

Anejo VI. Cálculo de estabilidad

Proyecto básico de emisario submarino para la ampliación de la
desaladora Al-Gubrah (Omán)

GARCÍA GARCÍA, Bruno



ÍNDICE

1. Diseño de estabilidad	2
1.1. Fuerzas hidrodinámicas	3
1.1.1. Velocidad de partícula de agua de oleaje	4
1.1.2. Coeficientes de carga máxima C_y^* y C_z^*	5
1.1.3. Factor de reducción por penetración en el lecho marino y zanja. “ r_{tot} ”	6
1.2. Resultados	7
2. Lastre necesario	8
3. Tornillos necesarios	12
3.1. Resistencia a cortante	12
3.2. Resistencia a tracción	14
3.3. Interacción cortante tracción	15



1. Diseño de estabilidad

En este apartado, se plantean los cálculos y comprobaciones necesarias para verificar la estabilidad de la tubería en el fondo marino. En ausencia de una normativa específica que lo regule, se emplea como referencia la recomendación de procedimiento DNV RP-109 “*On-Bottom Stability Design of submarine Pipelines*” perteneciente a la asociación *Det Norske Veritas*.

Para realizar las comprobaciones mencionadas se tiene en cuenta que un tramo de la tubería se proyecta para estar enterrada, por lo que hay un intervalo de tiempo en que se situara en zanja previamente a su enterramiento. Este es el motivo por el cual se proyectara para este intervalo de tiempo, ya que es el punto y el momento en que más expuesta está a condicionantes adversos.

Se realiza el cálculo para seis puntos distribuidos a lo largo de la trayectoria. Los tres puntos más próximos a la costa se calculan para un periodo retorno de un año, periodo máximo estimado en que la tubería del tramo no estará enterrada. Para los tres puntos siguientes, los cálculos se realizaran para un periodo retorno 200 años. Periodo retorno obtenido teniendo en cuenta el tiempo de uso esperado de la estructura y la probabilidad de ocurrencia del temporal más desfavorable (ciclón) en la vida de la estructura.

$$T_R = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{p}{100}\right)^{\frac{1}{n}}}$$

Donde:

n: vida útil de la estructura

p: probabilidad de excedencia de altura de ola

$$T_R = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{0.3}{100}\right)^{\frac{1}{70}}} = 196,76 = 200 \text{ años}$$

profundidad (m)	2,3	5,9	7,1	11,5	14,2	18
pk (m)	300	850	1.250	1.700	2.300	2.600

Tabla 1: Puntos de estudio

La estabilidad de la tubería colocada en el emplazamiento final, es viable gracias a los lastres de hormigón instalados a lo largo de la trayectoria de la tubería. A partir del enterramiento del tramo de la tubería, no será necesaria la labor de los lastres en este tramo, pero hasta este momento, son los lastres los que garantizan la estabilidad.



La verificación de estabilidad estática absoluta se puede considerar satisfactoria si cumple las siguientes condiciones:

$$\gamma_{SC} \cdot \frac{Fy^* + \mu \cdot Fz^*}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1,0$$

Y

$$\gamma_{SC} \cdot \frac{Fz^*}{w_s} \leq 1,0$$

Donde:

w_s : Peso de la tubería y los lastres por unidad de longitud

Fy y Fz : Fuerzas hidrodinámicas

γ_{sc} : coeficientes de seguridad

F_r : resistencia del suelo

1.1. Fuerzas hidrodinámicas

Las fuerzas hidrodinámicas se calculan mediante la fórmula de Morisons. Esta fórmula se emplea para calcular las fuerzas tanto en dirección vertical como horizontal teniendo en cuenta varios factores:

- Fuerza hidrodinámica horizontal:

$$Fy^* = r_{tot,y} * \frac{1}{2} * \rho_w * D * Cy^* * (V^* + U^*)^2$$

- Fuerza hidrodinámica vertical:

$$Fz^* = r_{tot,z} * \frac{1}{2} * \rho_w * D * Cz^* * (V^* + U^*)^2$$

Donde:

ρ_w : Densidad del agua del mar

D : Diámetro exterior de la tubería

U^* : velocidad de partícula de agua de oleaje

V^* : velocidad de corriente, aportada en el anejo de clima marítimo.

Cy^* y Cz^* : coeficientes de carga máxima * pertenecientes a las recomendaciones consultada función del número K^* de oscilación simple de diseño *Keulegan-Carpenter* y la relacione entre U^* y V



r_{tot} : factor de reducción por penetración en el lecho marino y zanja.

1.1.1. Velocidad de partícula de agua de oleaje

Es un factor necesario para el cálculo de las fuerzas hidrodinámicas. De acuerdo con el documento DNV RPF 109, el factor K_u , de donde se puede obtener el factor U^* es:

$$K_u = \frac{U^*}{U_s} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{2 * \ln \tau} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 * \ln \tau}} \right)$$

Donde τ corresponde al número de oscilaciones en la velocidad de diseño espectral del fondo.

$$\tau = \frac{T}{T_U}$$

Asumiendo la teoría de oleaje lineal, U_s se puede obtener de la tabla 2, y T_u de la tabla 3, donde:

$$T_n = \sqrt{\frac{d}{g}}$$

Donde d equivale a la profundidad, y g a la fuerza de la gravedad.

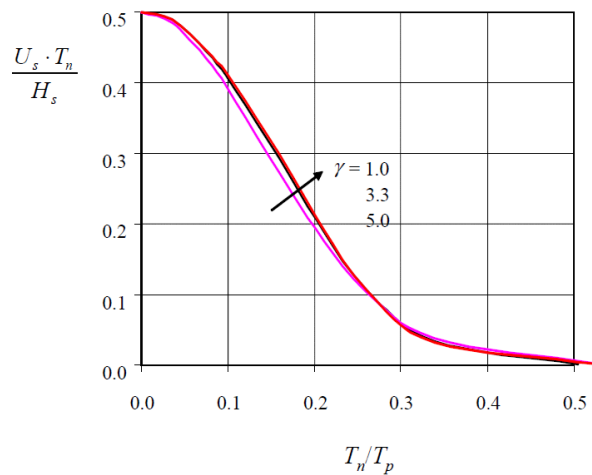


Ilustración 1: interpretación

Amplitud de velocidad de flujo significativa U_s a nivel del lecho marino

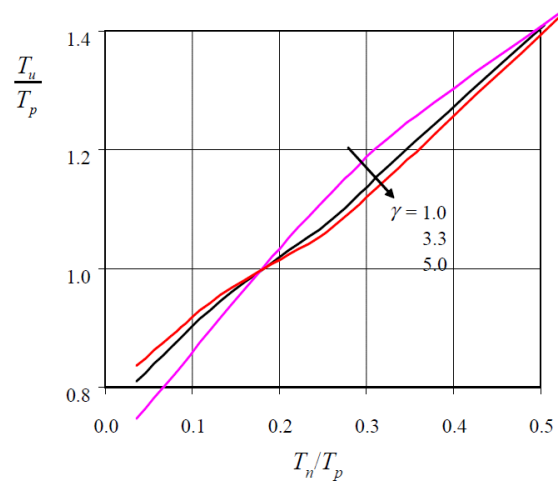


Ilustración 2: interpretación

Una vez obtenida T_u , es necesario el cálculo de K_t para la obtención de τ mediante la expresión:

$$\tau = \begin{cases} K_T - 5 \cdot (K_T - 1) \cdot T_n/T_u & T_n/T_u \leq 0.2 \\ 1 & T_n/T_u > 0.2 \end{cases}$$

Donde K_t :

$$K_t = \begin{cases} 1.17 & y = 5 \\ 1.21 & y = 3.3 \\ 1.25 & y = 5 \end{cases}$$

Donde y :

$$y = \begin{cases} 5.0 & \varphi \leq 3.6 \\ \exp(5.75 - 1.15\varphi) & 3.6 \leq \varphi < 5 \\ 1.0 & \varphi \geq 5 \end{cases} \quad \varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}$$

Una vez obtenidos τ , y U_s , obtendremos U^* despejando en la expresión inicial:

$$K_u = \frac{U^*}{U_s} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{2 \cdot \ln \tau} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln \tau}} \right)$$

Los resultados se muestran en la tabla de resultados.

1.1.2. Coeficientes de carga máxima C_y^* y C_z^*



En la página 25 de la DNV RP F109 se encuentran unas tablas a partir de las cuales se puede obtener los valores de C_y^* y C_z^* en función de K^* y M^* Donde:

$$K^* = U_S \cdot \frac{T_U}{D} \quad \text{y} \quad M^* = \frac{V^*}{U^*}$$

K^* : número de Keulegan-Carpenter

1.1.3. Factor de reducción por penetración en el lecho marino y zanja. “ r_{tot} ”

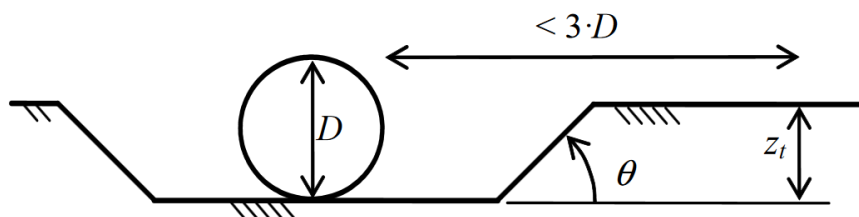
No se tendrá en cuenta la reducción por penetración, ya que la tubería se encuentra apoyada sobre lastres de hormigón.

Sin embargo, al proyectarse para estar enterrada, se colocara en una zanja que genera un factor de reducción en las fuerzas hidrodinámicas. Para el cálculo de éste se emplearan las siguientes expresiones en función de la dirección:

$$r_{tr,y} = 1.0 - 0.18 \cdot (\theta - 5)^{0.25} \cdot \left(\frac{z_t}{D}\right)^{0.42}, \quad 5 \leq \theta \leq 45$$

$$r_{tr,z} = 1.0 - 0.14 \cdot (\theta - 5)^{0.43} \cdot \left(\frac{z_t}{D}\right)^{0.46}, \quad 5 \leq \theta \leq 45$$

La profundidad de la zanja se tomará en relación con el nivel del lecho marino con una anchura no superior a $3 \cdot D$ de la tubería. Como se muestra en el siguiente diagrama:





Las zanjas serán dragadas con una relación de pendiente 2H:1V equivalente a un ángulo de 26.57° . Teniendo en cuenta este ángulo y tomando como referencia para la profundidad de 3 diámetros (1.8m), se obtienen como factores de reducción 0.59 para las fuerzas horizontales y 0.45 para las verticales.

1.2. Resultados

Como se explica al principio del apartado, el cálculo se realiza para seis puntos distribuidos a lo largo de la trayectoria. El punto con más profundidad, corresponde a tres diámetros diferentes debido al estrechamiento de la tubería. Los tres puntos con menos profundidad, corresponden a puntos de la tubería que, una vez terminado el proyecto, corona de la tubería estará en todo momento bajo, al menos 1.5 metros de tierra. Antes de enterrarla se encontrará en zanja, intervalo de tiempo para el que se proyecta.

Se han considerado diferentes direcciones de oleaje considerándose NW la más peligrosa, y por tanto, la estudiada. También se ha tenido en cuenta el efecto de los ciclones sobre la vida útil de la tubería.

En las siguientes tablas se muestran los resultados de los cálculos realizados:

Fy (N)	1052,84	692,55	384,75
Fz (N)	557,20	316,05	175,58

Tabla 2: Resultados



punto	1	2	3	4	5	6	5 (900)	6(900)	6(500)	7(500)
Tr(años)	1,00	1,00	1,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
punto	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	5,00	6,00	5,00	6,00
d (m)	3,00	8,00	10,00	13,00	15,00	18,00	15,00	18,00	15,00	18,00
dirección	NW	NW	NW	CICLON	CICLON	CICLON	CICLON	CICLON	CICLON	CICLON
pk (m)	300	800	1200	1800	2200	2600	2200	2600	2200	2600
Tp	7,06	7,03	7,02	11,07	11,07	11,06	11,07	11,06	11,07	11,06
Hs	1,67	1,67	1,74	3,80	3,76	3,77	3,76	3,77	3,76	3,77
φ	5,46	5,44	5,32	5,68	5,71	5,70	5,71	5,70	5,71	5,70
y	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kt	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
g	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Tn (s)	0,55	0,90	1,01	1,15	1,24	1,35	1,24	1,35	1,24	1,35
Tn/Tp	0,08	0,13	0,14	0,10	0,11	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12
Tu/Tp	0,82	0,90	0,95	0,85	0,90	0,91	0,90	0,91	0,90	0,91
Tu (s)	5,79	6,33	6,67	9,41	9,96	10,06	9,96	10,06	9,96	10,06
Tn/Tu	0,10	0,14	0,15	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12	0,13
τ	1,13	1,07	1,06	1,10	1,09	1,08	1,09	1,08	1,09	1,08
Us*Tn/Hs	0,43	0,35	0,28	0,38	0,36	0,35	0,36	0,35	0,36	0,35
Us (m/s)	1,30	0,65	0,48	1,25	1,09	0,97	1,09	0,97	1,09	0,97
Ku	0,83	0,96	1,01	0,89	0,89	0,93	0,89	0,93	0,89	0,93
U (m/s)	1,08	0,62	0,49	1,11	0,98	0,90	0,98	0,90	0,98	0,90
V (m/s)	0,31	0,04	0,03	0,09	0,08	0,06	0,08	0,06	0,08	0,06
M	0,29	0,06	0,06	0,08	0,08	0,07	0,08	0,07	0,08	0,07
D	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	0,90	0,90	0,50	0,50
K	1,51	1,32	1,38	3,93	3,52	3,64	3,52	3,64	3,52	3,64
Cy	6,13	20,70	18,80	6,67	7,56	7,90	7,56	7,90	7,56	7,90
Cz	1,35	3,98	3,74	3,53	3,45	3,55	3,45	3,55	3,45	3,55
T	6,54	7,00	7,05	10,63	10,47	10,91	10,47	10,91	10,47	10,91
% $r_{tot, y}$	0,59	0,59	0,59	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
% $r_{tot, z}$	0,45	0,45	0,45	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
ρ_w	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025
Fy (N)	1037,37	561,84	309,85	1052,84	923,40	770,83	692,55	578,13	384,75	321,18
Fz (N)	190,61	82,39	47,01	557,20	421,39	346,39	316,05	259,79	175,58	144,33

2. Lastre necesario

De acuerdo con el documento DNV RP F109, el cálculo se realiza para verificar que se cumplen las condiciones de estabilidad expuestas al principio del apartado. En las expresiones mencionadas, se tienen en cuenta varios factores, de los cuales se despeja el peso de los latres necesario para cumplir las condiciones.

Condición 1:



$$w_s = \gamma_{sc} \cdot \frac{Fy^* + \mu \cdot Fz^*}{\mu}$$

Condición 2:

$$w_s = \gamma_{sc} \cdot Fz^*$$

Donde:

γ_{sc} : coeficiente de mayoración con valor 1.3

μ : 08

De los resultados obtenidos, se ha considerado el más desfavorable para el dimensionamiento de los lastres, es decir, el relativo al calculado en el punto 4 para una situación extrema en el diámetro Ø1200, el punto 5 y 6 para una situación extrema en lo relativo a las tuberías Ø900 y Ø500. Para el cálculo se ha tenido en cuenta, además, el peso sumergido de la tubería.

El valor resultante para la tubería de Ø1200mm es de **349,28 Kg/m** como peso sumergido, lo que en la superficie equivale a **852 kg/m**.

En el caso del tramo difusor, el valor resultante para la tubería Ø900 es de **174,90 Kg/m** como peso sumergido, lo que equivale a **430 Kg/m** en la superficie.

La parte fina del tramo difusor, cuyo diámetro es Ø500 es de **105,3 Kg/m, 257 Kg/m** en la superficie.

Una vez sabido el peso por unidad de longitud, se establece la separación entre los lastres como **5.5 m** entre ejes. Se ha seleccionado esta separación porque supone una disposición constructiva más sencilla.

Sabiendo el peso así como la disposición de los lastres a lo largo de la tubería, se procede al cálculo del volumen necesario de los lastres.

$$2500_{(Kg*m3)} \frac{Vol_1}{5.5_{(m)}} = 852_{(Kg*m)}$$

$$Vol_1 = 1,9m^3$$

$$2500_{(Kg*m3)} \frac{Vol_2}{5.5_{(m)}} = 430_{(Kg*m)}$$

$$Vol_2 = 0,95m^3$$



$$2500_{(Kg*m3)} \frac{Vol_3}{5.5_{(m)}} = 257_{(Kg*m)}$$

$$Vol_3 = 0,6m^3$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados:

ID	Ø1200	Ø900	Ø500
Fy (N)	1403,78	692,55	384,75
Fz (N)	742,93	316,05	175,58
Fy (Kg/m)	143,097	70,597	39,220
Fz (Kg/m)	75,732	32,217	17,898
Ysc	1,3	1,3	1,3
μ	0,8	0,8	0,8
Ws cond 1 (kg)	330,98	156,60	87,00
Ws cond 2 (kg)	98,45	41,88	23,27
Wtuberia sum * Ysc	-18,30	-18,30	-18,30
F last+tub smg (Kg/m)	349,28	174,90	105,30

Tabla 3: Resultados de volumen necesario para lastres

La Geometría de los lastres será Trapezoidal, aproximadamente como se muestra en el siguiente diagrama, obtenido del libro de referencia “*Marine Wastewater Outfalls and Treatment Systems*”. En los planos se puede apreciar con más grado de detalle.

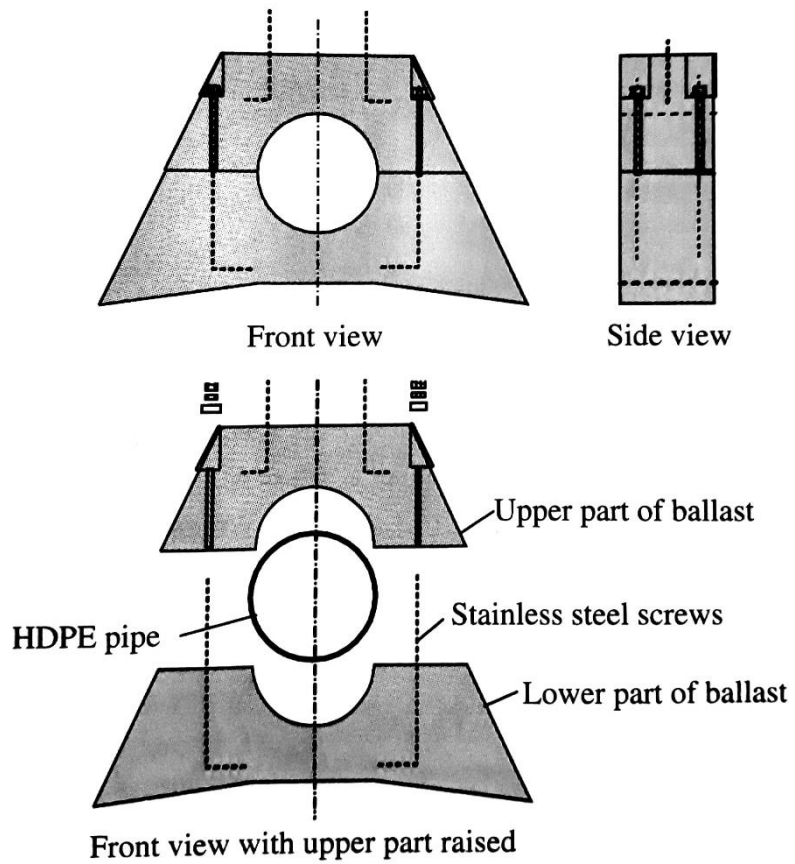


Ilustración 3: lastres trapezoidales



3. Tornillos necesarios

Los lastres de la tubería previamente calculados, tienen forma trapezoidal, sin embargo, no son una única pieza, están separados por un plano horizontal que atraviesa la circunferencia de la tubería por su vértice. Las dos partes de cada lastre están sujetas entre sí mediante tornillos. Los tornillos de acero inoxidable deben resistir, además de las solicitaciones a lo largo de la vida útil, las tensiones que se pueden producir a lo largo del proceso constructivo.

En este apartado, se realizan los cálculos necesarios para el dimensionamiento, según la EAE, de los tornillos para las situaciones más desfavorables que se consideran posibles durante el proceso de puesta en obra.

3.1. Resistencia a cortante

A lo largo del proceso de hundimiento, donde se pueden alcanzar inclinaciones de 45º, los tornillos estarán sometidos a esfuerzos cortantes a causa de la inclinación. Esta verificación se realiza según la siguiente expresión de la EAE ART 58.6.

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 f_{ub} A_s n}{\gamma_{M2}}$$

Donde:

f_{ub} : Valor nominal de la resistencia a Tracción, en este caso 500 N/mm²

A_s : Área de la sección del tornillo

n : número de planos de corte, en este caso 1

γ_{M2} : 1.25

Considerando los pesos de la base del lastre:

$$1.2_{m^3} * 2500 \frac{Kg}{m^3} = 3Tn \rightarrow 3tn * \frac{1025_{Kg \cdot m^3}}{2,5_{Kg \cdot m^3}} = \mathbf{1,23Tn \text{ (peso sumergido)}}$$

$$0.56_{m^3} * 2500 \frac{Kg}{m^3} = 1.4Tn \rightarrow 1,4tn * \frac{1025_{Kg \cdot m^3}}{2,5_{Kg \cdot m^3}} = \mathbf{0,58Tn \text{ (peso sumergido)}}$$

$$0.36_{m^3} * 2500 \frac{Kg}{m^3} = 0,9Tn \rightarrow 0,9tn * \frac{1025_{Kg \cdot m^3}}{2,5_{Kg \cdot m^3}} = \mathbf{0,37Tn \text{ (peso sumergido)}}$$



Sin embargo, para quedar del lado de la seguridad, se realiza el cálculo para el peso no sumergido, mayorado por el factor 1.5

$$F_{v,Rd1} = 3 * 1.5 * \sin 45 = 3,182 \text{ (31820N)}$$

$$31.820 = \frac{0.6 * 500 * A_s * n}{1,25}$$

$A_s = 132.58 \text{ mm}^2$ (66.29 mm^2 por tornillo) que, según la tabla 58.6a de la EAE equivale a dos tornillos M12 (tornillos grado 5.6)

$$F_{v,Rd1} = 1.4 * 1.5 * \sin 45 = 1.4849 \text{ (14849N)}$$

$$14.849 = \frac{0.6 * 500 * A_s * n}{1,25}$$

$A_s = 61.87 \text{ mm}^2$ (30.935 mm^2 por tornillo) que, según la tabla 58.6a de la EAE equivale a dos tornillos M12 (tornillos grado 5.6). Un único tornillo bastaría para resistir las solicitaciones, pero el sistema requiere de la sujeción mediante dos pernos, por lo que se colocan dos pernos de la medida mínima disponible.

$$F_{v,Rd1} = 0.9 * 1.5 * \sin 45 = 0.9546 \text{ (9546N)}$$

$$9.546 = \frac{0.6 * 500 * A_s * n}{1,25}$$

$A_s = 39,4 \text{ mm}^2$ ($19,7 \text{ mm}^2$ por tornillo) que, según la tabla 58.6a de la EAE equivale a dos tornillos M12 (tornillos grado 5.6). Un único tornillo bastaría para resistir las solicitaciones, pero el sistema requiere de la sujeción mediante dos pernos, por lo que se colocan dos pernos de la medida mínima disponible.



3.2. Resistencia a tracción

En el proceso de transporte de la tubería desde el emplazamiento de montaje hasta el punto de hundimiento, la base del lastre estará suspendida en el agua sujeta por los tornillos. Para quedar del lado de la seguridad, se realizará el cálculo considerando el peso sujetado no sumergido. El cálculo se realizará de acuerdo al artículo 58.7 de la EAE.

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$$

Considerando el peso mayorado de la base del lastre:

$$1.2_{m3} * 2500 \frac{Kg}{m^3} * 1.5 = 4,5Tn (45000N)$$

$$45000 = \frac{0.9 * 500 * A_s}{1.25}$$

$A_s = 125 \text{ mm}^2$ (62.5 mm^2) que equivale a dos tornillos M12 (tornillos grado 5.6)

$$0.56_{m3} * 2500 \frac{Kg}{m^3} * 1.5 = 2.1Tn (21000N)$$

$$21000 = \frac{0.9 * 500 * A_s}{1.25}$$

$A_s = 58.3 \text{ mm}^2$ (30 mm^2 por tornillo) que equivale a dos tornillos M12 (tornillos grado 5.6) Un único tornillo bastaría para resistir las sollicitaciones, pero el sistema requiere de la sujeción mediante dos pernos, por lo que se colocan dos pernos de la medida mínima disponible.

$$0,36_{m3} * 2.500 \frac{Kg}{m^3} * 1,5 = 1,35Tn (13.500N)$$

$$13.500 = \frac{0,9 * 500 * A_s}{1,25}$$

$A_s = 37.5 \text{ mm}^2$ (19 mm^2 por tornillo) que equivale a dos tornillos M12 (tornillos grado 5.6) Un único tornillo bastaría para resistir las sollicitaciones, pero el sistema requiere de la sujeción mediante dos pernos, por lo que se colocan dos pernos de la medida mínima disponible.



3.3. Interacción cortante tracción

Durante el proceso de hundimiento, además de los esfuerzos cortantes, también se producen esfuerzos de tracción en los tornillos. A continuación se procede al cálculo del esfuerzo de tracción en el proceso de hundimiento, así como la interacción entre los esfuerzos cortantes y de tracción. Se verifica mediante la expresión del artículo 58.7.1 de la EAE:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{31,8/2}{27,14} + \frac{31,8/2}{1.4 * 30,35} = 0,96 \leq 1 \quad \text{cumple}$$

Se realiza el cálculo del más desfavorable asumiendo que los demás cumplen al exigir menos resistencia.

Los tornillos a disponer, en los muertos de todas las secciones, serán 2 tornillos M12 5.6 de acero inoxidable.