



Figura 43. Sala de bombas.



Figura 44. Cuadros eléctricos



Figura 45. Vista general del parque de acoplamiento y acopio de tubos, rampa de lanzamiento y excavación de la estación de bombeo.