



## ANEJO 14. CÁLCULOS ESTRUCTURALES

### ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LA TUBERÍA .....	3
2.1 DATOS DE PARTIDA.....	3
2.1.1 Régimen medio del oleaje .....	5
2.1.2 Régimen extremal del oleaje .....	6
2.1.3 Caracterización del oleaje en la fase de servicio.....	8
2.1.4 Corrientes .....	8
2.2 OLEAJE EN LA FASE DE CONSTRUCCIÓN.....	8
3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO .....	8
3.1 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO .....	8
3.1.1 Acciones del oleaje.....	9
3.1.2 Acción de las corrientes .....	14
3.1.3 Empuje hidrostático .....	15
3.2 HIPÓTESIS SOBRE ACUMULACIÓN DE AIRE .....	15
4. RESULTADOS .....	16
4.1 TUBERÍA APOYADA EN EL FONDO MARINO. LASTRADO PROYECTADO Y A RETIRAR .....	16
4.2 TUBERÍA ENTERRADA.....	18
4.3 RESUMEN DE RESULTADOS .....	18
5. HUNDIMIENTO .....	18
5.1 COMPROBACIÓN FLOTABILIDAD .....	18
6. COMPROBACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE HUNDIMIENTO .....	20
6.1 TENSIONES DE FLEXIÓN.....	20
6.2 PRESIÓN INTERNA DEL AIRE .....	22



6.3 FUERZA DE TRACCIÓN .....	23
6.4 VELOCIDAD DE HUNDIMIENTO.....	27
7. JUSTIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE LA TORNILLERÍA Y EL ARMADO DE LOS LASTRES .....	30
7.1 MATERIALES.....	31
7.2 PROPIEDADES DE LAS VARILLAS ROSCADAS.....	32
7.3 PROPIEDADES DE LA TORNILLERÍA INOXIDABLE .....	33
7.4 COMPROBACIÓN VARILLAS PARA LOS LASTRES .....	34
7.5 COMPROBACIÓN DEL ARMADO .....	38
8. CÁLCULO MECÁNICO TUBERÍA PEAD .....	42
8.1 TUBERÍA PEAD .....	42
8.2 HIPÓTESIS I. PRESIÓN INTERNA POSITIVA .....	42
8.3 HIPÓTESIS II. ACCIONES EXTERNAS Y PRESIÓN INTERNA POSITIVA (ESTADO TENSIONAL Y DEFORMACIONES).....	43
8.4 HIPÓTESIS III. ACCIONES EXTERNAS (ESTADO TENSIONAL Y DEFORMACIONES) .....	44
8.5 HIPÓTESIS IV. ACCIONES EXTERNAS Y PRESIÓN INTERNA NEGATIVA (ESTADO TENSIONAL Y DEFORMACIONES).....	45

APÉNDICE Nº 1.- COMPROBACIÓN ESTABILIDAD FASE CONSTRUCCIÓN DEL NUEVO TRAMO DIFUSOR

APÉNDICE Nº 2.- CÁLCULO FLOTABILIDAD TUBERÍA NUEVO TRAMO DIFUSOR

APÉNDICE Nº 3.- IDENTIFICACIÓN FOTOGRÁFICA DEL LASTRADO EXISTENTE



## ANEJO 14. CÁLCULOS ESTRUCTURALES

### 1. INTRODUCCIÓN

En el presente anejo se justifica la estabilidad de la tubería apoyada del tramo marino del emisario, así como el dimensionamiento mecánico de los tubos de PE.

Se proyecta además la adecuación del lastrado de la conducción apoyada, lo que supondrá la retirada de los elementos no operativos que, por su posición y estado respecto a la conducción de FC existente, no ponga en riesgo la integridad de la misma, así como la incorporación de los nuevos lastres necesarios.

### 2. DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LA TUBERÍA

#### 2.1 DATOS DE PARTIDA

Según la *Instrucción para el proyecto de conducciones de vertido desde tierra al mar*, la estabilidad de los emisarios se ha de calcular para la altura de ola significativa correspondiente al temporal de cálculo, entendiéndose por tal el de período de retorno de cien años para la fase de servicio y el de período de retorno de un año para la fase de construcción. En el presente caso, puesto que la conducción ya se encuentra instalada y se trata de hacer una comprobación, no corresponde realizar una comprobación de estabilidad del emisario en fase constructiva.

Todos los datos de oleaje se obtienen del “Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado”.

Se utilizarán datos de los siguientes puntos:

#### Datos del modelo de simulación de la red SIMAR

El nodo de la red SIMAR próximo a Formentera que se utiliza es:

- Nodo nº: 2101105
- Longitud: 1,42° E
- Latitud: 38,75° N
- Profundidad: indefinida



*Imagen 1. Punto SIMAR 2101105 y el ámbito del emisario.*

#### Datos de mediciones reales y resultados derivados de las mismas

Se utilizarán los datos de la Boya de Dragonera, por ser la más cercana a Formentera entre las boyas existentes. En el mapa siguiente se observa la situación de La Sabina y de las dos únicas boyas relativamente cercanas, la de Dragonera, al oeste de Mallorca, y la de Capdepera, al este, siendo la primera la más representativa para este caso.



Imagen 2. Boyas de la zona

### 2.1.1 Régimen medio del oleaje

#### Rosa de oleaje anual

Rosa de altura significativa. Nodo SIMAR 2101105. Serie analizada: enero 1958 a mayo de 2017.

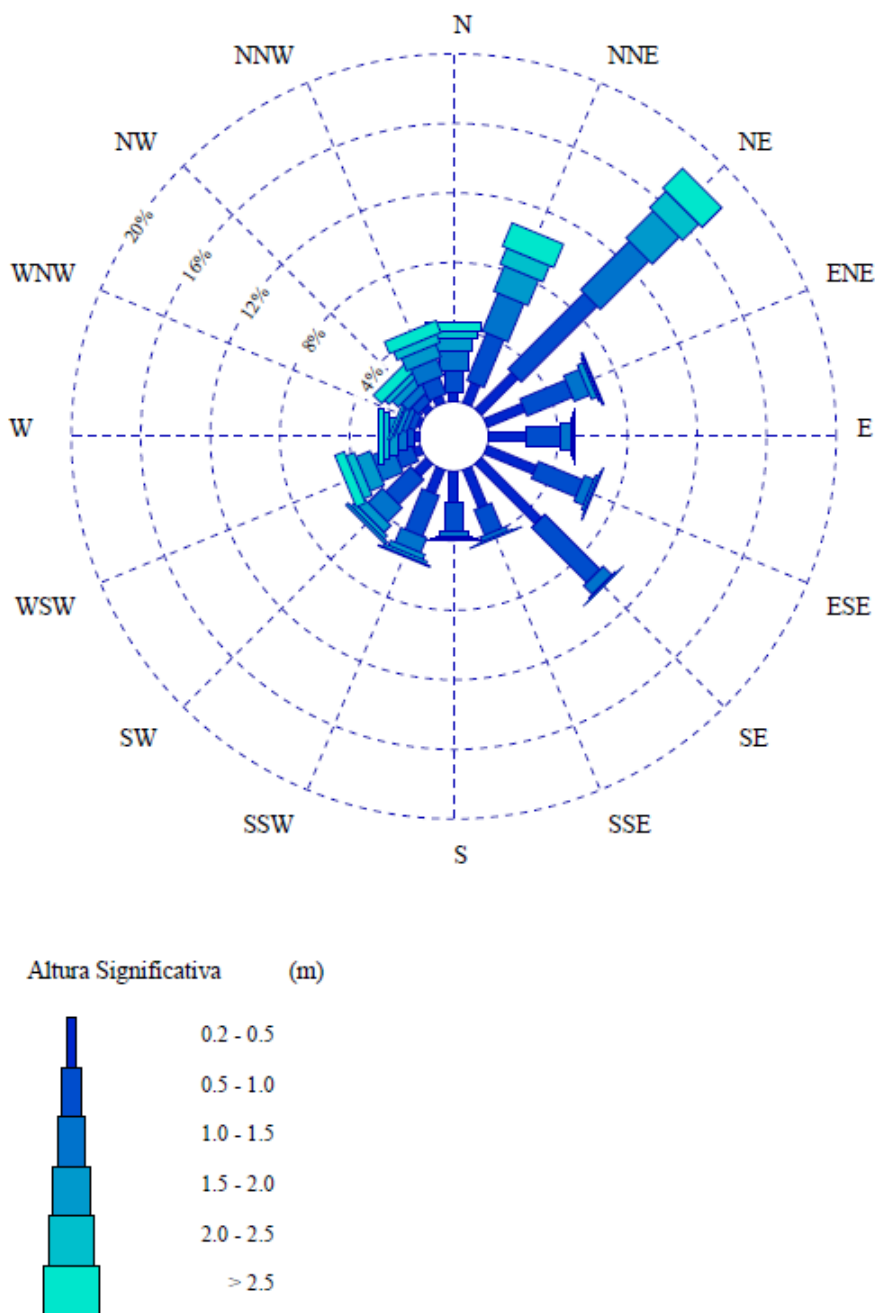


Imagen 3. Rosa de oleaje anual

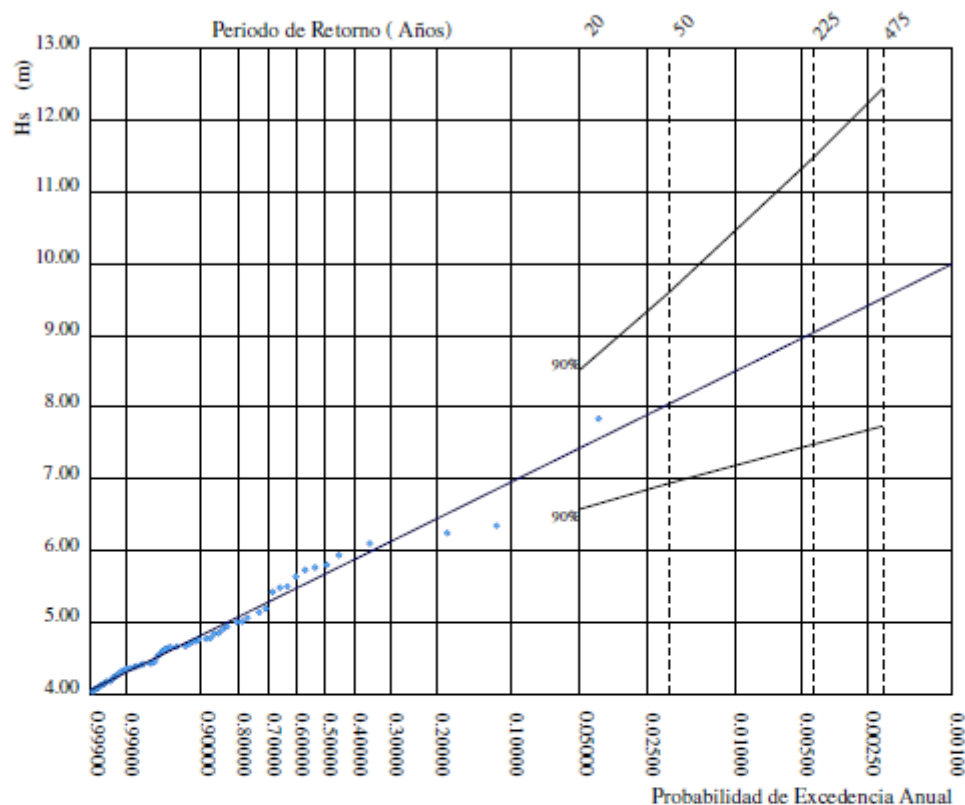
### 2.1.2 Régimen extremal del oleaje

Los resultados del modelo SIMAR son adecuados para caracterizar el régimen medio, pero no el extremal, al menos para periodos de retorno altos. Para caracterizar el régimen extremal para periodos de retorno altos nos basamos en los informes obtenidos a partir de datos reales de las boyas, en este caso de la boya de Dragonera.



### REGIMEN EXTREMAL ESCALAR DE OLAJE

LUGAR : Dragonera  
PARÁMETRO : Altura Significante SERIE ANALIZADA : Ene. 2007 - Nov. 2020  
PROFUNDIDAD : 135.0



P. de Retorno ( Años)	20.00	50.00	225.00	475.00
Estima Central de Hs (m)	7.43	8.05	9.03	9.52
Banda Sup. 90% Hs	8.53	9.61	11.48	12.45
Valor Esperado de Tp (s)	10.97	11.43	12.13	12.46
Prob. de Exc. en 20 Años	0.64	0.33	0.09	0.04
Prob. de Exc. en 50 Años	0.92	0.64	0.20	0.10

#### Parametros del Ajuste POT de Altura Significante

Umbral de Excedencia	4.00 (m)	Parametros de la	Alfa = 4.06
Num. Min. de Dias Entre Picos	5.00	Distribucion Weibull	Beta = 0.77
Num. Med. Anual de Picos (Lambda)	6.18	de Excedencias	Gama = 1.06

Relacion entre Altura Significante (m) y Periodo de Pico (s)

$$T_p = 3.89 H_s^{0.52}$$

Ilustración 1. Régimen extremal del oleaje

### 2.1.3 Caracterización del oleaje en la fase de servicio

Según los datos de la boya de Capdepera, los resultados correspondientes al régimen escalar son los siguientes:

Tabla 1. Caracterización del oleaje.

Variable	Periodo de retorno, $T_R$ (años)		
	100	225	475
Altura ola significativa, $H_s$ (m)	8,33	9,03	9,52
Periodo, $T$ (s)	12,64	13,03	13,28

No se aplicará ningún coeficiente de reducción direccional, a los que las tuberías están expuestas, quedando del lado de la seguridad.

En el anejo 13. *Estudio básico de dinámica litoral* se obtiene valores de  $H_s$  y  $T_p$  ligeramente diferentes a los mostrados en este apartado, dado que el proceso de obtención de estos datos se ha realizado por métodos diferentes. Ambos valores arrojan datos muy similares. Para el cálculo de la estabilidad del emisario se emplearán los datos de  $H_s$  y  $T_p$  que se proponen en este anejo por quedar del lado de la seguridad.

### 2.1.4 Corrientes

Para los cálculos de estabilidad, se superpondrá a las acciones derivadas del oleaje las derivadas de una corriente de fondo de las siguientes características:

- Velocidad: 0,2 m/s
- Ángulo de incidencia: 90° (el más desfavorable en el caso de las corrientes)

## 2.2 OLEAJE EN LA FASE DE CONSTRUCCIÓN

A efectos del cumplimiento de la Instrucción, hay que calcular la altura significativa de ola para un periodo de retorno de 1 año para determinar las solicitaciones mecánicas a que se verá sometido el emisario por efecto del oleaje en fase de construcción.

En este caso la conducción ya se encuentra instalada y se trata de hacer una comprobación, por lo que la tubería no estará más expuesta en fase de ejecución que en fase de servicio y no se hace necesaria esta comprobación.

## 3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Se emplea el método recogido en la *Orden de 13 de julio de 1993 por la que se aprueba la Instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos desde tierra al mar*.





Se calcula cada sección o tramo del emisario aisladamente, despreciándose la solidaridad existente entre unos tramos y otros, lo que hace que el cálculo, desde este punto de vista, sea conservador.

Para estudiar la estabilidad debe analizarse:

- Estabilidad sobre el fondo marino
- Estabilidad durante el transporte y hundimiento
- Estabilidad durante la construcción

Las acciones exteriores que actúan sobre la tubería para determinar la estabilidad sobre el fondo marino y durante la construcción son:

- Acción del oleaje
- Acción de las corrientes
- Empuje hidrostático

### **3.1.1 Acciones del oleaje**

Las fuerzas que actúan sobre la tubería, derivadas del oleaje, se calculan con las siguientes fórmulas, derivadas de la teoría lineal de ondas de Airy y recogidas en la Instrucción:

$$\text{Fuerza de inercia: } F_i = C_i \cdot \rho \cdot a \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

$$\text{Fuerza de arrastre: } F_D = C_D \cdot \rho \cdot u^2 \cdot \frac{D}{2}$$

$$\text{Fuerza de sustentación: } F_L = C_L \cdot \rho \cdot u^2 \cdot \frac{D}{2}$$

Donde:

U<sub>a</sub>: Velocidad del agua de mar, normal al emisario por efecto del oleaje (m/s)

a: Aceleración del agua de mar normal al emisario por efecto del oleaje (m/s<sup>2</sup>)

D: Diámetro exterior del emisario (m)

ρ<sub>a</sub>: Densidad del agua de mar (kg/m<sup>3</sup>)

C<sub>a</sub>= 1,00

C<sub>i</sub>= 3,30

C<sub>e</sub>= 1,25



Los valores máximos de las fuerzas pueden calcularse por las siguientes fórmulas, derivadas de las anteriores  
(Fuente: *Manual técnico para instalaciones submarinas de tuberías de polietileno*):

$$F_i = \pi \cdot C_i \cdot f \cdot \gamma \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{H_o}{L_o}$$

$$F_D = C_D \cdot f^2 \cdot \gamma \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{H_o}{L_o} \cdot \frac{H_o}{D}$$

$$F_L = C_L \cdot f^2 \cdot \gamma \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{H_o}{L_o} \cdot \frac{H_o}{D}$$

Siendo:

f = factor de refracción e incidencia

C<sub>i</sub> = coeficiente de inercia

C<sub>D</sub> = coeficiente de arrastre

C<sub>L</sub> = coeficiente de elevación

ρ = densidad del agua de mar

γ = peso específico del agua de mar

D = diámetro externo de la tubería

H<sub>o</sub> = altura de la ola en aguas profundas

L<sub>o</sub> = longitud de la ola en aguas profundas

El factor f expresa la conjunción de los fenómenos de refracción, asomeramiento y cambio de dirección del oleaje al aproximarse a la costa, así como la disminución de las acciones sobre la tubería si la incidencia del oleaje no es perpendicular a la directriz de la misma.

La fuente de los siguientes gráficos es el *Manual técnico para instalaciones submarinas de tuberías de polietileno*, de Pipelife Norge AS.

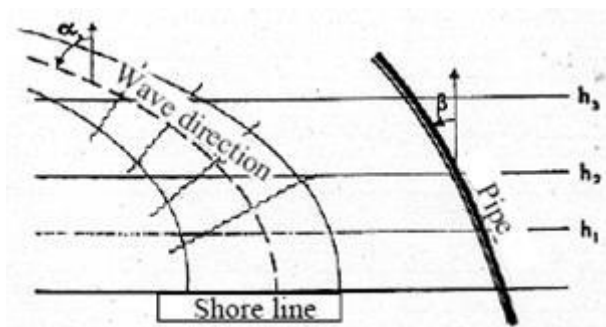


Ilustración 2. Valor de  $\beta$  según dirección de la tubería respecto a la costa

Cuando la tubería es perpendicular a la costa, el ángulo  $\beta$  es 0. En este caso, el siguiente gráfico indica el valor del factor de refracción e incidencia en función de la dirección del oleaje en aguas profundas (ángulo  $\alpha$ ) y de la profundidad  $h$  a la que está situada la tubería en cada punto en relación con la longitud de onda en aguas profundas,  $L_0$ .

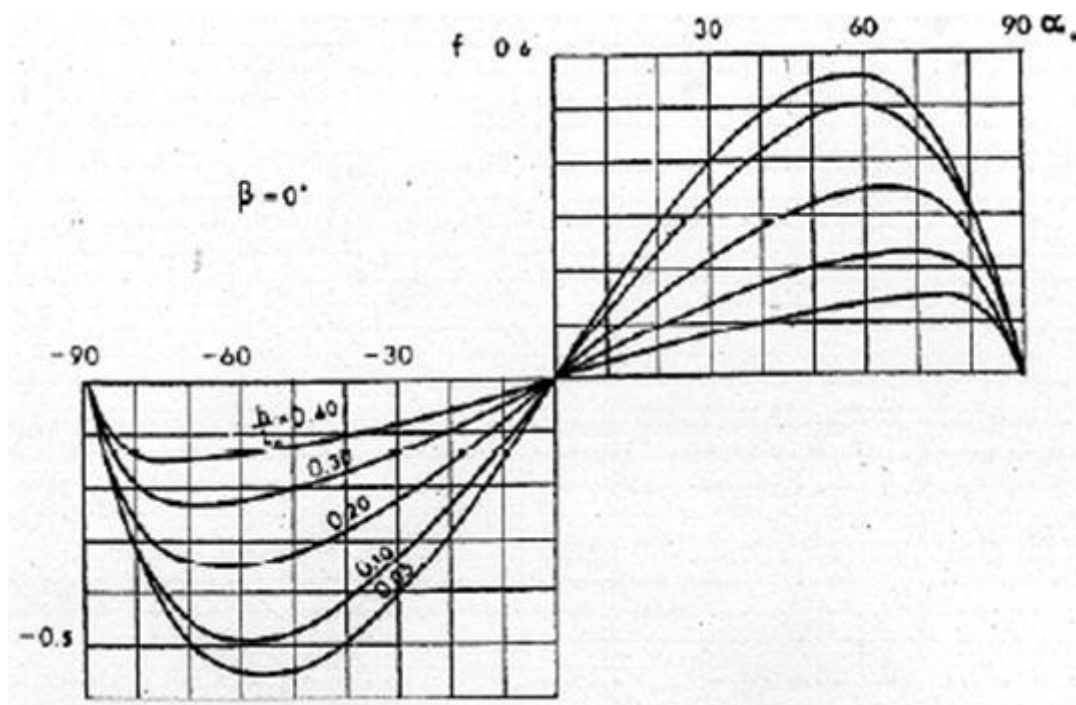


Ilustración 3. Cálculo del factor de refracción e incidencia en función de la dirección del oleaje para  $\beta=0$

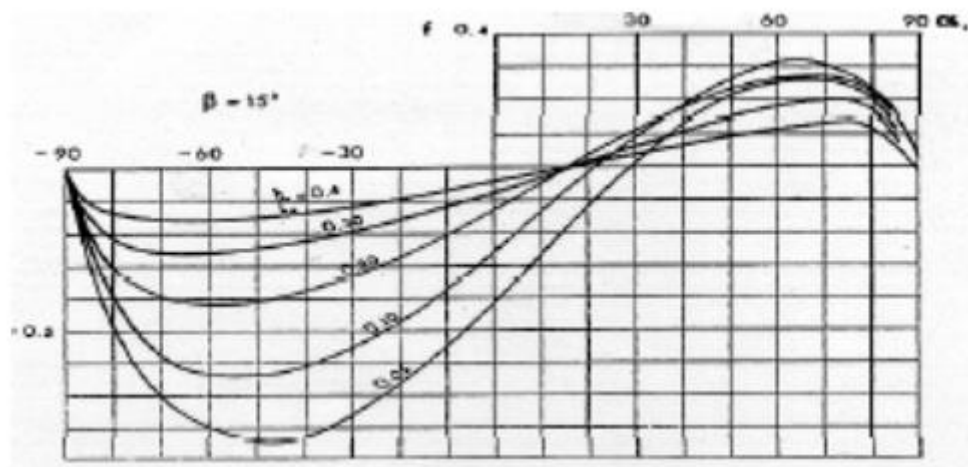


Ilustración 4. Cálculo del factor de refracción e incidencia en función de la dirección del oleaje para  $\beta = 15^\circ$

Aunque estos gráficos están elaborados bajo la hipótesis de líneas batimétricas rectas y paralelas a la línea de costa, es una aproximación al problema real.

Por otra parte, no se considera el efecto amortiguador de la pradera de posidonia en la reducción del oleaje. Aunque con los conocimientos actuales este efecto no es cuantificable, se sabe que es significativo.

Para este caso concreto se consideran los siguientes valores:

- Ángulo entre emisario y línea ortogonal de costa:  $0^\circ$
- Ángulo entre dirección oleaje y línea ortogonal de costa:
  - o SE:  $-14^\circ$
  - o NE:  $76^\circ$
  - o NNE:  $53^\circ$
  - o  $\beta$ :  $0^\circ$

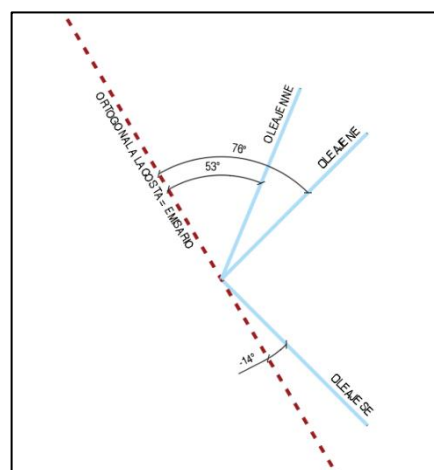


Ilustración 5. Esquema de las direcciones principales para el cálculo.



Imagen 4. Proyección del emisario sobre cartografía.

Tabla 2. Valores del factor de refracción

FACTOR REFRACCIÓN			
$\beta$	$\alpha$	f	
0	76	0,4	Temporal NE
0	53	0,5	temporal NNE
0	-14	-0,2	Temporal SE
	más desfavorable	0,4	

El valor más desfavorable corresponde al temporal NNE, con un factor de refracción de 0,5, que además es el temporal al que se encuentra más expuesta debido a la morfología de la cala.

Las fuerzas de arrastre y de inercia están desfasadas 90°, pues así lo están  $U_a$  y  $a$ , luego no actuarán conjuntamente.

A continuación, se muestra la metodología empleada para obtener los valores de las velocidades ( $U_a$ ) y aceleraciones ( $a$ ), partiendo de la teoría lineal de ondas de Airy. La formulación empleada para la velocidad horizontal es la siguiente:

$$U_x = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh\left(\frac{2\pi(z+d)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cdot \cos \theta \text{ en m/s}$$

donde:

H: Altura de ola (m)

g = 9.81 m/s<sup>2</sup> (aceleración de la gravedad)

T: Periodo pico asociado a la ola (s)

L: Longitud de onda asociado a la ola (m)

d: Calado (m)

z: Profundidad desde el nivel medio (m)

θ: Fase de la onda

Como se puede observar, la velocidad máxima es obtendrá para θ=2π.

La aceleración horizontal se define como:

$$A_x = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh\left(\frac{2\pi(z+d)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cdot \sin \theta \text{ en m/s}^2$$

En este caso, la aceleración es máxima para θ=π/2. Como se puede observar, ambas variables se hallan desfasadas en π/2.

Estas formulaciones sólo son válidas en lo que se denominan aguas intermedias, que vienen definidas como aquellas que son de transición entre aguas profundas y aguas someras. Se evalúa que estamos en aguas intermedias si se cumple que:

$$\frac{1}{25} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$$

### 3.1.2 Acción de las corrientes

Las fuerzas que actúan sobre la tubería, derivadas del oleaje, se calculan con las siguientes fórmulas, derivadas de la teoría lineal de ondas de Airy y recogidas en la Instrucción:



- Fuerza de arrastre:

$$F = C * \rho * U^2 * \frac{D}{2} \quad \left(\frac{N}{m}\right)$$

- Fuerza de elevación:

$$F = C * \rho * U^2 * \frac{D}{2} \quad \left(\frac{N}{m}\right)$$

donde:

U<sub>a</sub>: Velocidad del agua de mar normal al emisario por efecto del oleaje (m/s)

D: Diámetro exterior del emisario (m)

ρ<sub>a</sub>: Densidad del agua de mar (kg/m<sup>3</sup>)

C<sub>a</sub>= 0,90

C<sub>e</sub>= 0,50

En este caso, tal y como se ha indicado en el apartado 2.1.4 del presente anejo, la velocidad considerada será de 0,2 m/s.

### 3.1.3 Empuje hidrostático

El empuje hidrostático corresponde a la fuerza vertical y hacia arriba que ejerce el agua sobre el volumen sumergido siendo su valor el dado por la siguiente fórmula:

$$E = \rho_a \times V$$

donde:

ρ<sub>a</sub>: Densidad del agua de mar (kg/m<sup>3</sup>)

V: volumen del cuerpo (m<sup>3</sup>)

## 3.2 HIPÓTESIS SOBRE ACUMULACIÓN DE AIRE

Se han calculado diferentes escenarios:

- Tubería llena de aire
- Tubería llena de efluente con un 0% de aire ocluido
- Tubería llena de efluente con un 10% de aire ocluido
- Tubería llena de efluente con un 20% de aire ocluido
- Tubería llena de efluente con un 30% de aire ocluido



Dado que el perfil longitudinal no presenta puntos altos en el tramo marino y se dispondrán ventosas de aireación, se considera que una hipótesis adecuada para estimar la cantidad de aire ocluido es el 10%.

## 4. RESULTADOS

Los resultados se han desarrollado en una hoja de cálculo que se adjunta como apéndice 1 del presente anejo.

### 4.1 TUBERÍA APOYADA EN EL FONDO MARINO. LASTRADO PROYECTADO Y A RETIRAR

En un primer cálculo, se ha dividido la tubería en los siguientes tramos:

TRAMO	PK inicio – PK final	LONGITUD (m)	EXPOSICIÓN TUBERÍA
Tramo marítimo (-13 a -19,2 m)	4+000 - 4+120	120	Apoyada
Tramo marítimo (-11 a -13 m)	3+750 - 4+000	250	Apoyada
Tramo marítimo (-9 a -11 m)	3+568 - 3+750	182	Apoyada

Se ha evaluado de esta forma el lastrado necesario, concluyéndose que es suficiente con un lastrado mínimo que aporte un peso lineal de 65,04 kg/m.

Posteriormente, se ha hecho un recuento de los lastres existentes, clasificándolos según su operatividad, descartando para el cálculo los lastres no operativos y proyectando la retirada de los lastres que, siendo no operativos, dicha retirada no pueda causar daños en la tubería por su disposición actual. Dicho recuento, que se muestra a continuación, se ha hecho por metros de profundidad y por tipología de lastre. En el *Apéndice nº 3. Identificación fotográfica del lastrado existente* se muestra un reportaje fotográfico de los diferentes lastres existentes.

PROFUNDIDAD (m)	ANTIARRASTROS (Ud)	LASTRES OPERATIVOS (Ud)					LASTRES NO OPERATIVOS (Ud)				
		TIPOLOGÍA					TIPOLOGÍA				
		U invertida	Semicircular	Anillo	Triangular	Total	U invertida	Semicircular	Anillo	Triangular	Total
-20 (Difusor)	5	6	12	0	0	18	0	0	0	0	0
-19 (Difusor)	2	8	5			13	3				3
-18	1	5	5		2	12	2				2
-17	2	1			1	2				1	1
-16						0					0
-15		1	1			2					0
-14	1	1	1		2	4	1			1	2
-13	3				4	4	1			2	3
-12				21		21		2	9	1	12
-11		11		14		25	7		3	2	24
-10		7				7	9				9
-9		2				2	3				3
						110					59





PROYECTO REFUNDIDO DE ADECUACIÓN DEL EMISARIO SUBMARINO Y  
VERTIDO AL MAR DE LA EDAR DE FORMENTERA

LASTRES A RETIRAR (Ud)					LASTRES TOTALES (Ud)					LONGITUD TUBERÍA (m)	INTERD. MEDIA OPERATIVA (m)
TIPOLOGÍA					TIPOLOGÍA						
U invertida	Semicircular	Anillo	Triangular	Total	U invertida	Semicircular	Anillo	Triangular	Total		
6	12	0	0	18					18	16	0,94
11	5			16					16	24	2,00
2				2	9	5	0	2	16	34	3,09
			1	1	1	0	0	3	4	8	8,00
				0	0	0	0	0	0	4,5	-4,50
				0	1	1	0	0	2	9	9,00
1			1	2	3	1	0	4	8	18	6,00
1			2	3	2	0	0	8	10	36	12,00
	2	7	1	10	0	4	37	2	43	114	5,70
7			2	9	25	0	17	4	46	148	6,17
4				4	20	0	0	0	20	95	15,83
				0	5	0	0	0	5	86	86,00
				65					188		

En total, se proyecta la retirada de 65 lastres y 14 bloques antiarrastreros.

Posteriormente se ha calculado el lastrado existente, según las siguientes tablas. Se ha considerado una reducción del 20 % del peso de los lastres para contemplar la degradación de los mismos.

LASTRADO EXISTENTE					
PROFUNDIDAD (m)	LASTRES OPERATIVOS (Ud)				
	TIPOLOGÍA				
	U invertida	Semicircular	Anillo	Triangular	Total
-13 a -19,2	8	7	0	9	24
-11 a -13	11	0	35	0	46
-9 a -11	9	0	0	0	9

LASTRADO EXISTENTE							
PESO (kg)					PESO REDUCIDO 80 % (kg)	LONGITUD TRAMO (m)	PESO LINEAL (kg/m)
TIPOLOGÍA							
U invertida	Semicircular	Anillo	Triangular	Total			
3.841,92	2.898,00	0,00	3.311,28	10.051,20	8.040,96	111,00	72,44
5.282,64	0	14.112,00	0,00	19.394,64	15.515,71	260,00	59,68
4.322,16	0	0,00	0,00	4.322,16	3.457,73	181,00	19,10

Por último, se ha comparado el lastrado existente con el lastrado de cálculo, comprobándose que sería suficiente con los lastres operativos actuales para garantizar la estabilidad de la tubería.

LASTRADO DE CÁLCULO			
PROFUNDIDAD (m)	PESO LINEAL (kg/m)	ESTADO	COEF. SEGURIDAD
-13 a -19,2	12,56	Cumple	5,77
-11 a -13	12,56	Cumple	4,75
-9 a -11	12,56	Cumple	1,52

No obstante, dada la incertidumbre sobre el estado real del lastrado existente, se decide proyectar un nuevo lastrado complementario sobre toda la tubería que quedaría de la siguiente forma:

LASTRADO PROYECTADO			
PROFUNDIDAD (m)	LONGITUD TRAMO (m)	PESO UNIDAD (kg)	INTERDISTANCIA (m)
-19,2 a -21,4 (tramo difusor)	100	452,88	3
-13 a -19,2	111,00	289,44	5
-11 a -13	260,00	289,44	5
-9 a -11	181,00	289,44	5

LASTRADO PROYECTADO				
UNIDADES (Ud)	PESO LINEAL EXISTENTE (kg/m)	PESO LINEAL APORTADO (kg/m)	PESO LINEAL TOTAL (kg/m)	COEF. SEGURIDAD
35,00	-	150,96	150,96	-
24,00	72,44	57,89	130,33	10,38
53,00	59,68	57,89	117,56	9,36
38,00	19,10	57,89	76,99	6,13

Como se observa en la tabla superior, se proyecta un lastrado complementario con una interdistancia de 5 m y un peso por unidad de 289,44 kg para todo el tramo apoyado existente, y de 452,88 kg para el nuevo tramo difusor con interdistancia de 3 m, según los planos de detalle y los cálculos mostrados en el *Apéndice nº 1.- Comprobación estabilidad fase construcción* del presente anejo.

## 4.2 TUBERÍA ENTERRADA

No se interviene sobre la tubería enterrada.

## 4.3 RESUMEN DE RESULTADOS

En el *Apéndice nº 1.- Comprobación estabilidad fase construcción* se muestran los resultados obtenidos de los cálculos.

## 5. HUNDIMIENTO

Teniendo en cuenta que el tramo difusor del emisario submarino se proyecta en polietileno y que se ha previsto la puesta en obra de la misma por el método de flotación, se ha estudiado la flotación de la tubería lastrada para estudiar la necesidad de disponer flotadores o reducir el lastrado en fase de hundimiento y suplementarlo posteriormente mediante lastres complementarios de hormigón armado.

### 5.1 COMPROBACIÓN FLOTABILIDAD

Respecto al nuevo tramo difusor a disponer, puesto que la presión nominal de la conducción es de 10 atm, dimensionamos la longitud del anillo de modo que la flotabilidad de la tubería lastrada y llena de aire sea de aproximadamente el 65%, según se recomienda para evitar una posible abolladura del tubo, mientras éste está lleno de aire, por el excesivo peso del lastre.



Los cálculos se han desarrollado en una hoja Excel que se adjunta en el *Apéndice nº 2- Cálculo de la flotabilidad de la tubería* del presente anejo, arrojando los siguientes resultados:

La tubería llena de aire pesa por ml 43 Kg y el empuje hidrostático que le incide es de 201 kg, presentando una flotabilidad positiva de 159 Kg.

En primer lugar, se comprueba la posibilidad de generar la botadura y hundimiento con todos los lastres colocados.

Partiendo del prediseño de lastrado del apartado anterior en el que se dimensiona cada lastre con un peso de 452,88 kg, si no se quitan lastres y la tubería está llena de aire, el aporte por ml sobre la instalación es de 151 Kg mientras que el empuje hidrostático que le incide es de -65 kg. Sumando estos datos a los de la tubería se obtiene una flotabilidad positiva de -72 kg, con un coef. de hundabilidad de 0,728; la tubería flotaría, si bien el coeficiente de hundabilidad se aleja del 0,65 recomendado para evitar abolladuras en el tubo. En el momento de llenado de la tubería con agua pasaríamos a una flotabilidad negativa de 26 kg, es decir el emisario se hundiría.

Para reducir el coef. de hundabilidad a 0,65 se dispondrán flotadores que aportarán 30 Kg de empuje hidrostático por metro lineal.

Por tanto, se podrán disponer el 100% de los lastres en el momento de la botadura (tubería llena de aire) sin empuje adicional por medio de flotadores a lo largo del tubo. De esta manera, se evita disponer de lastres de hundimiento que deberían ser colocados en una segunda fase de actuación.

Será fundamental garantizar la estanqueidad de la tubería para evitar la entrada no controlada de agua a su interior y provocar de esta manera un hundimiento no controlado de la misma. Para garantizar esta estanqueidad se dispondrá en cada extremo una tapa ciega de acero inoxidable embridada a la que se le implantará un picaje con una válvula de cierre que permita regular la entrada de agua por un extremo y la salida de aire por el otro.

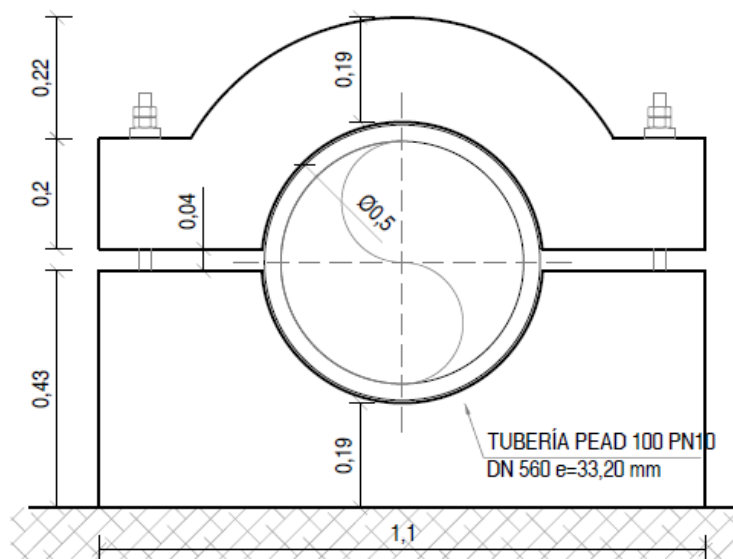


Imagen 5. Geometría de los lastres del nuevo tramo difusor.

Respecto al lastrado complementario del tramo apoyado existente, se utilizará el tipo de lastre de la imagen siguiente que permitirá su instalación con una afectación mínima sobre la tubería que, por la fragilidad del material, podría sufrir daños.

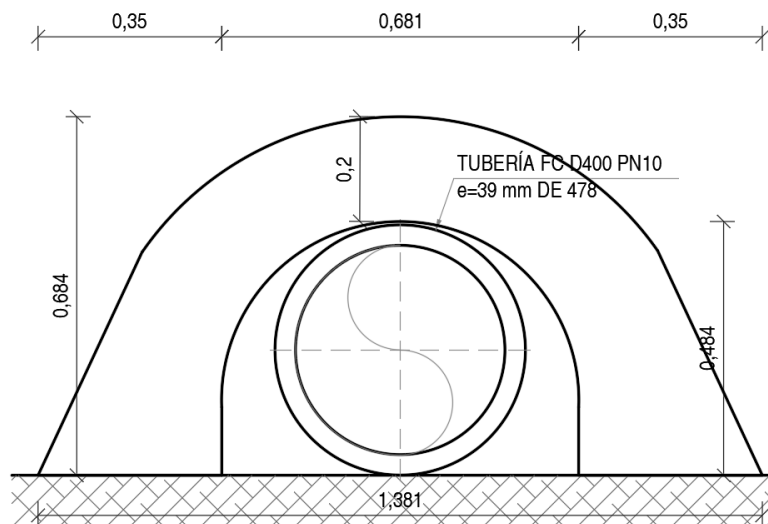


Imagen 6. Geometría de los lastres complementarios del tramo apoyado existente.

## 6. COMPROBACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE HUNDIMIENTO

### 6.1 TENSIONES DE FLEXIÓN

Una tubería de PE, gracias a su flexibilidad, puede doblarse hasta un determinado grado de curvatura. No obstante, hay un radio mínimo que no puede sobrepasarse si quiere evitarse el pandeo.



Durante la flexión se producirán tensiones y deformaciones tanto en dirección longitudinal como radial. Cuando el radio de curvatura es demasiado pequeño, la tubería se pandeará. Especialmente durante el proceso de hundimiento de una tubería subacuática, es necesario asegurarse de que el radio de curvatura es mayor que el radio crítico de pandeo.

Durante la instalación, el equilibrio entre fuerzas - peso de los bloques de hormigón, fuerzas originadas por los barcos, fuerzas hidráulicas, fuerzas de las corrientes y el oleaje u otras fuerzas – define la configuración y la curvatura máxima.

Cuando una tubería se dobla hasta una curvatura de radio R en la dirección axial, se producirá una deformación  $\epsilon_a$  en la pared de la tubería. Esta deformación puede expresarse de la siguiente manera:

$$\epsilon_a = \frac{r}{R} = \frac{D}{2R}$$

r = radio de la tubería

R = radio de curvatura

D = diámetro exterior de la tubería

La tensión máxima en la pared de la tubería puede calcularse con la ley de Hook:

$$\sigma_a = E \cdot \epsilon_a = E \cdot \frac{D}{2R}$$

A efectos prácticos, un radio de curvatura de  $R = 30 \cdot D$  puede considerarse el radio mínimo para una tubería de PE durante su hundimiento ( $SDR < 26$ ).

En la Tabla siguiente se determinan las propiedades mecánicas orientativas para materiales de polietileno que deben utilizarse en los cálculos ( $T=20^\circ\text{C}$ )

Tabla 3. Propiedades mecánicas de referencias para materiales de polietileno

Propiedad	Unidad	PE80	PE100
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	950	961
Tensión de régimen 50 años $\sigma_d$ , 50	MPa	5,0/6,4*	8,0/6,3*
Esfuerzo de régimen en tiempo cero $\sigma_0$ , 0	MPa	8,0/10,4*	9,4/12,0*
Módulo de elasticidad en tiempo cero $E_0$	MPa	800	1050
Módulo de elasticidad tras 50 años $E_{50}$	MPa	150	200
Índice de Poisson $\nu$	-	0,4-0,5	0,4-0,5
Coefficiente medio de expansión térmica $\alpha$	$^\circ\text{C}^{-1}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$

\* Los coeficientes de seguridad son 1,6 y 1,25 respectivamente



### Comprobación de la tensión máxima:

Considerando para la conducción los valores PE 100

$$D = 0,500 \text{ m}$$

Módulo de elasticidad (E0) = 700 MPa El radio de curvatura mínimo será de:

$$R_{\min} = 30 \cdot D; R_{\min} = 30 \cdot 0,50 = 15,00 \text{ m}$$

La tensión de tracción máxima viene determinada por la expresión:

$$\sigma_a = E \cdot \frac{D}{2 \cdot R} = 700 \cdot \frac{0,50}{2 \cdot 15,00} = 11,67 \text{ MPa}$$

Si consultamos la Tabla 5.1.I, encontramos que la tensión de reventón para cargas de corta duración es 15 MPa.

El coeficiente de seguridad contra roturas es:

$$F = \frac{15}{11,67} = 1,29$$

A groso modo, en situaciones con cargas combinadas, por ejemplo, cargas por presión, por temperaturas, oleaje, etc, recomendamos:

$$R_{\min} = 60 \cdot D = 60 \cdot 0,50 = 30,0 \text{ m}$$

## **6.2 PRESIÓN INTERNA DEL AIRE**

La presión interna depende de la carga de los contrapesos de hormigón. El cálculo de la tasa de llenado de aire  $a_a$  ya lo hemos determinado anteriormente.

Para obtener un tramo lleno de aire que equilibre el peso de los lastres de los collarines de hormigón, debemos aplicar una presión interna (p) en la tubería.

$$p = a_a \cdot H$$

Siendo:

P= presión interna (m.c.a.)

$a_a$ = grado de llenado de aire

H = profundidad del agua (m)

Como se deduce de la fórmula anterior, la presión interna depende de la profundidad del agua. Esto significa que hemos de incrementar la presión a medida que aumenta la profundidad. El compresor ha de tener capacidad



suficiente aire frente a una presión que corresponde a la profundidad máxima, incluyendo la caída de presión en las tuberías de transmisión.

Tomando los valores de la conducción:

PE100 SDR 17

D = 500 mm

$a_a = 35\%$

Cota de vertido = -21,4 m

Resultando:

$$P_{5m} = 0,35 \cdot 5m = 1,75 \text{ m.c.a.} = 0,17 \text{ bar}$$

$$P_{10m} = 0,35 \cdot 10m = 3,5 \text{ m.c.a.} = 0,34 \text{ bar}$$

$$P_{15m} = 0,35 \cdot 15m = 5,25 \text{ m.c.a.} = 0,51 \text{ bar}$$

$$P_{21,4m} = 0,35 \cdot 21,4m = 7,49 \text{ m.c.a.} = 0,73 \text{ bar}$$

### 6.3 FUERZA DE TRACCIÓN

La fuerza de arrastre en el extremo de la tubería se aplica para controlar la posición de la tubería y para aumentar el radio de flexión durante el hundimiento.

Si el porcentaje de carga es inferior al 50%, lo que normalmente sucede, el radio crítico se produce en la superficie marina. Si no, será en el fondo.

Llevar a cabo un cálculo correcto del proceso de hundimiento es complicado y debe realizarse con la ayuda de programas informáticos. No obstante, hay un método sencillo de realizar un cálculo aproximado de la fuerza de tracción. Este método se basa en la teoría del eslabón de la cadena y es válido para aguas profundas. Las figuras siguientes ilustran la situación.

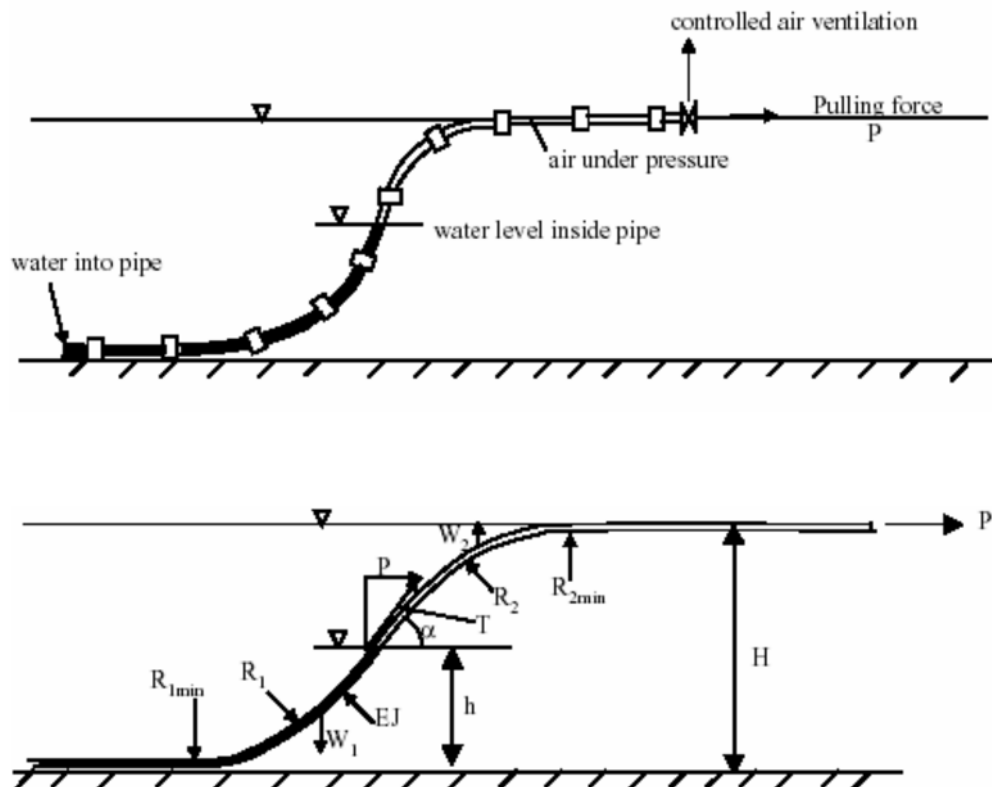


Imagen 7. Proceso, forma y parámetros técnicos de una tubería de PE durante su hundimiento

Las aguas profundas se definen como:  $H > 12 \cdot D$

En aguas poco profundas (fase inicial del hundimiento es imposible aplicar una fuerza en el extremo antes de que la tubería esté ensamblada a una instalación fija. Cuando se sumerge el extremo para conectar la tubería hemos de verificar que el radio de flexión es mayor que el radio de pandeo.

A este fin, se aplicará la fórmula:

$$R = \frac{L^2}{2 \cdot h}$$

R = radio de flexión

L = longitud sumergida de la tubería (longitud de voladizo) H = profundidad de conexión

Puede que sean necesarios varios puntos de ataque para sumergir la tubería durante la conexión (y no sólo el del extremo).

De la Figura 5.3.I, tenemos los siguientes parámetros:





$H$  = profundidad (m)

$h$  = altura interna del agua (m)

$W_2$  = flotabilidad neta en el tramo lleno de aire (N/m)  $W_1$  = peso neto del tramo lleno de agua (N/m)

$P$  = fuerza de tracción (N)

$T$  = fuerza de tracción en el punto de cambio (N)

$\alpha$  = ángulo formado por el eje de la tubería y la horizontal en el punto de cambio.  $R_1$  = radio de flexión en el tramo lleno de agua (m)

$R_2$  = radio de flexión en el tramo lleno de aire (m)  $EJ$  = rigidez de la tubería

#### Comprobación de la fuerza de tracción:

El hundimiento ha de ser realizado utilizando un coeficiente de seguridad frente a pandeo de 2,0.

Tomando los valores de la conducción PE100

PE100 SDR 17

$d = 440,60$  mm

$a_a = 35\%$

Cota de vertido = -21,4 m

- Radio de flexión mínimo:

El radio de flexión mínimo lo tomamos de la siguiente tabla:

Tabla 4. Radio de flexión mínimo

Clase SDR	Relación de flexión permisible $R/D - F=1,5$
33	44
26	34
22	36
17	21
11	13
9	11

$SDR = 17 \rightarrow R/D = 21$

$$R_{min} = 21 \cdot 0,50 = 10,50 \text{ m}$$

- Fuerza de tracción necesaria al extremo de la tubería:

Para determinar la fuerza de tracción hemos de conocer  $w_1$  y  $w_2$ . Aplicando las siguientes fórmulas:



$$w_1 = a_a \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \gamma_w$$

$$w_1 = 0,35 \cdot \pi \cdot \frac{0,440^2}{4} \cdot 1028 \cdot 9,81 = 536,42 \text{ N}$$

$$w_2 = \frac{1 - a_a}{a_a} \cdot w_1$$

$$w_2 = \frac{1 - 0,35}{0,35} \cdot 536,42 = 996,20 \text{ N}$$

La máxima fuerza de tracción:

$$P_1 = w_1 \cdot R_{\min}$$

$$P_2 = w_2 \cdot R_{\min}$$

Siendo  $w_2 > w_1$ , la máxima fuerza de tracción vendrá dada por:

$$P_2 = 996,20 \cdot 10,50 = 10460,10 = 10,46 \text{ kN}$$

- Máxima tensión de torsión en la pared de la tubería:

La fuerza de tracción máxima en la tubería aparece en el punto de retorno. Dada por la siguiente expresión:

$$T = P + w_1 (1 - a_a) \cdot H$$

$$T = 10460,10 + 536,42 (1 - 0,35) \cdot 21,4 = 17.921,70 \text{ N} = 17,92 \text{ kN}$$

La tensión correspondiente sobre la pared de la tubería:

$$\sigma = \frac{T}{\frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2)}$$

$$\sigma = \frac{17921,70}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,50^2 - 0,440^2)} = 404.790,62 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 0,40 \text{ MPa}$$

Además, habrá tensión en dirección longitudinal debido a la presión interna e índice de Poisson:

$$\sigma_{\max} = \frac{\nu \cdot p}{2} (\text{SDR} - 1)$$

Siendo:

$\nu$  = Índice de poisson (0,4-0,5)

$p$  = Presión interna

$$o_{1max} = \frac{0,5 \cdot 0,125}{2} (17 - 1) = 0,50 MPa$$

La tensión de tracción máxima es la suma de  $o + o_{NAS}$ .

$$o_{1max} = (0,40 + 0,50) = 0,90 MPa$$

- El ángulo  $\alpha$  en el punto de retorno de la curva S.

El ángulo  $\alpha$  en el punto de retorno viene dado por la fórmula:

$$\cos \alpha = \frac{P}{P + w_1 \cdot h}$$

$$\cos \alpha = \frac{10460,10}{10460,10 + 536,42 \cdot 21,4} = 0,47; \alpha = 61,97^\circ$$

#### 6.4 VELOCIDAD DE HUNDIMIENTO

Para evitar que las fuerzas de aceleración actúen sobre la tubería, la velocidad de hundimiento se mantendrá lo más constante posible durante la instalación.

Puesto que en la práctica siempre se produce alguna variación de la velocidad, es también importante mantener la velocidad a un nivel bajo.

Si tomamos la ley de Newton:

$$K = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

K = aceleración

M = masa en movimiento

$\Delta v$  = variación de la velocidad

$\Delta t$  = variación del tiempo

Vemos que un cambio importante en la relación  $\Delta v / \Delta t$  creará una fuerza K elevada que actuará en el agua y en la tubería. Si mantenemos v baja, nos aseguramos de que  $\Delta v$  también se mantiene baja para un periodo de tiempo dado,  $\Delta t$ .

La velocidad de hundimiento la rige el caudal Q que entra en la tubería y la velocidad de deshinchado de las boyas. Este caudal depende a su vez de la presión de impulsión disponible,

$$\Delta h = a_a \cdot H - p_i$$



$\Delta h$  = caída de presión disponible (m.c.a.)  $H$  = profundidad (m)

$p_i$  = presión interna (m.c.a.)

$a_a$  = tasa de llenado de aire de diseño

La caída de presión puede expresarse:

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

$f$  = coeficiente de fricción ( $\approx 0,02$ )

$L$  = longitud del tramo lleno de agua (m)  $D$  = diámetro interno (m)

$V$  = velocidad (m/s)

$g$  = aceleración de la gravedad ( $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$ )

$k_s$  = coeficiente de pérdida singular

Si combinamos las dos expresiones, la velocidad de hundimiento será:

$$v = \left[ \frac{2 \cdot g \cdot D \cdot (a_a \cdot H - p_i)}{f \cdot L + k_s \cdot D} \right]^{1/2}$$

De la fórmula anterior se deduce que  $v$  es dependiente de la longitud del tramo lleno de agua ( $L$ ), de la profundidad ( $H$ ) y de la presión interna ( $p_i$ ). El resto de parámetros son prácticamente constantes. Para mantener una velocidad constante, será preciso regular la presión interna ( $i$ ) según los cambios que se produzcan en  $L$  y  $H$ .

Dado que la relación entre  $L$  y  $H$  se conoce, es posible calcular una “curva de hundimiento” para  $p_i$  como función de  $L$ . Esta curva es esencial durante la instalación.

$\Delta h$  aparecerá como una subpresión en la tubería y debe ser controlada para evitar el pandeo.

Para facilitar el control de la velocidad de hundimiento en la fase inicial del procedimiento de inmersión, es útil tener un elevado valor para el coeficiente de pérdida singular  $k_s$ . Esto puede conseguirse utilizando un diámetro de entrada reducido (pieza enT) con respecto a la tubería principal. Un diámetro apropiado estaría entre  $1/3 D$  a  $1/20 D$  (comprobar la subpresión).

Se recomienda mantener esta apertura constante durante el hundimiento.

Existe una velocidad de hundimiento máxima a la que la tubería de PE que se está sumergiendo corre el riesgo de oscilar. Esta velocidad puede calcularse aproximadamente con la fórmula:



$$v = \frac{k \cdot \pi \cdot D^2}{2 \cdot S \cdot H^2 \cdot n} \cdot \left( \frac{E}{2 \cdot \text{SDR} \cdot \rho} \right)^{1/2}$$

K = coeficiente de soporte (k=1,0 para tub. Soportadas libremente, k=2,25 para tub. Fijas)

S = número Strouhals ( $\approx 0,2$ )

D = diámetro externo (m)

H = profundidad máxima de instalación (m)

n = coeficiente de seguridad (suponer n=2,0)

E = módulo de elasticidad (corta duración) (kN/m<sup>2</sup>)

$\rho$  = masa de la tubería, contenido (agua) y agua que oscila por unidad de volumen de la tubería.

Si asumimos que  $E = 8 \cdot 10^5$  kN/m<sup>2</sup>,  $k = 2,0$  y una profundidad máxima de 50 m, podemos transformar la fórmula en:

$$V = 1,2 \cdot D^2 \cdot (\text{SDR})^{-1/2}$$

La fórmula da una indicación sobre la velocidad máxima de hundimiento pero el riesgo de pandeo también ha de ser considerado. Para pequeños diámetros la fórmula es un poco conservadora en comparación con la experiencia. Normalmente, las oscilaciones durante el hundimiento no afectarán negativamente a la tubería.

#### Comprobación de la velocidad máxima de hundimiento:

Tomando los valores de la conducción:

PE100 SDR 17

D = 500 mm

Cota de vertido = -21,4 m

La intención es hundir la tubería a una velocidad constante de  $v = 0,3$  m/s. La carga es igual a una tasa de llenado de aire  $a_a=35\%$ . Suponer una apertura de entrada de agua durante el hundimiento de  $\frac{1}{4}$  del diámetro interno de la tubería.

Determinamos la sobrepresión de equilibrio utilizando la fórmula:

$$p_b = a_a \cdot H$$

Esto nos da:



Long (m)	H (m)	Pb (mca)
100	21,4	7,49

Para calcular la presión interna (pi) utilizaremos la expresión:

$$p_i = a_a \cdot H - \frac{v^2 (f \cdot L + k_s \cdot d)}{2 \cdot g \cdot d}$$

Siendo:

d = 440,60 mm

f = 0,02

K<sub>s</sub> = 8

v = 0,3 m/s

Determinando la siguiente tabla:

Long (m)	H (m)	Pb (mca)	Pi (mca)
100	21,4	7,49	34,94

Determinando la velocidad de hundimiento con la fórmula siguiente:

$$V = \left[ \frac{2 \cdot g \cdot D \cdot (a_a \cdot H - p_i)}{f \cdot L + k_s \cdot D} \right]^{1/2}$$

$$V_{max,100} = \left[ \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 0,50 \cdot (0,35 \cdot 100 - 34,94)}{0,02 \cdot 100 + 8 \cdot 0,50} \right]^{1/2} = 0,313 \text{ m/seg}$$

La velocidad crítica en el punto final es de 0,313 m/s.

La velocidad máxima estará limitada por la fuerza de resistencia al avance debido a la corriente que se produce cuando la tubería se mueve a través del agua. No habrá riesgo de pandeo de la tubería si se lleva a cabo un hundimiento controlado

## 7. JUSTIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE LA TORNILLERÍA Y EL ARMADO DE LOS LASTRES

Los lastres proyectados se conforman con dos partes unidas entre sí mediante dos pernos de acero inoxidable, una base plana que apoya sobre el lecho marino y sobre la que descansa la tubería del emisario en una cuna dejada a tal efecto, y que queda abrazada con la parte superior formando un elemento solidario. Entre el hormigón y la tubería de polietileno se dispone de dos láminas de neopreno de 3 mm de espesor.



## 7.1 MATERIALES

### Hormigón armado

Los lastres proyectados son de hormigón armado HA-30/P/20/IIb+Qb con cemento MR y acero B-500S.

A efectos de los cálculos estructurales, la densidad del hormigón es:

- Hormigón armado:  $\gamma = 2.400 \text{ kg/m}^3$  [23,53 kN/m<sup>3</sup>]

### Varillas roscadas

En la norma UNE-EN ISO 3506 se indica que, para aplicaciones marinas o similares, se precisan aceros con contenidos en cromo y níquel del orden del 20% y de molibdeno entre el 4,5% y el 6%.

El índice PRE (Pitting Resistance Equivalent), recogido en la norma *UNE EN 10088 Aceros inoxidables. Parte 1: Relación de aceros inoxidables*, es un coeficiente que determina la resistencia a la corrosión por picaduras del acero inoxidable a partir de la siguiente ecuación, que considera la buena influencia en la aleación del Molibdeno y de Nitrógeno:

Para aceros austeníticos:  $PRE = \%Cr + 3,3 \%Mo + 30\%N$  Resto:  $PRE = \%Cr + 3,3 \%Mo + 16 \%N$

Para los aceros habitualmente empleados, los valores son los que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 5. Composición química de aceros habitualmente empleados. Fuente: UNE-EN ISO 3506

Tipo	ASTM	EN	Cr	Ni	Mo	C	N	Otros	PRE
Martensítico	410	1.4006	12,5	-	-	0,08	-		12
Martensítico	420	1.4028	12	-	-	0,35	-		12
Ferrítico	430	1.4016	16	-	-	0,35	-		16
Austenítico	304	1.4301	17,5	8	-	0,07	-		17,5
Austenítico	304L	1.4307	17,5	8	-	0,03	-		17,5
Austenítico	321	1.4541	17	9	-	0,08	-	TI	17
Austenítico	316	1.4401	16,5	10	2	0,07	-		23,1
Austenítico	316L	1.4404	16,5	10	2	0,03	-		23,1
Duplex	S32101	1.4162	21,5	1,5	0,3	0,03	0,22	5Mn	25,5
Duplex	S32304	1.4362	23	4,8	0,3	0,02	0,1		26,5
Duplex	S31803	1.4462	22	5,7	3,1	0,02	0,17		35
Duplex	S32750	1.4410	25	7	4	0,02	0,27		43

Para agua potable se considera suficiente con PRE 17, mientras que para agua de mar se requiere PRE cercanos o mayores a 40. Para agua residual doméstica o asimilable a doméstica es habitual al menos PRE 23.

En cuanto a las varillas roscadas empleadas en la unión entre piezas, se considera que, como mínimo, serán de acero austenítico resistente a la corrosión de calidad AISI 316L/1.4404/X2CrNiMo17-12-2 (PRE 23,1), siendo preferible el uso de aceros inoxidables superdúplex, superferríticos o superausteníticos con un 6% de molibdeno, puesto que la inmersión continua en agua de mar se considera una exposición severa (IMOA), con las siguientes propiedades mecánicas tal y como vienen especificadas en la norma EN 10088-2:

Tabla 6. Propiedades mecánicas del acero de las varillas roscadas. Fuente: UNE-EN ISO 3506

Designa.	Forma	Espesor máximo (mm)	Límite elástico mín. (N/mm <sup>2</sup> )		Resistencia a tracción (N/mm <sup>2</sup> )	Alargamiento de rotura	
			R <sub>p0.2</sub>	R <sub>p1.0</sub>		A<3mm	A≥3mm
1.4404	C	6	240	270	530 a 680	40	40
	H	12	220	260			
	P	75	220	260	520 a 670	45	45

En lo referente al límite elástico, R<sub>p0.2</sub> representa el límite elástico convencional al 0,2%, R<sub>p1.0</sub> el límite elástico convencional al 1,0% que se determina para los aceros inoxidables austeníticos (como el AISI- 316L).

## 7.2 PROPIEDADES DE LAS VARILLAS ROSCADAS

Los calibres normalizados según DIN 975 se indican en la siguiente tabla:

Tabla 7. Calibres normalizados de varillas roscadas según DIN 975

Diámetro	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20
Paso	0,5	0,7	0,8	1	1,25	1,5	1,75	2	2	2,5	2,5
Diámetro	M22	M24	M27	M30	M33	M36	M39	M42	M45	M48	M52
Paso	2,5	3	3	3,5	3,5	4	4	4,5	4,5	5	5
Diámetro	M56	M60	M64	M68	M72	M76	M80	M85	M90	-	-
Paso	5,5	5,5	6	6	6	6	6	6	6	-	-



La sección resistente nominal, A<sub>s,nom</sub>, se calcula mediante la siguiente fórmula (UNE-EN ISO 3506):

$$A_{s,nom} = \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2$$





, siendo  $d_2$  el diámetro en los flancos de base de la rosca externa (norma ISO 724) y  $d_3$  el diámetro interior de la rosca exterior (para calcular la tensión) obtenido a partir de la expresión:

$$d_3 = d_1 - \frac{H}{6}$$

, donde  $d_1$  es el diámetro interior de la base de la rosca exterior (norma ISO 724) y H la altura del triángulo generador de la rosca (norma ISO 68-1). En la siguiente tabla se indica la sección resistente para diferentes métricas:

Tabla 8. Sección resistente en función de la métrica

Métrica	Paso (mm)	Sección resistente (mm <sup>2</sup> )
M3	0,50	5,03
M4	0,70	8,78
M5	0,80	14,20
M6	1,00	20,10
M8	1,25	36,60
M10	1,50	58,00
M12	1,75	84,30
M14	2,00	115,00
M16	2,00	157,00
M18	2,50	192,00
M20	2,50	245,00
M22	2,50	303,00
M24	3,00	353,00
M27	3,00	459,00
M30	3,50	561,00
M33	3,50	694,00
M36	4,00	917,00

### 7.3 PROPIEDADES DE LA TORNILLERÍA INOXIDABLE

La norma UNE-EN ISO 3506-1 hace referencia a los aceros de clases A1 a A5, C1 a C4 y F1, que cubre los aceros que pertenecen a los siguientes grupos:

Aceros austeníticos: A1 a A4

Aceros martensíticos: C1 a C4

Aceros ferríticos: F1

En la tabla 2 de esta norma se indican las características mecánicas de pernos, tornillos y bulones de los aceros austeníticos, que se reproduce a continuación:

Tabla 9. Características mecánicas de pernos, tornillos y bulones de aceros austeníticos

Grupo de acero	Clase de acero	Clase de calidad	Resistencia mínima a la tracción, $R_m$ [MPa]	Límite elástico convencional mínimo al 0,2%, $R_{p,0,2}$ [MPa]	Alargamiento de rotura, A [mm]
Austenítico	A1, A2	50	500	210	0,6d
	A3, A4	70	700	450	0,4d
	A5	80	800	600	0,3d

Por otro lado, de acuerdo con la norma DIN 267 parte 11, las propiedades mecánicas de la tornillería inoxidable son las siguientes:

Tabla 10. Propiedades mecánicas de la tornillería inoxidable

Material	Clase de resistencia	Gama de diámetros	Tornillos			Tuercas
			Resistencia a la tracción, $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Límite de alargamiento del 0,2% mínimo, $R_{p,0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Alargamiento de rotura mínimo, A [mm]	Tensión de ensayo $S_p$ [N/mm <sup>2</sup> ]
A2	50	≤M39	500	210	0,6d	500
A4	70	≤M20	700	450	0,4d	700

## 7.4 COMPROBACIÓN VARILLAS PARA LOS LASTRES

### Geometría

El lastre dispuesto en el nuevo tramo difusor, del que solo se proyecta un tipo, se instalará en el tramo de emisario DN560 apoyado con la siguiente geometría (cotas en m):

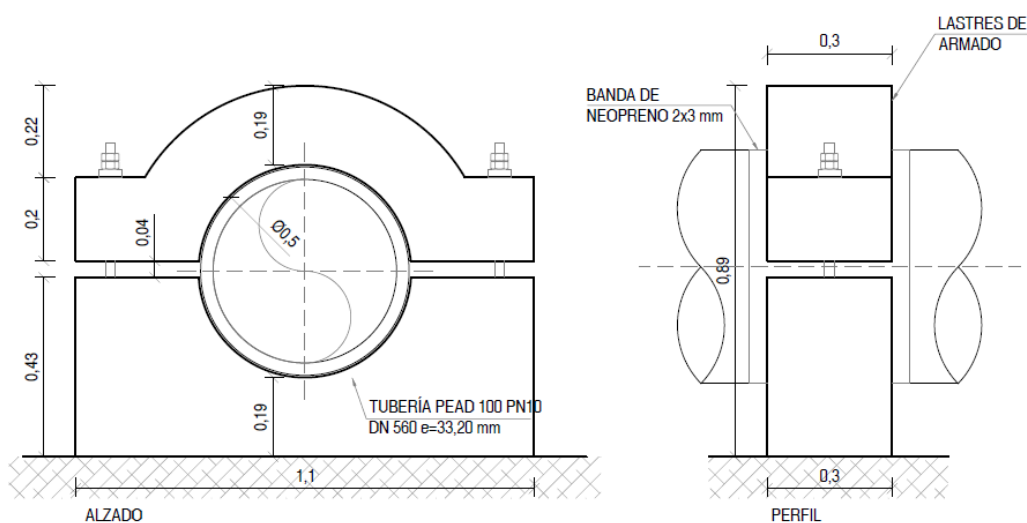


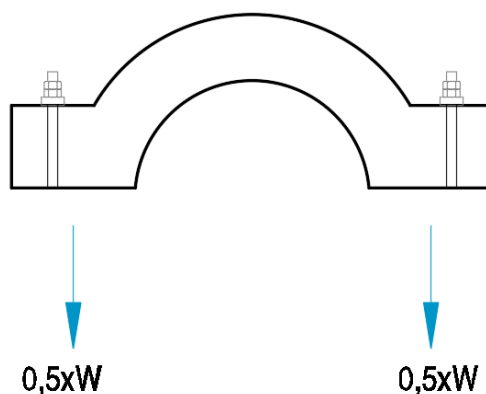
Imagen 8. Geometría lastre proyectado.

### Acciones

A efectos del dimensionamiento de esas varillas se considera tanto la acción debida al peso propio de la base, al ser el elemento de mayor volumen que colgaría de los dos pernos, como la fuerza de arrastre lateral.

El lastre proyectado tiene un espesor de 0,20 m, por lo que el peso de cada pieza será:

- Elemento superior:  $W_1 = 0,25 \text{ m}^2 \times 0,30 \text{ m} \times 23,53 \text{ kN/m}^3 = 1,76 \text{ kN}$
- Elemento inferior:  $W_2 = 0,379 \text{ m}^2 \times 0,30 \text{ m} \times 23,53 \text{ kN/m}^3 = 2,67 \text{ kN}$
- Total:  $W = W_1 + W_2 \approx 4,40 \text{ Kn}$



*Imagen 9. Tracción en los pernos.*

Es decir, cada perno se supone sometido a una tracción (valor característico) de valor  $0,5 \times 4,40 = 2,20 \text{ kN}$ . El valor de cálculo, considerando situación persistente o transitoria, será:

$$t^* = 1,35 \times 2,20 = 2,97 \text{ kN}$$

En cuanto a la comprobación a cortante, se considera el caso de temporal «máximo», situación en la que puede haber una fuerza de arrastre lateral sobre la tubería que, en la zona menos profunda, se traslada a 0,65 kN por lastre.

Se considera la situación más desfavorable en la que cada perno deba resistir un cortante de cálculo de valor:

$$v^* = 1,5 \times 0,65 = 0,975 \approx 1 \text{ kN}$$

### Comprobación a cortante

La comprobación de un tornillo solicitado en la dirección normal a su eje en el estado límite último de resistencia a cortante pasa por satisfacer la condición de que el esfuerzo cortante de cálculo,  $F_{v,Ed}$ , sea inferior a la resistencia a cortante del tornillo,  $F_{v,Rd}$ , como estipula el artículo 58.6 de la EAE-11:

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

, donde  $A_s$  es el área resistente a tracción,  $f_{ub}$  es la tensión última a tracción del tornillo, y  $\gamma_{M2}$  el coeficiente parcial de seguridad del acero de valor  $\gamma_{M2}=1,25$  (tabla 15.3 EAE-11). No se comprueba la resistencia a aplastamiento al estar dispuesto el perno sobre un elemento de hormigón de espesor superior al mínimo estipulado para realizar esta comprobación según la EAE-11.

Para el valor  $A_s$  se ha adoptado el correspondiente a la sección resistente de la métrica de la varilla roscada, en vez de los valores indicados en la tabla 58.7 de la EAE-11.

En lo que respecta a la resistencia a tracción, en la tabla 58.7 de la EAE-11 se indica el valor de la resistencia a tracción de distintas calidades, pero no se incluye el acero inoxidable. En la norma UNE- EN ISO 3506-1 se indica que para tornillería A4 la resistencia a la tracción mínima es 700 MPa, valor que se ha considerado en el cálculo.

Considerando una métrica M24, se tiene  $A_s = 353 \text{ mm}^2$  y sustituyendo se obtiene la resistencia a cortante del tornillo:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 700 \cdot 353}{1,25} = 118.608 \text{ N} = 118 \text{ kN}$$

, valor muy superior al cortante de cálculo.

#### Comprobación a tracción

La comprobación de un tornillo solicitado en la dirección de su eje en el estado límite último de resistencia a tracción pasa por satisfacer la condición de que el esfuerzo de tracción de cálculo,  $F_{t,Ed}$ , sea inferior a la resistencia a tracción del tornillo,  $F_{t,Rd}$ , como estipula el artículo 58.7 de la EAE-11:

$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$$

La comprobación de la resistencia al punzonamiento del elemento bajo la tuerca no se ha considerado al tratarse de un elemento de hormigón armado de gran espesor.

La resistencia a tracción del tornillo viene dada por la siguiente expresión indicada en la EAE-11, que se considera válida para el caso de varillas roscadas de acero inoxidable (el coeficiente 0,85 se considera para los procedimientos que impliquen arranque de viruta, como el caso de los pernos de anclaje):

$$F_{t,Rd} = 0,85 \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

donde  $A_s$  es el área resistente a tracción,  $f_{ub}$  es la tensión última a tracción del tornillo, y  $\gamma_{M2}$  el coeficiente parcial de seguridad del acero de valor  $\gamma_{M2}=1,25$  (tabla 15.3 EAE-11).

Considerando el valor indicado en la norma UNE-EN ISO 3506-1 para la resistencia a la tracción mínima en el caso de tornillería A4, 700 MPa, y una métrica M24 con valor del área resistente a tracción de 353 mm<sup>2</sup>, se tiene:

$$F_{t,Rd} = 0,85 \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 0,85 \frac{0,9 \cdot 700 \cdot 353}{1,25} = 151.125 \text{ N} = 151 \text{ kN}$$

, valor muy superior al de cálculo.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que en piezas sometidas a tracción la pérdida de material debido a la corrosión es mayor al estar relativamente más tensionadas. Por este motivo se ha adoptado una sección superior a la estricta por cálculo.

#### Profundidad de empotramiento

En cuanto a la profundidad de empotramiento, se recurre a la tabla de declaración de prestaciones proporcionada por la casa HILTI para varillas roscadas ancladas que se reproduce a continuación:

Tabla 11. Declaración de prestaciones. Fuente: HILTI

Diámetro del elemento	d	[mm]	8	10	12	16	20	24	27	30
Diámetro nominal de la broca	d <sub>0</sub>	[mm]	10	12	14	18	22	28	30	35
Rango de profundidad de empotramiento efectiva y profundidad del orificio perforado	$h_{ef} = h_0$	[mm]	60 a 160	60 a 200	70 a 240	80 a 320	90 a 400	96 a 480	108 a 540	120 a 600
Diámetro máximo del orificio de paso en el soporte <sup>1)</sup>	d <sub>f</sub>	[mm]	9	12	14	18	22	26	30	33
Esesor mínimo del elemento de hormigón	$h_{min}$	[mm]	$h_{ef} + 30$ $\geq 100 \text{ mm}$			$h_{ef} + 2 \cdot d_0$				
Par máximo	T <sub>máx</sub>	[Nm]	10	20	40	80	150	200	270	300
Separación mínima	s <sub>min</sub>	[mm]	40	50	60	75	90	115	120	140
Distancia mínima al borde	c <sub>min</sub>	[mm]	40	45	45	50	55	60	75	80

<sup>1)</sup> Para orificios de paso de mayor tamaño, véase "TR 029, sección 1.1"

La varilla M24 seleccionada se empotrará al menos 480 mm en la pieza inferior.

#### Solución a proyectar

Finalmente, se adopta como solución una varilla roscada de métrica M24 de acero inoxidable A4 DIN 975, arandela plana de métrica M24 de acero inoxidable A4 DIN 125, tuerca hexagonal de métrica M24 de acero inoxidable A4/80 DIN 934 y tuerca de sacrificio de zinc de métrica M24.



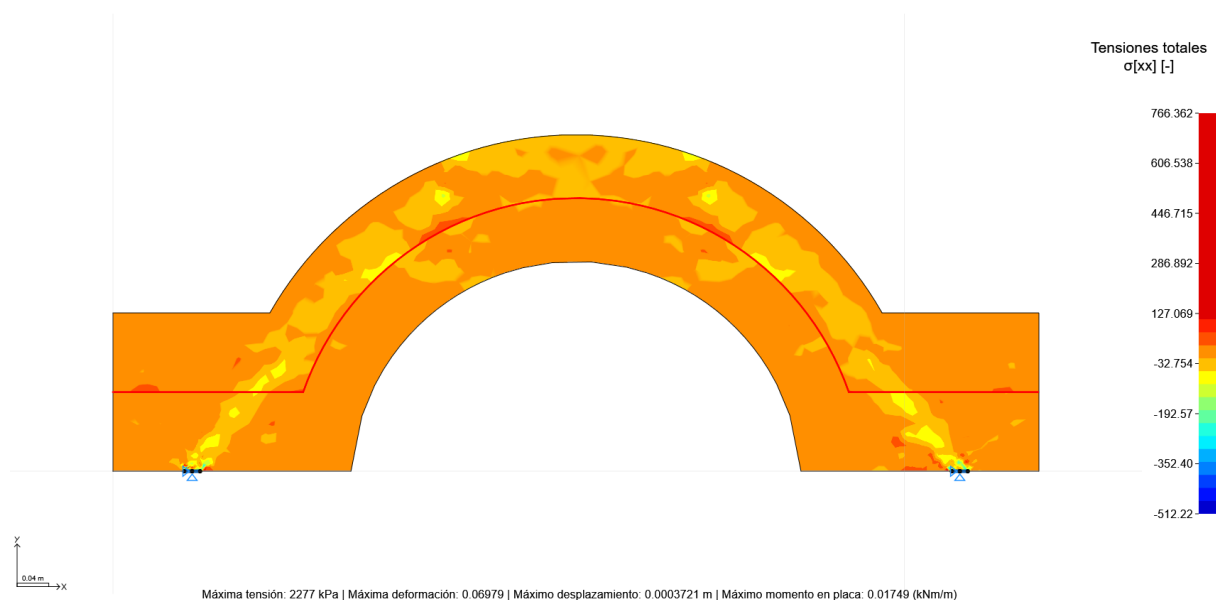
El taladro se debe realizar a una distancia de cualquier borde no menor de  $2,5 \varnothing$ , es decir como mínimo  $2,5 \times 24 = 60$  mm.

La varilla se empotrará en la base una longitud mínima de 480 mm.

### 7.5 COMPROBACIÓN DEL ARMADO

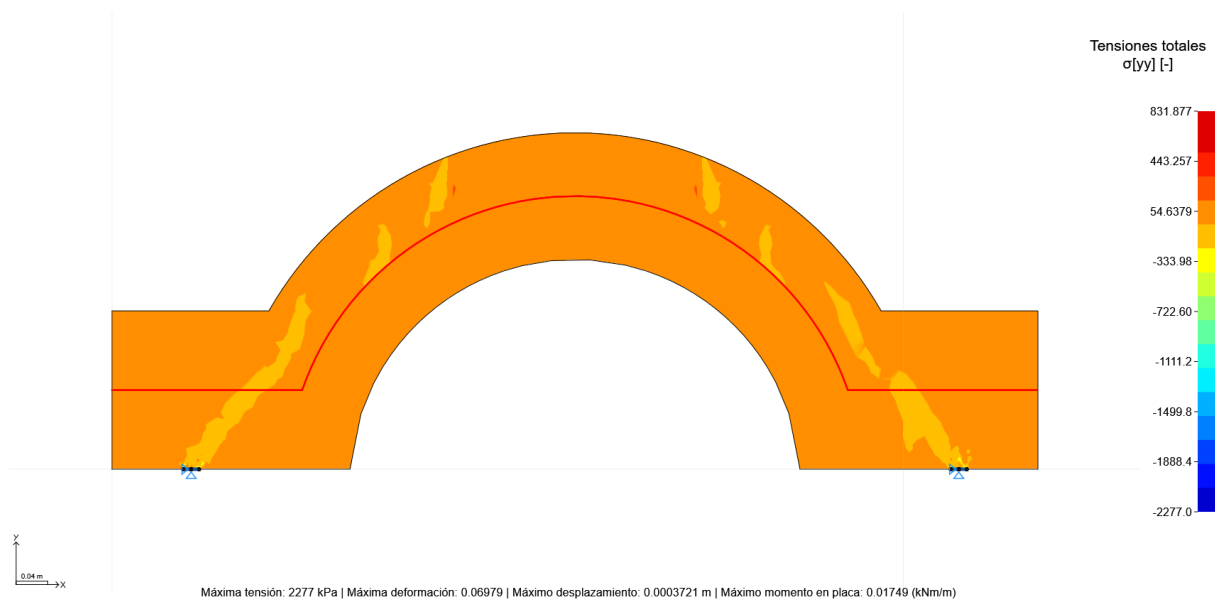
Se ha realizado una modelización 2D por elementos finitos de la pieza superior sometida a su propio peso mayorado, se han obtenido las tensiones en la malla y los esfuerzos en la directriz y con ellos se ha dimensionado el armado de la sección.

#### Esfuerzos $\sigma_{xx}$

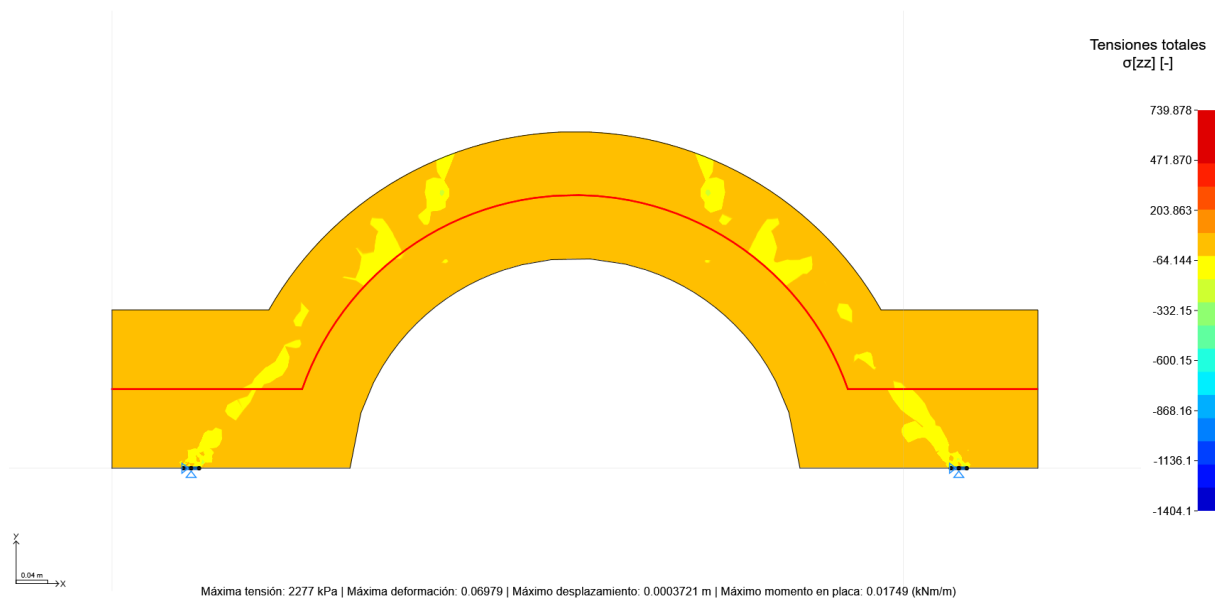




### Esfuerzos $\sigma_{yy}$

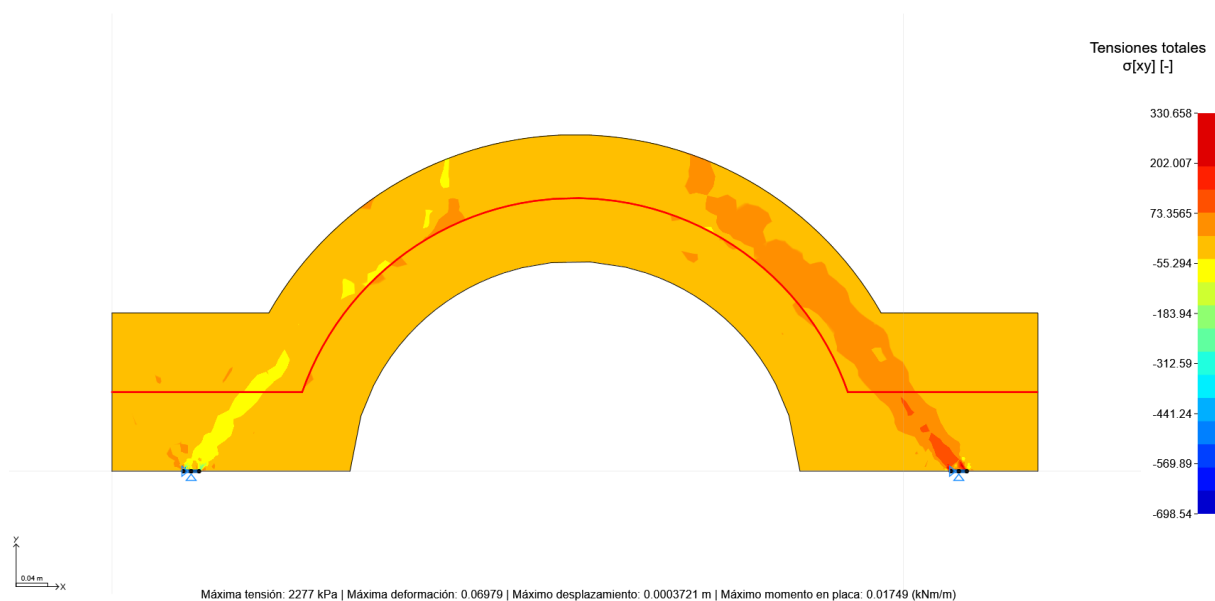


### Esfuerzos $\sigma_{zz}$

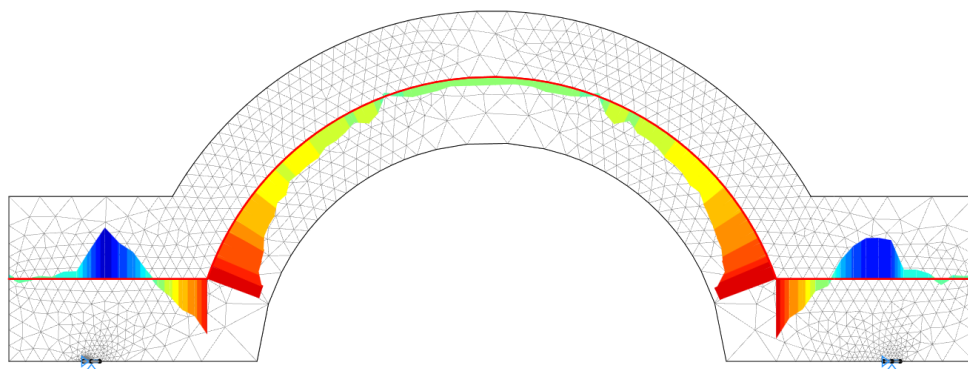




### Esfuerzos $\sigma_{xy}$

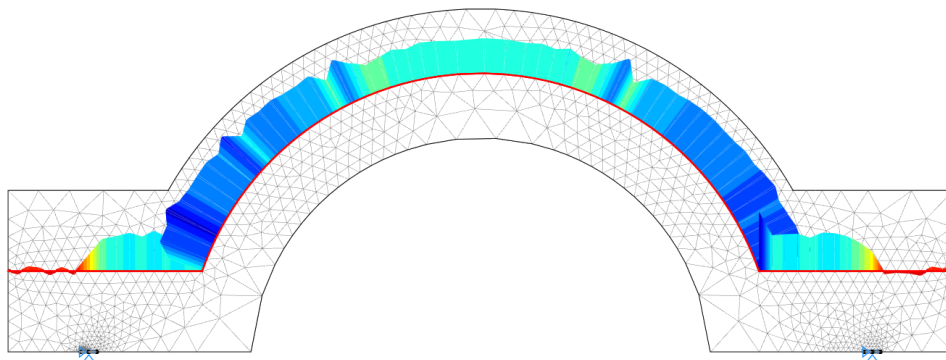


### Momento flector



**Momento flector máximo = 0,2 kN-m**

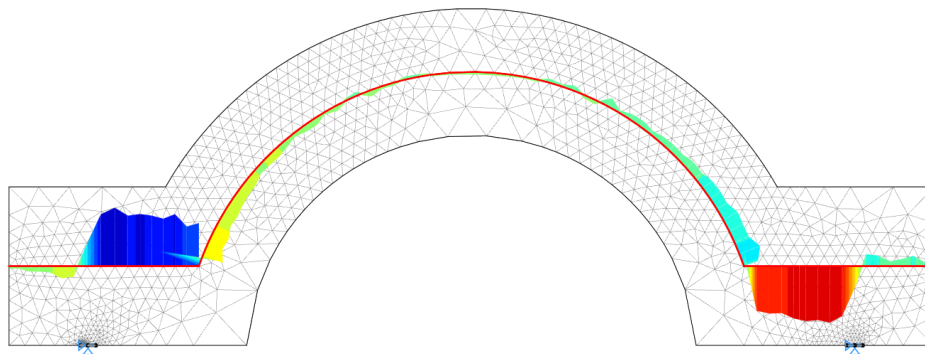
### Axil





**Axil máximo = 3,5 kN**

#### Cortante



**Esfuerzo cortante máximo = 3,24 kN**

#### Armadura

Se ha realizado una comprobación a flexión compuesta recta y a cortante según la EHE con los esfuerzos indicados para la sección de 160x300 mm (alto x ancho), y considerando un recubrimiento de 55 mm.

Al respecto de la armadura longitudinal se obtiene que se requiere armadura mínima, lo que supone 4,5 cm<sup>2</sup> (equivalente a cuatro redondos de Ø6,8 mm), pudiendo materializarse con 4Ø10.

Al respecto de la armadura por cortante, se ha realizado la comprobación como elemento sin armadura de cortante, obteniéndose una resistencia a cortante  $V_u = 18,2$  kN, netamente superior al cortante de cálculo, por lo que no es necesario disponer de armadura de cortante. Se ha optado por disponer cercos Ø6. Al respecto de la separación de la armadura por cortante, la separación máxima exigida en la EHE-08 para el confinamiento de la biela comprimida no puede exceder de  $0,8 \cdot d$ . Dado el reducido canto de la pieza (160 mm) y el recubrimiento considerado por durabilidad (55 mm),  $d = 160 - 55 = 105$  mm, por lo que la separación máxima entre cercos sería de  $0,8 \times 105 = 84$  mm. Esta separación se considera que complicaría la ejecución, por lo que no se ha respetado al no requerirse en realidad esta armadura.

La armadura finalmente propuesta es:

- Armadura longitudinal: 4Ø10
- Armadura transversal: Ø6/20

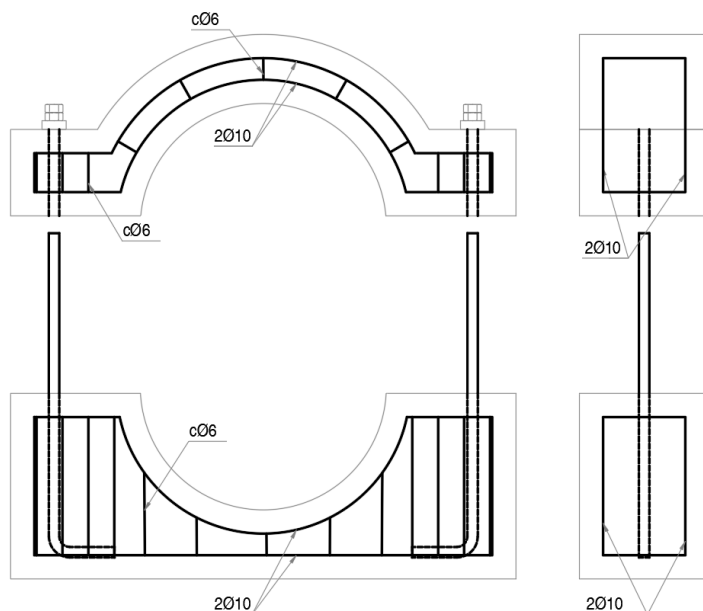


Imagen 10. Armado propuesto.

## 8. CÁLCULO MECÁNICO TUBERÍA PEAD

### 8.1 TUBERÍA PEAD

El dimensionamiento mecánico de los tubos de PE enterrados se recomienda realizarlo conforme a lo especificado por la norma UNE 53331 IN (basada en la norma alemana ATV 127), de manera que la hipótesis pésima de carga y la sollicitación condicionante, suelen corresponder a alguna de las combinaciones de acciones indicadas en la tabla adjunta:

	Combinación de acciones	Sollicitación determinante
Hipótesis I	Presión interna positiva	Estado tensional
Hipótesis II	Acciones externas y presión interna positiva	Estado tensional y deformaciones
Hipótesis III	Acciones externas	Estado tensional y deformaciones
Hipótesis IV	Acciones externas y presión interna negativa	Pandeo y colapsado

### 8.2 HIPÓTESIS I. PRESIÓN INTERNA POSITIVA

En esta hipótesis basta comprobar que la DP (presión de servicio) no excede el valor de la PN (presión nominal) del tubo. En este caso para PE 100 con DN 315 mm ( SDR 17 / S 8) PN = 10,0 atm.

En los cálculos hidráulicos podemos comprobar que la máxima presión es siempre inferior a 10 atm.

### 8.3 HIPÓTESIS II. ACCIONES EXTERNAS Y PRESIÓN INTERNA POSITIVA (ESTADO TENSIONAL Y DEFORMACIONES)

Debe comprobarse que actuando conjuntamente ambas acciones, el coeficiente de seguridad C a largo plazo para los esfuerzos tangenciales a flexotracción en clave, riñones y base sea superior al valor admisible, conforme los valores indicados y que la deformación producida sea inferior al 5% del diámetro del tubo.

	Esfuerzo tangencial de diseño a flexotracción (N/mm <sup>2</sup> )	coeficiente de seguridad C
Corto plazo	A proporcionar por el fabricante	Clase de seguridad A 2,50
Largo plazo	A proporcionar por el fabricante	Clase de seguridad B 2,00

La clase de seguridad A corresponde al caso general (amenaza de capa freática; reducción de servicio o fallos o consecuencias económicas notables), mientras que la clase B es para los casos especiales (sin amenaza de capa freática; débil reducción de servicio o fallos con consecuencias económicas poco importantes).

La determinación de los esfuerzos tangenciales suele realizarse en España mediante la siguiente expresión:

$$\sigma = 10 ((N/S) + 100 M \alpha_k / W)$$

donde:

$\sigma$  = esfuerzo tangencial, en N / mm<sup>2</sup>

N = suma de fuerzas axiales por unidad de longitud (kN / m)

M = suma de momentos por unidad de longitud (kN / m)

S = Area de la sección de la pared del tubo por unidad de longitud (cm<sup>2</sup> / m)

W = momento resistente de la sección (cm<sup>3</sup>/m)

$\alpha_k$  = factor de corrección por curvatura

Al igual que la comprobación del estado tensional, el estado deformacional suele realizarse en España según:

$$\delta = I C_v I (q_{vt} - q_h) 100 / S_t$$

donde

$\delta$  = deformación vertical a largo plazo en %

$C_v$  = Coeficiente de deformación

$q_{vt}$  = presión vertical total del tubo (kN / m<sup>2</sup>)

$q_h$  = Presión lateral de tierras en (kN / m)

$S_t$  = rigidez a largo plazo del tubo:

$$S_t = (E_t / 12) (e/r_m)^3$$



$E_t$  = módulo de elasticidad a largo plazo del tubo en N/mm<sup>2</sup>

$e$  = espesor de la pared del tubo en mm. (47 mm)

$r_m$  = radio medio del tubo en mm (376,5 mm)

En este caso, consideraremos la acción de la columna de agua de 25,0 m como acción exterior y la presión interna positiva, que llega a ser inferior a 2,0 atm por lo que no supera las 10 atm admisibles.

#### 8.4 HIPÓTESIS III. ACCIONES EXTERNAS (ESTADO TENSIONAL Y DEFORMACIONES)

Debe comprobarse que, actuando únicamente las acciones externas (terreno, sobrecargas móviles o fijas y otras si existen), el coeficiente de seguridad  $C$  a largo plazo para los esfuerzos tangenciales a flexotracción en clave, riñones y base sea superior al admisible, conforme los valores indicados en la tabla siguiente y que la deformación sea menor del 5% del DN.

Las deformaciones en España suelen calcularse según la formulación desarrollada en UNE 53331:1997 IN.

$$\delta = I C_v I (q_{ct} - q_h) 100 / S_t$$

donde :

$\delta$  = deformación vertical a largo plazo, en %

$C_v$  = coeficiente de deformación

$q_{vt}$  = presión vertical total sobre el tubo, en kN / m<sup>2</sup>

$q_h$  = presión lateral de tierras, en kN / m<sup>2</sup>

$S_t$  = rigidez a largo plazo del tubo, en N / mm<sup>2</sup>

$$S_t = (E_t/12) (e/r_m)^3$$

$E_t$  = módulo de elasticidad a largo plazo del tubo, en N / mm<sup>2</sup>

$e$  = espesor de la pared del tubo, en mm

$r_m$  = radio medio del tubo, en mm

DN = diámetro nominal del tubo, en mm

Esta hipótesis no tiene sentido en nuestro caso, ya que en ningún caso tendremos sólo cargas externas actuando en la tubería de nueva construcción.

## 8.5 HIPÓTESIS IV. ACCIONES EXTERNAS Y PRESIÓN INTERNA NEGATIVA (ESTADO TENSIONAL Y DEFORMACIONES)

Actuando tanto las acciones externas al tubo (terreno, sobrecargas móviles o fijas y otras si existen), como las posibles presiones internas negativas, debe comprobarse que el coeficiente de seguridad C frente al pandeo alcance al menos los valores indicados, lo cual puede comprobarse mediante la siguiente expresión:

$$P_{crit} / q_{vt} > C$$

Donde:

$P_{crit}$  = Carga crítica de pandeo en N/mm<sup>2</sup>

$q_{vt}$  = Presión vertical total sobre el tubo.

La carga crítica de pandeo puede calcularse mediante la expresión:

$$P_{crit} = (S_t S_{sh})^{0.5}$$

Donde

$q_{vt}$  = presión vertical total sobre el tubo, en kN / m<sup>2</sup>

C = coeficiente de seguridad

$S_t$  = rigidez circunferencial específica a lo largo plazo, en N / mm<sup>2</sup>

$S_{sh}$  = Rigidez horizontal del relleno hasta la clave del tubo, en N / mm<sup>2</sup>

Las acciones del oleaje, presenta una importancia especial en el estudio de las afecciones en cuanto a la estabilidad de la tubería, y las corrientes estacionarias, en general, que producen las mayores solicitaciones a que puede verse sometido el emisario y sus componentes a lo largo de su vida útil.

El Mediterráneo es un mar que se caracteriza por poseer unas mareas casi despreciables o con muy poca variación. En la zona de Mallorca la zona superficial, con un hidrodinamismo más turbulento se extiende hasta los 30 metros de profundidad. En verano la diferencia de temperaturas establece una termoclina a esa profundidad que desaparece o se diluye cuando la temperatura de la atmósfera se acerca a la existente en el agua.

La tubería a utilizar será de polietileno de alta densidad y con las características siguientes:

El polietileno puro fabricado a baja presión (alta densidad) tendrá las siguientes propiedades y características:

- Densidad  $\geq 0,947 \text{ gr/cm}^3$  s /ASTM D 792
- Resistencia a la tracción  $\geq 200 \text{ Kg/cm}^2$  s/UNE 53.133-82
- Alargamiento a la rotura mínimo 350%
- Resistencia a la tracción después 80 % s/original, Mn.  
envejecimiento (48h/100°C)

- Alargamiento a la rotura después 80 % s/original, Mn.  
envejecimiento (48h/100°C)
- Índice de fluidez 0,16 a 0,17gr/10'S/ASTM  
D 1236 condición E
- Cracking s/f a 48 h. mínimo S/ASTM D 1693
- Temp. VICAT (1 Kg) 110 °C S/ASTM D 1525
- Contenido en negro de humo 2% +0,5 S/ASTM D 1603
- Retracción 3% máx. S/UNE 53 133 82
- Estanqueidad: 6,0 kg/cm<sup>2</sup>, según UNE 53 133 durante 1 minuto.

Características:

- Diámetro nominal (exterior): 315 mm / 400 mm
- Espesor: 18,7 mm / 23,7 mm
- Densidad por metro de tubería: 17,78 kg/m - 28,62 kg/m

Dado el laborioso proceso de cálculo para la comprobación de las solicitaciones del tubo en una instalación, se emplea el programa informático de AseTUB, preparado por la ingeniería alemana IngSoft y basado en la norma ATV 127 (UNE 53331) facilita este cálculo. Mediante la introducción de los parámetros de la instalación, se procede fácilmente al cálculo estático de las tuberías de PE enterradas. Si se quisiera realizar el cálculo de forma manual, se deberá seguir el proceso según el Informe Técnico UNE 53331 (o a la norma ATV 127).

En programa electrónico basado fundamentalmente en la norma ATV-A127 se han incluido algunas desviaciones:

a) El esfuerzo a la compresión por flexión

- al realizar el ensayo de tracción y alargamiento, se mide también el esfuerzo a la compresión por flexión; a petición, es posible requerir menores factores de seguridad de tensión para el esfuerzo a la compresión por flexión.
- al realizar el ensayo de estabilidad no lineal (producido como una prueba de tensión), también se comprueba el esfuerzo a la compresión por flexión.

b) Ensayo de tracción y alargamiento

El cálculo se estructura de la siguiente forma:

Una vez seleccionado el tubo adecuado, así como el tipo y apoyo de la zanja, se determinan las acciones que actúan sobre el tubo debidas a cargas externas e internas, analizándose si la deformación del tubo es admisible de acuerdo con el límite establecido del 5% (a los 50años).



En caso positivo se continúa determinando las tensiones máximas a que está sometido el material, que deberá superar los criterios de seguridad establecidos, así como los relativos a la presión crítica del colapso a la presión del agua y a la acción simultánea de ambas.

Si la deformación fuese superior al 5% habrá que realizar otro supuesto modificando las características de la instalación o el tipo de tubo.

Normalmente la deformación máxima del tubo se produce a largo plazo y los valores del módulo de elasticidad en flexión transversal se toman en función del material.

La información necesaria para el cálculo estático de tuberías y la comprobación de su resistencia a las cargas externas a largo plazo se refleja en el informe de cálculo que arroja el programa.

Como resultado del cálculo se conoce si la instalación es válida o si por el contrario hay que cambiar alguna de sus condiciones.

En el apéndice N°3 se presenta el informe de cálculo.

**APÉNDICE 1 – COMPROBACIÓN ESTABILIDAD FASE  
CONSTRUCCIÓN DEL NUEVO TRAMO DIFUSOR**



DENSIDAD AGUA DE MAR (kg/m³)	1026
DENSIDAD EFLUENTE (kg/m3)	997,1

DATOS DE LA TUBERÍA					
MATERIAL	FC				
Dext (m) =	0,478				
espesor (m) =	0,039				
Dint (m) =	0,4				
Densidad material (kg/m³) =	2000				
	2000				

CARGAS					
	PEAD				
	0,478	0,000	0,000	0,000	0,000
0 % AIRE OCLUIDO					
Peso efluente Pe (kg/m)	125,30	-	-	-	-
peso tubería Pt (kg/m)	107,57	-	-	-	-
Empuje E (kg/m)	184,12	-	-	-	-
10 % AIRE OCLUIDO					
Peso efluente Pe (kg/m)	112,77	-	-	-	-
peso tubería Pt (kg/m)	107,57	-	-	-	-
Empuje E (kg/m)	184,12	-	-	-	-
20 % AIRE OCLUIDO					
Peso efluente Pe (kg/m)	100,24	-	-	-	-
peso tubería Pt (kg/m)	107,57	-	-	-	-
Empuje E (kg/m)	184,12	-	-	-	-
30 % AIRE OCLUIDO					
Peso efluente Pe (kg/m)	87,71	-	-	-	-
peso tubería Pt (kg/m)	107,57	-	-	-	-
Empuje E (kg/m)	184,12	-	-	-	-

Altura de ola		Período pico	Longitud de onda	L Calculada				Velocidad máxima partículas	Aceleración horizontal máxima		
VELOCIDAD Y ACELERACIÓN DEL AGUA											
TRAMO	Dext (m)	d (m) profundidad	Hs (m)	Tp (s)	L <sub>o</sub> (m)	z (m)	d/L <sub>o</sub>	0,04<d/L<0,5	L <sub>calc</sub> (m)	Ux max (m/s)	Ax max (m/s <sup>2</sup> )
-20 a -17	0,478	20,3	8,33	12,64	249,27	-19,80	0,0814	AGUAS INTERMEDIAS	163,05	2,3969	1,1913
-16 a -13	0,478	16	8,33	12,64	249,27	-15,50	0,0642	AGUAS INTERMEDIAS	147,63	2,8201	1,4016
-12 a -9	0,478	12	8,33	12,64	249,27	-11,50	0,0481	AGUAS INTERMEDIAS	130,17	3,3853	1,6826

FACTOR REFRACCIÓN		
β	α	f
0	76	0,4
0	53	0,5
0	-14	-0,2
más desfavorable		0,5

Temporal NE                      h                      20,3  
Temporal NNE                    Lo                    249,27  
Temporal SE                      h/Lo                0,081436838

DEFINICIÓN LASTRES								
	Sup. Inferior ancho x alto (m2)	Sup. Superior ancho x alto (m2)	Largo (m)	Interdistancia	Volumen ml seco (m3/ml)	Densidad (kg/m3)	Peso ml seco (kg/ml)	Empuje (kg/ml)
-20 a -17	0,402	-	0,30	5,00	0,024	2400	57,89	24,75
-16 a -13	0,402	-	0,30	5,00	0,024	2400	57,89	24,75
-12 a -9	0,402	-	0,30	5,00	0,024	2400	57,89	24,75

PESO SECO MÍNIMO LASTRES POR ML	PI (kg/m)	57,89	-20 a -17
PESO SUMERGIDO MÍNIMO LASTRES POR ML	PI (kg/m)	33,14	
PESO SECO MÍNIMO LASTRES POR ML	PI (kg/m)	57,89	-16 a -13
PESO SUMERGIDO MÍNIMO LASTRES POR ML	PI (kg/m)	33,14	
PESO SECO MÍNIMO LASTRES POR ML	PI (kg/m)	57,89	-12 a -9
PESO SUMERGIDO MÍNIMO LASTRES POR ML	PI (kg/m)	33,14	

REFUERZO U INVERTIDA

peso seco/ml	57,89		peso seco/ml	57,89		peso seco/ml	57,89
-20 a -17			-16 a -13			-12 a -9	
	(m)			(m)			(m)
A	0,48		A	0,48		A	0,48
B	0,24		B	0,24		B	0,24
C			C			C	
D			D			D	
L	0,30		L	0,30		L	0,30
interdistancia	5,00		interdistancia	5,00		interdistancia	5,00
Sup inferior	0,40		Sup inferior	0,40		Sup inferior	0,40
Sup Superior	-		Sup Superior	-		Sup Superior	-
densidad	2.400,00		densidad	2.400,00		densidad	2.400,00
peso/ud	289,44		peso/ud	289,44		peso/ud	289,44
peso/ml	57,89		peso/ml	57,89		peso/ml	57,89

9,8

0 % DE AIRE OCLUIDO		ACCIÓN OLEAJE			ACCIÓN CORRIENTES						
TIPO	PROFUNDIDAD	FUERZAS DE ARRASTRE FL (CL = 1) (N/m)	FUERZAS DE INERCIA Fi (Ci = 3,3) (N/m)	FUERZAS DE ELEVACIÓN Fe (Ce=1,25) (N/m)	FUERZAS DE ARRASTRE Fa (Ca = 0,9) (N/m)	FUERZAS DE ELEVACIÓN Fe (Ce=0,5) (N/m)	Peso Sumergido (N)	SUMA Felev (N)	FACTOR SEGURIDAD >1	SUMA (Fdoleaje+Fdcorriente)	P-Feoleaje- Fecorrección
	ACCIÓN OLEAJE	1	3,3	1,25	V=0,2m/s		EQUILIBRIO Fv			EQUILIBRIO Fh	
	ACCIÓN CORRIENTES				0,9	0,5					
-20 a -17	20,3	26,81	31,89	33,51	2,21	1,23	2606,94	1839,08	1,42	29,01	2388,09
-16 a -13	16	26,81	31,89	33,51	2,21	1,23	2606,94	1839,08	1,42	29,01	2388,09
-12 a -9	12	26,81	31,89	33,51	2,21	1,23	2606,94	1839,08	1,42	29,01	2388,09

10 % DE AIRE OCLUIDO		ACCIÓN OLAJE			ACCIÓN CORRIENTES						
TIPO	PROFUNDIDAD	FUERZAS DE ARRASTRE Fa (Ca = 1) (N/m)	FUERZAS DE INERCIA Fi (Ci = 3,3) (N/m)	FUERZAS DE ELEVACIÓN Fe (Ce=1,25) (N/m)	FUERZAS DE ARRASTRE Fa (Ca = 0,9) (N/m)	FUERZAS DE ELEVACIÓN Fe (Ce=0,5) (N/m)	Peso Sumergido (N)	SUMA Felev (N)	FACTOR SEGURIDAD >1	SUMA (Fdoleaje+Fdco rriente)	P-Feoleaje- Fecorr-E
	ACCIÓN OLAJE	1	3,3	1,25			EQUILIBRIO Fv			EQUILIBRIO Fh	
	ACCIÓN CORRIENTES				0,9	0,5					
-20 a -17	20,3	26,81	31,89	33,51	2,21	1,23	2484,150	1839,08	1,35	29,01	2265,30
-16 a -13	16	26,81	31,89	33,51	2,21	1,23	2484,150	1839,08	1,35	29,01	2265,30
-12 a -9	12	26,81	31,89	33,51	2,21	1,23	2484,150	1839,08	1,35	29,01	2265,30

20 % DE AIRE OCLUIDO		ACCIÓN OLAJE			ACCIÓN CORRIENTES						
TIPO	PROFUNDIDAD	FUERZAS DE ARRASTRE Fa (Ca = 1) (N/m)	FUERZAS DE INERCIA Fi (Ci = 3,3) (N/m)	FUERZAS DE ELEVACIÓN Fe (Ce=1,25) (N/m)	FUERZAS DE ARRASTRE Fa (Ca = 0,9) (N/m)	FUERZAS DE ELEVACIÓN Fe (Ce=0,5) (N/m)	Peso Sumergido (N)	SUMA Felev (N)	FACTOR SEGURIDAD >1	SUMA (Fdoleaje+Fdco rriente)	P-Feoleaje- Fecorr-E
	ACCIÓN OLAJE	1	3,3	1,25			EQUILIBRIO Fv			EQUILIBRIO Fh	
	ACCIÓN CORRIENTES				0,9	0,5					
-20 a -17	20,3	26,81	31,89	33,51	2,21	1,23	2361,356	1839,08	1,28	29,01	2142,51
-16 a -13	16	26,81	31,89	33,51	2,21	1,23	2361,356	1839,08	1,28	29,01	2142,51
-12 a -9	12	26,81	31,89	33,51	2,21	1,23	2361,356	1839,08	1,28	29,01	2142,51

30 % DE AIRE OCLUIDO		ACCIÓN OLAJE			ACCIÓN CORRIENTES						
TIPO	PROFUNDIDAD	FUERZAS DE ARRASTRE Fa (Ca = 1) (N/m)	FUERZAS DE INERCIA Fi (Ci = 3,3) (N/m)	FUERZAS DE ELEVACIÓN Fe (Ce=1,25) (N/m)	FUERZAS DE ARRASTRE Fa (Ca = 0,9) (N/m)	FUERZAS DE ELEVACIÓN Fe (Ce=0,5) (N/m)	Peso Sumergido (N)	SUMA Felev (N)	FACTOR SEGURIDAD >1	SUMA (Fdoleaje+Fdcorreinte)	P-Feoleaje- Fecorre-E
	ACCIÓN OLAJE	1	3,3	1,25			EQUILIBRIO Fv			EQUILIBRIO Fh	
	ACCIÓN CORRIENTES				0,9	0,5					
-20 a -17	20,3	26,81	31,89	33,51	2,21	1,23	2238,563	1839,08	1,22	29,01	2019,71
-16 a -13	16	26,81	31,89	33,51	2,21	1,23	2238,563	1839,08	1,22	29,01	2019,71
-12 a -9	12	26,81	31,89	33,51	2,21	1,23	2238,563	1839,08	1,22	29,01	2019,71

**APÉNDICE 2 – CÁLCULO FLOTABILIDAD**  
**TUBERÍA NUEVO TRAMO DIFUSOR**

TRAMO 1: TRAMO DIFUSOR DE DIÁMETRO 500 mm

Tubería llena de aire , por metro.

Ø ext	500 mm
Ø int	440 mm
Densidad PE	961 Kg/m3
Densidad mar	1026 Kg/m3
Densidad efluente	997,1 Kg/m3
Empuje hidrostático	-201 Kg
Peso Tub	43 Kg

Peso en el mar -159 Kg

Lastres

Se quitan 0 de cada 3

Volumen lastre	0,1887 m3
Peso lastre	452,88 Kg
numero de lastres	3
por metros	9
Repercusión por metro	0,333
Empuje hidrostático	-65 Kg
Peso lastre	151 Kg

Peso en el mar (ml) 86 Kg

Boyas

-30 Kg

Flotabilidad por m

positiva -102 Kg

Coeficiente	0,654	coef positivo = flota	para evitar posibles abolladuras, el coef debe estar entorno a 0,65 positivo
		coef negativo = hunde	

Empuje	-266 Kg
Peso	194 Kg

La tubería flota (flotabilidad positiva -144).

Tubería llena de agua de mar, por metro

Empuje hidrostático	-201 Kg
Peso Tub	43 Kg
P agua dentro tubo 35% aire	99 Kg
Peso en el mar	-60 Kg

Lastres

Empuje hidrostático	-65 Kg
Peso laste	151 Kg
Peso en el mar (ml)	86 Kg

0 Kg

negativa 26 Kg

Empuje	-266 Kg
Peso	292 Kg

Coef

1,098074

La tubería se hunde (flotabilidad negativa 13).

**APÉNDICE 3 – IDENTIFICACIÓN FOTOGRÁFICA  
DEL LASTRADO EXISTENTE**



## APÉNDICE Nº 3. IDENTIFICACIÓN FOTOGRÁFICA DEL LASTRADO EXISTENTE

### ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. COTA -20 m a - 19 m .....	3
3. COTA -18 m .....	3
3.1 LASTRE INICIAL .....	3
3.2 LASTRE FINAL .....	4
3.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR.....	4
3.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR.....	4
4. COTA -17 m .....	5
4.1 LASTRE INICIAL .....	5
4.2 LASTRE FINAL .....	5
4.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR.....	5
4.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR.....	6
5. COTA -15 m .....	6
5.1 LASTRE INICIAL .....	6
5.2 LASTRE FINAL .....	6
5.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR.....	6
5.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR.....	6
6. COTA -14 m .....	7
6.1 LASTRE INICIAL .....	7
6.2 LASTRE FINAL .....	7
6.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR.....	7
6.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR.....	8



7. COTA -13 m .....	8
7.1 LASTRE INICIAL .....	8
7.2 LASTRE FINAL .....	9
7.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR.....	9
7.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR.....	10
8. COTA -12 m .....	10
8.1 LASTRE INICIAL .....	10
8.2 LASTRE FINAL .....	11
8.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR.....	11
8.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR.....	14
9. COTA -11 m .....	15
9.1 LASTRE INICIAL .....	15
9.2 LASTRE FINAL .....	15
9.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR.....	16
9.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR.....	19
10. COTA -10 m .....	20
10.1 LASTRE INICIAL .....	20
10.2 LASTRE FINAL .....	21
10.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR.....	21
10.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR.....	22
11. COTA -9 m .....	24
11.1 LASTRE INICIAL .....	24
11.2 LASTRE FINAL .....	25
11.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR.....	25
11.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR.....	25

## APÉNDICE Nº 3. IDENTIFICACIÓN FOTOGRÁFICA DEL LASTRADO EXISTENTE

### 1. INTRODUCCIÓN

En el presente apéndice se muestra la identificación fotográfica de los elementos más significativos del lastrado existente en la conducción a partir de la filmación submarina georreferenciada realizada con anterioridad a la redacción del proyecto.

Se identifican los lastres inicial y final para cada unidad de cota batimétrica, así como el lastrado no operativo que debe ser retirado y el que, por el riesgo de afectación a la tubería durante los trabajos de retirada, se abandonará en su ubicación actual.

### 2. COTA -20 M A - 19 M

Se retirará el tramo difusor completo, compuesto por conducción de FC DN400 de 40 m de longitud y 34 lastres de hormigón armado.

### 3. COTA -18 M

#### 3.1 LASTRE INICIAL







### 3.2 LASTRE FINAL



### 3.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR



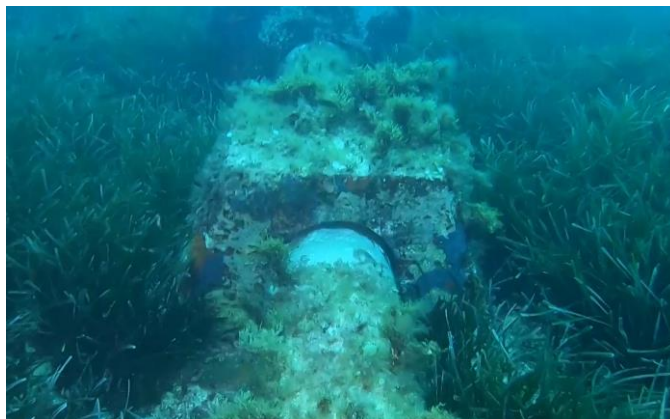
### 3.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR

No existen.



#### 4. COTA -17 M

##### 4.1 LASTRE INICIAL



##### 4.2 LASTRE FINAL



##### 4.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR





#### 4.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR

No existen.

### 5. COTA -15 M

#### 5.1 LASTRE INICIAL



#### 5.2 LASTRE FINAL



#### 5.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR

No existen.

#### 5.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR

No existen.





## 6. COTA -14 M

### 6.1 LASTRE INICIAL



### 6.2 LASTRE FINAL



### 6.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR





#### 6.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR

No existen.

### 7. COTA -13 M

#### 7.1 LASTRE INICIAL





## 7.2 LASTRE FINAL



## 7.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR







#### 7.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR

No existen.

### 8. COTA -12 M

#### 8.1 LASTRE INICIAL





## 8.2 LASTRE FINAL



## 8.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR









## PROYECTO REFUNDIDO DE ADECUACIÓN DEL EMISARIO SUBMARINO Y VERTIDO AL MAR DE LA EDAR DE FORMENTERA





#### 8.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR







## 9. COTA -11 M

### 9.1 LASTRE INICIAL



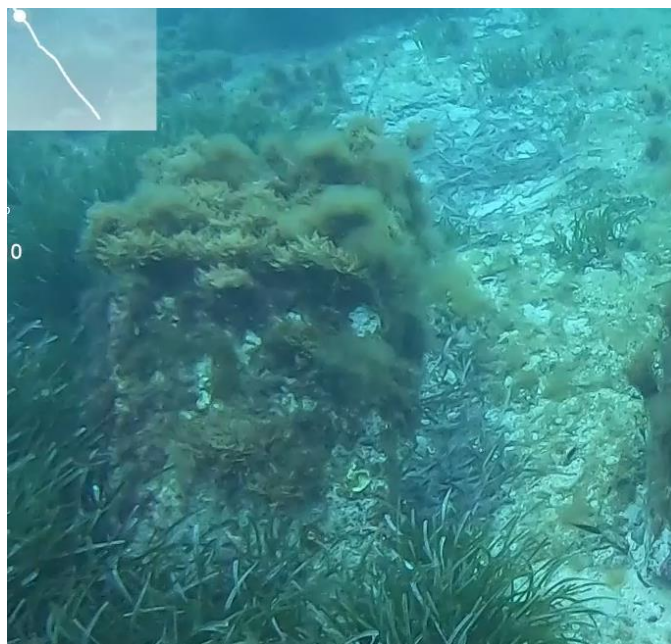
### 9.2 LASTRE FINAL





### 9.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR







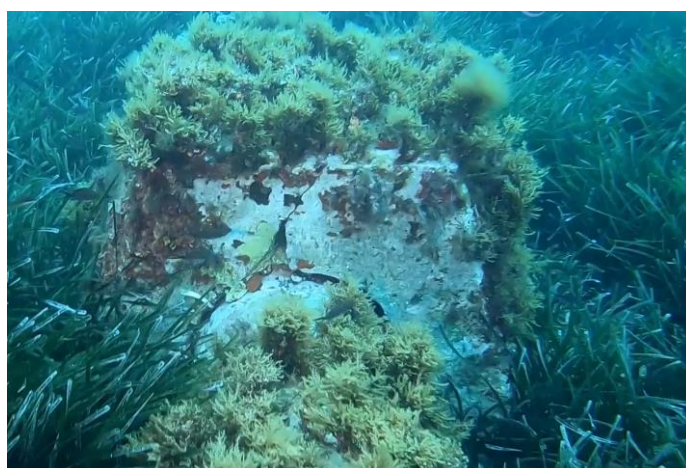




#### 9.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR







## 10. COTA -10 M

### 10.1 LASTRE INICIAL





## 10.2 LASTRE FINAL



## 10.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR







#### 10.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR









## 11. COTA -9 M

### 11.1 LASTRE INICIAL





## 11.2 LASTRE FINAL



## 11.3 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A RETIRAR

No existen.

## 11.4 ELEMENTOS NO OPERATIVOS A ABANDONAR



