



ANEXO 10. COMPROBACIÓN HIDRÁULICA DEL EMISARIO

ÍNDICE

1. CAUDAL DE DISEÑO.....	2
2. MÉTODOS DE CÁLCULO.....	2
3. DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DEL EMISARIO.....	3
3.1 DISPOSITIVO DIFUSOR.....	3
3.2 TUBERÍA PRINCIPAL. TRAMO APOYADO EN EL LECHO MARINO.....	4
3.3 TUBERÍA PRINCIPAL. TRAMO MARINO-TERRESTRE DISPUESTO MEDIANTE PERFORACIÓN HORIZONTAL DIRIGIDA (PHD).....	4
3.4 ARQUETA DE INICIO DE NUEVO TRAMO TERRESTRE	5
3.5 ARQUETA DE INICIO DE PHD	4
4. CÁLCULOS HIDRÁULICOS.....	5
4.1 CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DISPOSITIVO DIFUSOR.....	5
4.2 CÁLCULO HIDRÁULICO GENERAL DEL EMISARIO	7
4.2.1 Caudal que se puede verter por gravedad	7
5. CIRCULACIÓN DEL AIRE EN EL EMISARIO.....	8
5.1 PUNTO ALTO EN EL ARRANQUE DEL EMISARIO.....	8
5.2 PUNTO ALTO EN EL EXTREMO MARINO DE LA PERFORACIÓN HORIZONTAL DIRIGIDA	8



ANEXO 10. COMPROBACIÓN HIDRÁULICA DEL EMISARIO

1. CAUDAL DE DISEÑO

El emisario tiene que poder desaguar un caudal máximo de 120 m³/h (33,33 l/s).

2. MÉTODOS DE CÁLCULO

Las conducciones a presión se calculan con la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

- f: coeficiente de fricción
- L: longitud tubería
- D: diámetro interior tubería

El coeficiente de fricción f se calcula por la fórmula explícita de Swamee-Jain, que da un resultado prácticamente igual a Colebrook en este tipo de conducciones:

$$f = \frac{0,25}{\left(\log \left(\frac{r}{3,71 \cdot D} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right)^2}$$

$$\text{Re} = \frac{v \cdot D}{\eta}$$

- r: rugosidad
- Re: número de Reynolds
- η : viscosidad cinemática. Se toma = 1,3. 10⁻⁶ m²/s

$$h = k \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Singularidad	k
Codo 90º	1,26
Codo 45º	0,32
Codo 30º	0,16
Válvula de compuerta (abierta)	0,20
Entrada de tubería	0,50



Singularidad	k
Cambio de dirección 60º	0,40
Cambio de dirección 70º	0,46
Cambio de dirección Te	2,00

La pérdida en las piezas de cambio de diámetro se calcula por la expresión:

$$h = k \cdot \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} = k \cdot \left[\frac{D_2^2}{D_1^2} - 1 \right]^2 \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$

Donde k=0,5 para contracciones, y k=1 para expansiones.

Las conducciones por gravedad, en lámina libre, se calculan por la fórmula de Manning:

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2}$$

- v: velocidad media del fluido
- n: coeficiente de rugosidad de Manning
- R: radio hidráulico de la sección mojada
- J: pendiente de la conducción

3. DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DEL EMISARIO

Desde aguas abajo hasta aguas arriba, el emisario se compone de:

- Dispositivo difusor
- Tubería principal. Tramo apoyado en el lecho marino
- Tubería principal. Tramo dispuesto marino-terrestre dispuesto mediante perforación horizontal dirigida (PHD)
- Arqueta de inicio de PHD
- Tubería principal. Tramo terrestre hasta la EDAR

3.1 DISPOSITIVO DIFUSOR

Está formado por 1 tubería de 16 m de longitud, de PEAD 100 PN10 SDR 17 DN200, con espesor 11,90 mm y diámetro interior 176,20 mm, apoyada sobre el fondo marino, entre las cotas -29,50 y -30,30 m y los PK 2+530 y 2+546, debidamente lastrada, y girado 15° en sentido horario respecto al tramo apoyado que lo precede.

Dispone de 2 bocas difusoras de 70 mm de diámetro separadas entre sí 15 m, por lo que la separación entre la primera y la última boca es de 15 m.



En el extremo de la tubería hay una tapa ciega embreadada, desmontable para operaciones de mantenimiento y limpieza.

La tubería difusora entronca con la tubería principal mediante conjunto de portabridas de PEAD100 PN10 DN200 y bridas locas de acero inoxidable.

3.2 TUBERÍA PRINCIPAL. TRAMO APOYADO EN EL LECHO MARINO

Está formado por 1 tubería de 385 m de longitud (sin contar el dispositivo difusor), de PEAD 100 PN10 SDR 17 DN200, con espesor 11,90 mm y diámetro interior 176,20 mm, apoyada sobre el fondo marino, entre las cotas -20,50 y -29,50 m y los PK 2+160 y 2+530, debidamente lastrada.

Comienza al acabar el tramo PHD con una pieza especial reductora, y termina en el tramo difusor.

3.3 TUBERÍA PRINCIPAL. TRAMO MARINO-TERRESTRE DISPUESTO MEDIANTE PERFORACIÓN HORIZONTAL DIRIGIDA (PHD)

Está formado por 1 tubería de 829 m de longitud, de PEAD 100 RC PN25 SDR 7,4 DN250 (espesor 34,2 mm) mediante PHD, entre las cotas 4,55 m y -20,5 m y los PK 1+386 y 2+160.

Comienza en la arqueta de conexión PHD con una pieza especial en "Y" de conexión, y termina con una pieza especial reductora al inicio del tramo apoyado.

El trazado en planta está compuesto por dos tramos:

- El situado bajo tierra, de 90 m de longitud.
- El situado bajo el mar, de 739 m de longitud.

El trazado en alzado es el habitual de una PHD: forma básicamente una curva, descendente al inicio del tramo, con pendiente decreciente hasta llegar al punto más bajo, y luego asciende hasta llegar al final.

3.4 ARQUETA DE INICIO DE PHD

Acogerá la conexión entre el nuevo tramo terrestre de PEAD DN200 y el nuevo tramo PHD PEAD DN250, mediante pieza especial de conexión en "Y" y demás piezas indicadas en los planos.

El tramo procedente del nuevo tramo terrestre de PEAD DN200 está formado por: portabridas, carrete de prolongación con doble picaje con ventosa, carrete de desmontaje, portabridas, tubería PEAD DN200, portabridas y pieza especial de conexión en "Y".

Por su parte, el tramo procedente de la perforación lo conforman; picaje con ventosa, portabridas, carrete de prolongación, portabridas y pieza especial de conexión en "Y".



Tras esta pieza especial, se dispone portabridas, manguito electrosoldable y se da inicio al nuevo tramo PHD terrestre-marino PEAD DN 250.

3.1 ARQUETA DE INICIO DE NUEVO TRAMO TERRESTRE

Acogerá la conexión entre el tramo existente de FC 200 y el nuevo tramo enterrado en zanja de PEAD DN200, mediante pieza especial de conexión y demás piezas indicadas en los planos.

El tramo procedente de la tubería existente de FC 200 está formado por: portabridas, brida reductora de diámetro y pieza especial de conexión.

Tras esta pieza especial, se dispone carrete de desmontaje, portabridas, brida y se da inicio al nuevo tramo terrestre enterrado PEAD DN 200.

4. CÁLCULOS HIDRÁULICOS

4.1 CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DISPOSITIVO DIFUSOR

La pérdida de carga en el difusor se puede calcular a lo largo del flujo por cualquiera de sus bocas, debiendo ser la misma por cualquiera de los trayectos, teniéndose que considerar en el cálculo la presión diferencial de la columna de agua de mar (que es distinta en cada boca, si éstas están a diferente profundidad).

Haciendo el cálculo en la primera boca, la pérdida de carga se puede expresar como:

$$\Delta h = k \cdot \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \cdot (\rho_m - \rho_a)$$

- v_1 es la velocidad del flujo por la primera boca
- k es un coeficiente para el que se adopta un valor de 1,5 en el caso de orificios laterales (perpendiculares al flujo principal)
- z_1 es la profundidad del centro de la boca 1
- ρ_m y ρ_a son las densidades del agua de mar (1.026 kg/m³) y del agua vertida (1.000 kg/m³) En las bocas siguientes:

$$\Delta h = h_{t,i} + k \cdot \frac{v_i^2}{2g} + z_i \cdot (\rho_m - \rho_a)$$

- $h_{t,i}$ es la pérdida de carga en la tubería entre la boca 1 la boca i



PROYECTO DE ADECUACIÓN Y LEGALIZACIÓN DE EMISARIO SUBMARINO Y VERTIDOS AL MAR - EMISARIO SUBMARINO DE SANT ELM

El procedimiento de cálculo adoptado consiste en tantear el valor del caudal que sale por la primera boca hasta que se verifique que el caudal que sale por la última boca sea igual al caudal que circula por el último tramo de la tubería.

A continuación, se muestran los resultados para un caudal máximo de 120 m³/h o 33,33 l/s.

REPARTICIÓN DE CAUDALES EN TUBERÍA DIFUSORA PARA Q = 33,33 L/s (Q max en escenario futuro)

Número de bocas (por tubería)	2	Número de tuberías	1	Caudal por tubería (L/s)	33,33333
Distancia entre bocas (m)	15,00	Caudal total (L/s)	33,33	Caudal medio por boca (L/s)	16,67
Profundidad primera boca (m)	29,50	Rugosidad (mm)	0,25	Longitud tubería (m)	16
Profundidad última boca (m)	30,20	Viscosidad cin. (m²/s)	8,970E-07	K equivalente	15,4
Coefficiente pérdida carga boca	1,5			Coefficiente uniformidad	1,011

Número de boca o tubo	Diámetro boca (mm)	Profundidad boca (m)	Diámetro tubo (mm)	Caudal		Velocidad		Pérdida de carga			
				tubo (L/s)	boca (L/s)	tubo (m/s)	boca (m/s)	en tubo (m)	en boca (m)	por densidad (m)	Total (m)
1	70	29,50	176,2	33,33	16,85	1,37	4,38	0,00	1,47	0,77	2,23
2	70	30,20	176,2	16,48	16,48	0,68	4,28	0,05	1,40	0,79	2,23

Se observa un reparto bastante uniforme de caudales por bocas, entre 16,85 y 16,48 l/s. Además, las velocidades de salida del agua están entre 4,38 y 4,28 m/s. Son altas, lo que es adecuado para dificultar la colonización de las bocas.

En conjunto, la pérdida de carga en el dispositivo difusor se compone de una pérdida independiente del caudal (0,77 m, debida a la diferencia de densidades) y otra dependiente del caudal de 1,47 m, para un caudal de 120 m³/h.

Para un caudal intermedio de 39,71 m³/h o 11,03 l/s, tendríamos:

REPARTICIÓN DE CAUDALES EN TUBERÍA DIFUSORA PARA Q = 11,03 L/s (máximo Q escenario actual)

Número de bocas (por tubería)	2	Número de tuberías	1	Caudal por tubería (L/s)	11,03
Distancia entre bocas (m)	15,00	Caudal total (L/s)	11,03	Caudal medio por boca (L/s)	5,52
Profundidad primera boca (m)	29,5	Rugosidad (mm)	0,25	Longitud tubería (m)	16
Profundidad última boca (m)	30,2	Viscosidad cin. (m²/s)	8,970E-07	K equivalente	16,2
Coefficiente pérdida carga boca	1,5			Coefficiente uniformidad	1,037

Número de boca o tubo	Diámetro boca (mm)	Profundidad boca (m)	Diámetro tubo (mm)	Caudal		Velocidad		Pérdida de carga			
				tubo (L/s)	boca (L/s)	tubo (m/s)	boca (m/s)	en tubo (m)	en boca (m)	por densidad (m)	Total (m)
1	70	29,50	176,2	11,03	5,72	0,45	1,49	0,00	0,17	0,77	0,94
2	70	30,20	176,2	5,31	5,31	0,22	1,38	0,01	0,15	0,79	0,94

Se observa de nuevo un reparto bastante uniforme de caudales por bocas, entre 5,72 y 5,31 l/s. Además, las velocidades de salida del agua están entre 1,49 y 1,38 m/s, por encima de los 0,6 m/s recomendado.

La pérdida de carga en el dispositivo difusor independiente del caudal es de 0,77 m y la dependiente del caudal de 0,17 m, para un caudal de 39,71 m³/h.

Por último, para el caudal menor de 10,84 m³/h o 3,01 l/s, tendríamos:



REPARTICIÓN DE CAUDALES EN TUBERÍA DIFUSORA PARA Q = 3,01 L/s (Q temporada baja escenario actual)

Número de bocas (por tubería)	2	Número de tuberías	1	Caudal por tubería (L/s)	3,011111
Distancia entre bocas (m)	15	Caudal total (L/s)	3,01	Caudal medio por boca (L/s)	1,51
Profundidad primera boca (m)	29,5	Rugosidad (mm)	0,25	Longitud tubería (m)	16
Profundidad última boca (m)	30,2	Viscosidad cin. (m ² /s)	8,970E-07	K equivalente	29,2
Coefficiente pérdida carga boca	1,5			Coefficiente uniformidad	1,393

Número de boca o tubo	Diámetro boca (mm)	Profundidad boca (m)	Diámetro tubo (mm)	Caudal		Velocidad		Pérdida de carga			
				tubo (L/s)	boca (L/s)	tubo (m/s)	boca (m/s)	en tubo (m)	en boca (m)	por densidad (m)	Total (m)
1	70	29,50	176,2	3,01	2,10	0,12	0,54	0,00	0,02	0,77	0,79
2	70	30,20	176,2	0,91	0,91	0,04	0,24	0,00	0,00	0,79	0,79

Se observa de nuevo un reparto bastante uniforme de caudales por bocas, entre 2,10 y 0,91 l/s. Las velocidades de salida del agua están entre 0,54 y 0,24 m/s. Son velocidades bajas, pero asumibles teniendo en cuenta que se trata del caudal más bajo en el estado actual, que va a ser poco frecuente.

La pérdida de carga en el dispositivo difusor independiente del caudal es de 0,77 m y la dependiente del caudal de 0,02 m, para un caudal de 10,84 m³/h.

Comprobación de la ratio entre el área total de las bocas y el área de la sección del tubo

Según la Instrucción se recomienda que esta ratio sea inferior a 0,6 para asegurar la estabilidad hidráulica del flujo, y que no salga toda el agua por las primeras bocas.

En nuestro caso la ratio es 0,32 < 0,6, que se considera adecuado.

4.2 CÁLCULO HIDRÁULICO GENERAL DEL EMISARIO

4.2.1 Caudal que se puede verter por gravedad

CÁLCULO DEL CAUDAL MÁXIMO POR GRAVEDAD			
DATOS GENERALES			
Gravedad (m/s ²)	9,8	Densidad agua vertida (kg/m ³)	997,10
Viscosidad agua vertida (kg/m.s)	0,000894	Densidad agua mar (kg/m ³)	1026
Altura máxima s.n.m.m. (m)	51,10	Altura de marea considerada (m)	0,50
Caudal de diseño (L/s)	33,3	Caudal de diseño (m ³ /h)	120,00
DATOS TUBERÍA TRAMO TERRESTRE		CÁLCULOS TUBERÍA TRAMO TERRESTRE	
Características	FC 200	Nº Reynolds	236.678,63
Longitud (m)	1330,00	Factor fricción f	0,02
Diámetro (m)	0,20	Pérdida de carga continua (m)	15,49
Velocidad (m/s)	1,06	Pérdidas de carga localizadas (m)	0,40
		Pérdida de carga tubería tramo terrestre	15,89
DATOS TUBERÍA TRAMO PHD-MARINO		CÁLCULOS TUBERÍA TRAMO PHD-MARINO	
Características	PEAD DN 250/200	Nº Reynolds	268.647,71
Longitud (m)	1230,00	Factor fricción f	0,02
Diámetro (m)	0,250/0,200	Pérdida de carga continua (m)	11,96
Velocidad (m/s)	0,90	Pérdidas de carga localizadas (m)	0,95
		Pérdida de carga tubería tramo PHD-Marino	12,06



		CÁLCULOS DISPOSITIVO DIFUSOR	
		Pérdida de carga en difusor (m)	2,29
ALTURA DISPONIBLE VERTIDO (m)	33,21	PÉRDIDA DE CARGA TOTAL (m)	30,25

Suponiendo una rugosidad de las tuberías de 0,25 mm y considerando los coeficientes de pérdidas de carga localizadas indicados en el apartado de métodos de cálculo, el emisario podrá verter por gravedad los 33,33 l/s, es decir, 120 m³/h, por lo que no es necesario recurrir a la utilización de bombas.

5. CIRCULACIÓN DEL AIRE EN EL EMISARIO

5.1 PUNTO ALTO EN EL ARRANQUE DEL EMISARIO

En el punto de inicio de la PHD hay un cambio brusco de pendiente. Pueden formarse bolsas grandes de aire con ocasión de la variación del nivel del agua en la tubería (medio vacía en las horas de caudal bajo, llena en las horas de caudal alto), proceso que puede ocurrir bastantes días del año. En consecuencia, se ha proyectado colocar 2 ventosas trifuncionales con válvulas de compuerta DN80 en este punto alto, para conseguir un grado alto de seguridad.

5.2 PUNTO ALTO EN EL EXTREMO MARINO DE LA PERFORACIÓN HORIZONTAL DIRIGIDA

Según el plano de perfil longitudinal del emisario habrá un punto alto relativo al final de la perforación horizontal dirigida, ya que la trayectoria de la perforación será ascendente en su tramo final, con una pendiente del orden del 3 %, y, en cambio, el tramo siguiente será descendente, con una pendiente similar.

Para que no se vaya acumulando aire en el punto alto previo a un tramo descendente, o bien hay que colocar una ventosa en dicho punto alto, o bien el agua tiene que llevar cierta velocidad para arrastrarlas burbujas de aire hacia aguas abajo. Como este punto alto relativo está bajo el mar, una ventosa convencional no puede funcionar y no se considera viable colocar una tubería de desaireación que sobresalga sobre el nivel del mar, ya que se necesitaría una robusta estructura de soporte y un balizamiento adecuado, todo ello en medio del mar de la cala.

Según la fórmula de HR WALLINGFORD (2005), la velocidad de arrastre necesaria es:

$$\frac{v_{arr}}{\sqrt{g \cdot D}} = a + 0,56\sqrt{\sin \alpha}$$

Donde "a" es un valor comprendido entre 0,45 y 0,61, dependiendo del volumen de aire a arrastrar, lo que a su vez depende de varios factores (cantidad de aire que entra en la conducción, cantidad de aire o gases que se liberan de su solución en el agua, frecuencia con la que se alcanza una velocidad de arrastre, etc).

α es el ángulo del tramo descendente de la tubería con la horizontal.

Otra referencia es la fórmula, más antigua, de Wisner, Mohsen y Kouwen (1975), computada por Wheeler en una tabla que da las velocidades necesarias de arrastre en función del diámetro y la pendiente, sin considerar el parámetro “a”. Son velocidades más altas que las que se obtienen por la fórmula de HR WALLINGFORD, que es más actual.

Las velocidades de arrastre, para ser efectivas, han de ser frecuentes (se han de dar una vez al día, casi todos los días). También han de ser lo suficientemente duraderas para arrastrar el aire hasta el final de la tubería. Si no, el aire vuelve hacia el punto alto.

En este caso, en el tramo PHD marino-terrestre, tenemos:

CAUDAL NECESARIO PARA ARRASTRAR AIRE HACIA AGUAS ABAJO			
Datos		Resultados	
Gravedad (m/s ²)	9,8	Velocidad arrastre 1 (m/s)	0,60
Diámetro int. tub. (mm)	176,20	Velocidad arrastre 2 (m/s)	0,81
Pendiente (%)	1%	Caudal arrastre 1 (m ³ /s)	0,015
		Caudal arrastre 2 (m ³ /s)	0,020

La velocidad del efluente debe ser mayor a las velocidades de arrastre. En este caso, se tiene:

$$V. \text{ efluente} = 1,37 \text{ m/s} > V. \text{ arrastre} = 0,81 \text{ m/s}$$

Se cumple la premisa, por lo que queda garantizado el arrastre de las burbujas de aire.

Para el tramo terrestre, tenemos:

CAUDAL NECESARIO PARA ARRASTRAR AIRE HACIA AGUAS ABAJO			
Datos		Resultados	
Gravedad (m/s ²)	9,8	Velocidad arrastre 1 (m/s)	0,64
Diámetro int. tub. (mm)	200,00	Velocidad arrastre 2 (m/s)	0,86
Pendiente (%)	1%	Caudal arrastre 1 (m ³ /s)	0,020
		Caudal arrastre 2 (m ³ /s)	0,027

La condición quedaría:

$$V. \text{ efluente} = 1,06 \text{ m/s} > V. \text{ arrastre} = 0,86 \text{ m/s}$$

Se cumple de nuevo la condición.

Como se ha dicho anteriormente, se ha proyectado colocar 2 ventosas trifuncionales con válvulas de compuerta DN80 en el punto alto de la arqueta PHD para garantizar el buen funcionamiento y el aumento de la vida útil del emisario.