

Anejo 10: Dimensionamiento de los muelles

Estudio de soluciones para la reordenación interior y ampliación del puerto deportivo de la Vila Joiosa (T.M. La Vila Joiosa)

Álvaro Olmos Pérez

Lima, julio del 2023



Índice

1.	Objeto.....	5
2.	Tipología del muelle escogido.....	6
2.1.	Procedimiento constructivo	7
3.	Dimensionamiento del muelle.....	9
3.1.	Muelle adosado al dique	9
3.2.	Muelle adosado al contradique.....	10
4.	Cálculo de los esfuerzos actuantes en los muelles.....	11
4.1.	Materiales a emplear y características.....	11
4.2.	Peso propio de los elementos	12
4.2.1.	Caso del muelle del dique	12
4.2.2.	Caso del muelle del contradique	13
4.3.	Empujes del terreno	13
4.4.	Cargas hidráulicas	15
4.5.	Sobrecargas.....	16
4.6.	Fuerza horizontal por tiro de bolardo	17
5.	Comprobaciones de seguridad	18
5.1.	Comprobación frente al deslizamiento	18
5.2.	Comprobación frente al vuelco.....	18
5.3.	Comprobación frente al hundimiento	18
6.	Bibliografía	20

Índice de figuras

Figura 1: Sección de un muelle de bloques de hormigón.....	6
Figura 2: Procedimiento constructivo de un muelle de bloques	8
Figura 3: Dimensiones del muelle adosado al dique	9
Figura 4: Dimensiones del muelle adosado al contradique	10
Figura 5: Pesos propios de los distintos elementos en la sección de muelle	12
Figura 6: Esquema de fuerzas horizontales actuantes sobre el dique.....	14
Figura 7: Esquema de subpresiones del muelle	15



1. Objeto

El presente anejo tiene como objetivo proporcionar una guía detallada para el diseño y dimensionamiento del muelle de bloques propuesto en el proyecto portuario. Este muelle, concebido como una estructura de resistencia por gravedad, representa un componente crucial de la infraestructura portuaria, destinado a soportar las operaciones y cargas inherentes al entorno marítimo.

En este documento, se presentarán las especificaciones técnicas y consideraciones esenciales para la construcción del muelle de bloques. El enfoque recae en garantizar la seguridad, durabilidad y eficiencia de la estructura, abordando aspectos fundamentales como la distribución de cargas, la disposición de los bloques de hormigón y la nivelación precisa de la banqueta.

Con el propósito de brindar claridad y garantizar un proceso coherente, este anexo detalla las fórmulas, parámetros y factores clave necesarios para determinar las dimensiones adecuadas del muelle de bloques. A través de esta guía, se busca asegurar un desarrollo portuario sólido, resistente y capaz de afrontar los desafíos operativos y ambientales del entorno marino.

2. Tipología del muelle escogido

Un muelle de bloques es una estructura marítima diseñada para facilitar las operaciones portuarias al proporcionar un espacio seguro y estable donde los barcos pueden atracar y cargar o descargar cargas. Estos muelles están compuestos por un conjunto de bloques de hormigón dispuestos sobre una banqueta de todo-uno o escollera, la cual es preparada de manera nivelada. En la figura se identifican los elementos más característicos de este tipo de muelles.

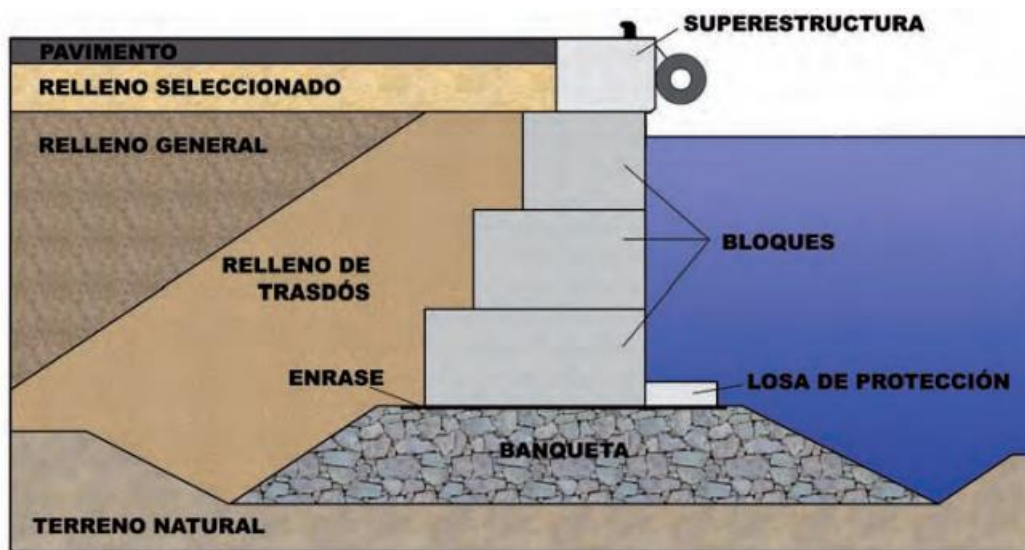


Figura 1: Sección de un muelle de bloques de hormigón

Los bloques que componen estos muelles son típicamente de forma paralelepípeda y sólidos, aunque también se construyen con cavidades en su interior con el objetivo de aligerar su peso y facilitar su manipulación. Esta disposición estratégica de los bloques permite que la estructura resista de manera efectiva las fuerzas del agua en movimiento, como las olas y las corrientes marinas.

La solidez y la masa inherente de los bloques, junto con la fricción entre ellos y su conexión con la banqueta enrasada, contribuyen a la resistencia por gravedad del muelle. Esta característica permite que el muelle sea capaz de soportar las fuerzas marítimas y proporcione un espacio confiable para las actividades portuarias.

Los muelles de bloques son particularmente adecuados para áreas con fluctuaciones considerables en el nivel del agua y condiciones marítimas variables. Estos muelles ofrecen una solución sólida y duradera para las operaciones portuarias, ya que su diseño robusto y su construcción cuidadosa aseguran su capacidad para resistir las fuerzas del entorno marino.

2.1. Procedimiento constructivo

En la construcción de este tipo de muelles, las actividades son similares a las de un muelle de cajones, con la excepción de las relacionadas con la sustitución de los cajones por bloques. A continuación, se describen las actividades involucradas en el proceso de construcción:

Dragado de la Zanja para la Cimentación de la Banqueta:

Se lleva a cabo la excavación y eliminación del material del lecho marino para crear una zanja donde se ubicará la cimentación de la banquetta del muelle.

Mejora del Terreno de Cimentación (si es necesario):

Si el proyecto lo contempla, se realizan acciones para mejorar la capacidad de carga y estabilidad del terreno de cimentación en la zanja excavada.

Construcción de la Banqueta de Cimentación:

Se construye la superficie sobre la cual se asentarán los bloques de hormigón. Esta banquetta se enrasa y se prepara cuidadosamente para asegurar una base sólida.

Enrase de la Banqueta:

Se lleva a cabo el proceso de nivelación y ajuste fino de la banquetta de cimentación, asegurando que esté uniforme y en la posición adecuada para la colocación de los bloques.

Fabricación y Acopio de Bloques:

Los bloques de hormigón, que constituirán los elementos estructurales del muelle, se fabrican siguiendo especificaciones precisas. Luego, se almacenan en el lugar de construcción para su uso posterior.

Colocación de los Bloques:

Los bloques de hormigón se disponen estratégicamente en la banquetta de cimentación, siguiendo un patrón específico y ajustándolos para asegurar una distribución uniforme y estable.

Relleno de Trasdós:

Se rellena el espacio detrás de los bloques con material seleccionado para mejorar la estabilidad y el rendimiento del muelle.

Rellenos:

En esta etapa, se realizan los rellenos necesarios para conformar la parte superior del muelle, proporcionando el perfil requerido para la superestructura.

Superestructura:

La superestructura del muelle se construye sobre la base de los bloques. Esta puede incluir elementos como barandillas, grúas y otros accesorios necesarios para las operaciones portuarias.

Pavimento:

Finalmente, se coloca el pavimento en la parte superior de la superestructura para crear una superficie adecuada para el tránsito de vehículos y personal.

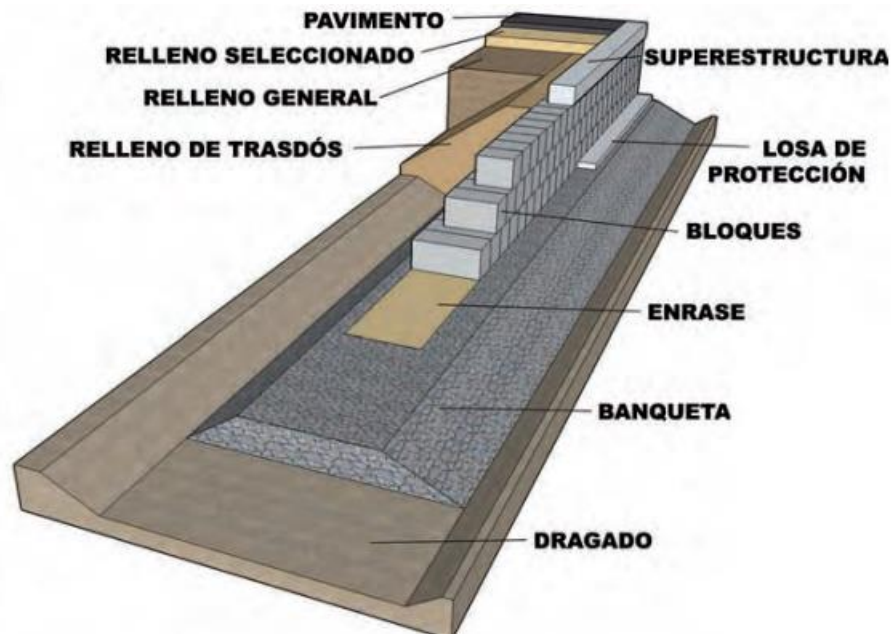


Figura 2: Procedimiento constructivo de un muelle de bloques

3.2. Muelle adosado al contradique

Continuando con la representación gráfica de las dimensiones del muelle, la figura a continuación se enfoca en la configuración del contradique. Esta imagen detallada ofrece una comprensión completa de las medidas y proporciones específicas del muelle en el contexto del contradique:

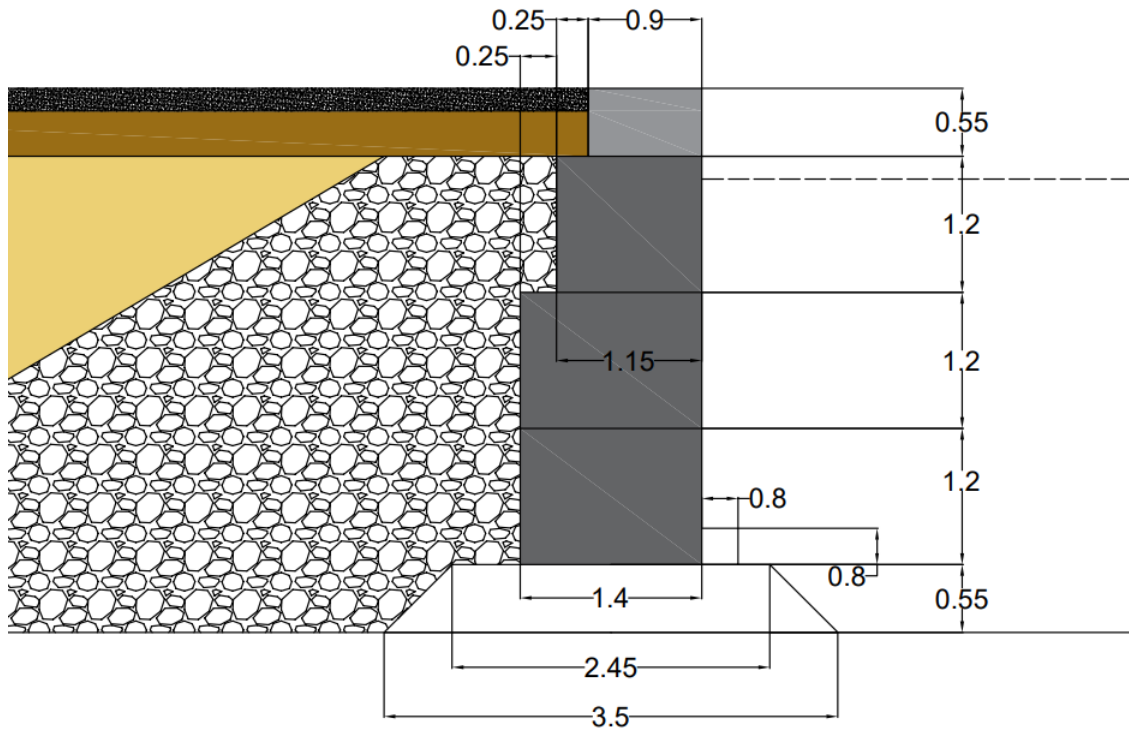


Figura 4: Dimensiones del muelle adosado al contradique

La configuración del muelle se basa en un diseño consistente en tres bloques de hormigón que se disponen uno sobre otro, en ambos el dique y el contradique. Esta disposición brinda una base sólida y estable para la estructura. Adicionalmente, se instalará una viga cantil sobre el bloque superior, completando la estructura y proporcionando una plataforma adicional para las operaciones portuarias.

4. Cálculo de los esfuerzos actuantes en los muelles

4.1. Materiales a emplear y características

En esta sección, se detallan las propiedades de los materiales empleados en la construcción del muelle, así como las suposiciones que se han tenido en cuenta. Estas especificaciones se encuentran documentadas en la ROM 0.2-90, en la tabla 3.4.1.1.2, así como en diversos apartados de la ROM 0.5-05. Estas fuentes proporcionan información crucial sobre las características de los materiales utilizados en el proyecto, lo que resulta fundamental para garantizar la calidad y la durabilidad de la infraestructura del muelle.

- Peso específico del agua de mar $\gamma = 1,025 \text{ t/m}^3$
- Hormigón
 - Resistencia características $f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$
 - Peso específico
 - Hormigón en masa $\gamma_{HM} = 2,4 \text{ t/m}^3$
 - Hormigón armado $\gamma_{HA} = 2,5 \text{ t/m}^3$
 - Hormigón sumergido $\gamma_{HS} = 1,3 \text{ t/m}^3$
- Relleno seleccionado en trasdós Pedraplén
 - Peso específico seco $\gamma_D = 1,75 \text{ t/m}^3$
 - Peso específico saturado $\gamma_{SAT} = 2,30 \text{ t/m}^3$
 - Peso específico sumergido $\gamma_{SUM} = 1,07 \text{ t/m}^3$
 - Peso específico aparente $\gamma = 1.9 \text{ t/m}^3$
 - Ángulo de rozamiento interno $\phi = 40^\circ$
- Escollera de la banquetta Todo – uno
 - Peso específico seco $\gamma_b = 2,00 \text{ t/m}^3$
 - Peso específico saturado $\gamma_{bsat} = 2,30 \text{ t/m}^3$
 - Peso específico sumergido $\gamma_{bsum} = 1,27 \text{ t/m}^3$
 - Peso específico aparente $\gamma = 2.1 \text{ t/m}^3$
 - Ángulo de rozamiento interno $\phi = 40^\circ$
- Ángulo de rozamiento hormigón – hormigón $\delta_1 = 35^\circ$
- Ángulo de rozamiento hormigón – banquetta $\delta_2 = 32^\circ$
- Ángulo de rozamiento hormigón – trasdós $\delta_3 = 15^\circ$
- Coeficiente de rozamiento hormigón – hormigón $\mu_1 = \tan(\delta_1) = 0,70$
- Ángulo de rozamiento hormigón – hormigón $\mu_2 = \tan(\delta_2) = 0,625$
- Inclinación de la superficie del terreno $\beta = 0$
- Inclinación del paramento del muelle $\alpha = 90^\circ$

4.2. Peso propio de los elementos

Para poder calcular el peso propio de los distintos elementos partimos de la hipótesis de que se empleará hormigón en masa con un peso específico de 2,4 t por metro cúbico.

Consideramos un peso específico del pavimentado como referencia aproximada entre 1,5 y 2,3 t/m³, por lo que tomaremos un valor de 2 t/m³

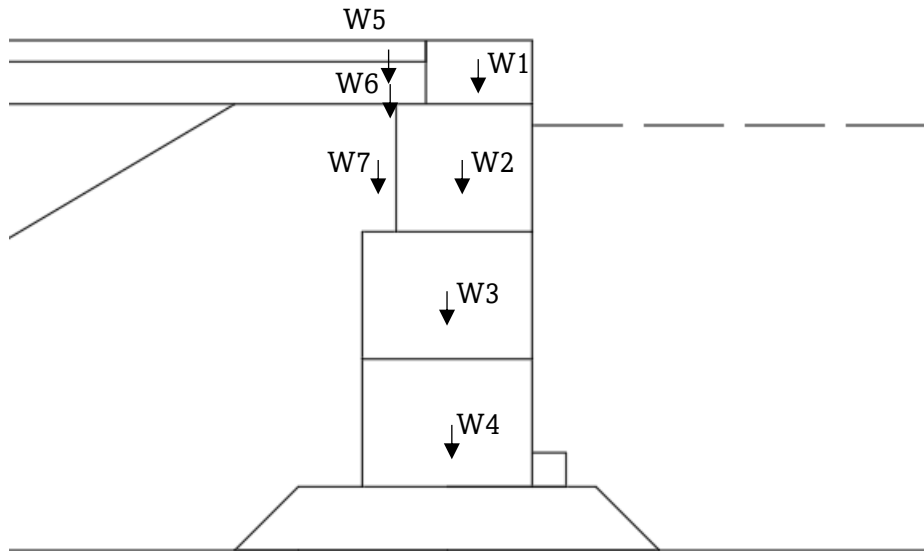


Figura 5: Pesos propios de los distintos elementos en la sección de muelle

4.2.1. Caso del muelle del dique

El peso propio de cada bloque es:

$$W_1 = 2.5 * 1.5 * 2.4 * 9.81 = 88.29 \text{ kN/m}$$

$$W_2 = 3 * 3.2 * 2.4 * 9.81 = 226.02 \text{ kN/m}$$

$$W_3 = W_4 = 3 * 4 * 2.4 * 9.81 = 282.53 \text{ kN/m}$$

Mientras que para el terreno:

$$W_5 = 2 * 9.81 * 0.3 * 0.5 = 8.38 \text{ kN/m}$$

$$W_6 = 1.9 * 9.81 * 1.2 * 1.5 = 33.55 \text{ kN/m}$$

$$W_7 = 2.1 * 9.81 * 0.8 * 3 = 49.44 \text{ kN/m}$$

De manera que el peso propio del muelle completo adosado al dique es:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7 = 970.74 \text{ kN/m}$$

4.2.2. Caso del muelle del contradique

El peso propio de cada bloque es:

$$W_1 = 0.9 * 0.55 * 2.4 * 9.81 = 11.65 \text{ kN/m}$$

$$W_2 = 1.2 * 1.15 * 2.4 * 9.81 = 32.46 \text{ kN/m}$$

$$W_3 = W_4 = 1.2 * 1.4 * 2.4 * 9.81 = 39.55 \text{ kN/m}$$

Mientras que para el terreno:

$$W_5 = 2 * 9.81 * 0.3 * 0.5 = 2.94 \text{ kN/m}$$

$$W_6 = 1.9 * 9.81 * 0.25 * 0.5 = 2.33 \text{ kN/m}$$

$$W_7 = 2.1 * 9.81 * 0.25 * 1.2 = 6.18 \text{ kN/m}$$

De manera que el peso propio del muelle completo adosado al dique es:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7 = 134.66 \text{ kN/m}$$

4.3. Empujes del terreno

En el proceso de cálculo de la estructura de contención, se aplicará una simplificación al valor del empuje del terreno sobre el trasdós. Este empuje se considerará como producido únicamente por el pedraplén y se calculará utilizando el método de Rankine. Las propiedades del terreno se han obtenido de la tabla 3.4.1.1.2. de la ROM 0.2-90.

Relleno seleccionado en trasdós

- Peso específico seco
- Peso específico saturado
- Peso específico sumergido
- Peso específico aparente
- Ángulo de rozamiento interno

Pedraplén

$$\begin{aligned}\gamma_D &= 1,75 \text{ t/m}^3 \\ \gamma_{SAT} &= 2,30 \text{ t/m}^3 \\ \gamma_{SUM} &= 1,07 \text{ t/m}^3 \\ \gamma &= 1.9 \text{ t/m}^3 \\ \phi &= 40^\circ\end{aligned}$$

El cálculo de la distribución de empujes se llevará a cabo utilizando la teoría de Coulomb y se dividirá en dos tramos: uno correspondiente al terreno no sumergido y otro al terreno sumergido. Este enfoque permitirá evaluar de manera precisa cómo actúan las fuerzas en diferentes partes de la estructura de contención, teniendo en cuenta las propiedades específicas del terreno y las condiciones de inmersión en agua marina.

NMN: 10 metros / $c = 0$

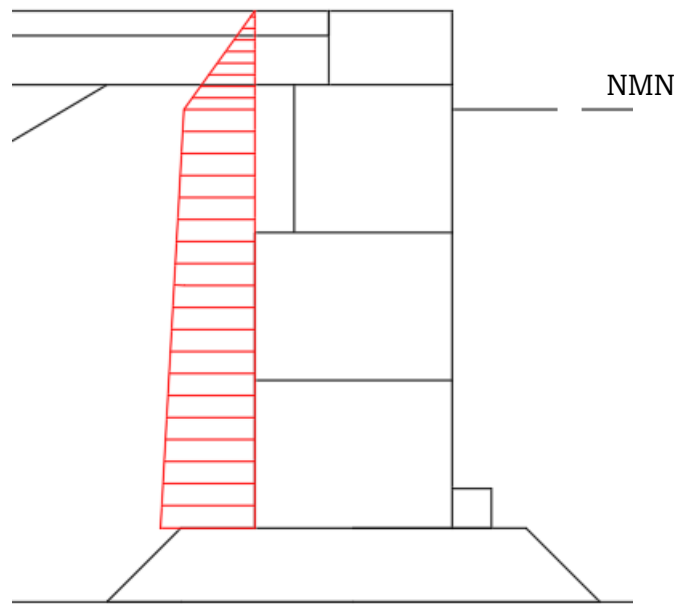


Figura 6: Esquema de fuerzas horizontales actuantes sobre el dique

$$0 < z < 2$$

$$\sigma_u = \gamma * z = 1.9z \text{ t/m}^2$$

$$u = 0$$

$$\sigma'_u = \sigma_u - u = 1.9z \text{ t/m}^2$$

$$k_a = \frac{-\sin \varphi'}{1 + \sin \varphi'} = 0.217$$

$$e'_a = \sigma'_u * k_a - 2 * c' * \sqrt{k_a} = 0.4z \text{ t/m}^2$$

$$2 < z < 10.5$$

$$\sigma_u = \gamma * 2 + (z - 2) * \gamma_{\text{SAT}} = -0.8 + 2.3z \text{ t/m}^2$$

$$u = \gamma_w * (z - 2) = 1.025z - 2.05 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma'_u = \sigma_u - u = 1.2z + 1.05 \text{ t/m}^2$$

$$k_a = \frac{-\sin \varphi'}{1 + \sin \varphi'} = 0.217$$

$$e'_a = \sigma'_u * k_a - 2 * c' * \sqrt{k_a} = 0.26z + 0.23 \text{ t/m}^2$$

De manera que:

- $z = 2, e'_a = 0.8 \text{ t/m}^2$
- $z = 10.5, e'_a = 2.96 \text{ t/m}^2$

Para calcular la resultante del empuje activo efectivo emplearemos el siguiente método:

$$E'_{a1} = \frac{1}{2} * 0.8 * 2 = 0.8 \text{ t/m}$$

$$E'_{a2} = 0.8 * 7.5 = 6 \text{ t/m}$$

$$E'_{a3} = \frac{1}{2} * (2.96 - 0.8) * 7.5 = 8.1 \text{ t/m}$$

De manera que el empuje total es:

$$E'_a = 14.9 \text{ t/m}$$

4.4. Cargas hidráulicas

Se considera una distribución hidrostática equivalente en ambos lados del muelle, lo que implica que solo se deben tener en cuenta las subpresiones generadas en la base de la estructura.

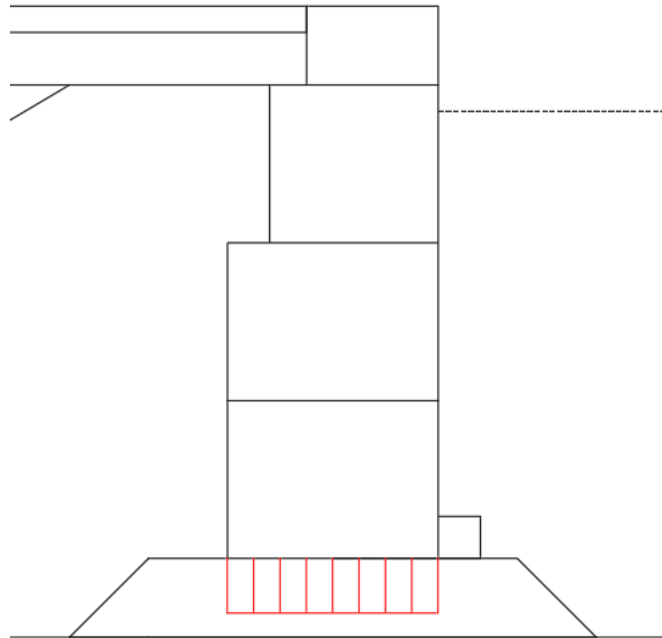


Figura 7: Esquema de subpresiones del muelle

Para calcular estas subpresiones, se utiliza la siguiente fórmula:

$$p = \rho * g * h = 1,025 * 9,81 * 8.5 = 85.46 \text{ kN/m}^2$$

De manera que la resultante será el valor obtenido por el ancho de la base,
341.84 kN/m

4.5. Sobrecargas

Conforme a la ROM 2.0-11, se considerarán las siguientes cargas para los equipos e instalaciones de elevación de embarcaciones y para la carga de estacionamiento y almacenamiento sobre la estructura:

1. **Equipos e instalaciones de elevación de embarcaciones:** Se estimará una carga de 2 toneladas por metro cuadrado (2 t/m^2) para estos equipos. Esta carga representa la presión ejercida por los equipos de elevación sobre la estructura del muelle.
2. **Carga de estacionamiento y almacenamiento:** Se tomará en cuenta una carga de 1.5 toneladas por metro cuadrado (1.5 t/m^2) para la estacionamiento y almacenamiento de cargas sobre la estructura del muelle. Esta carga representa la presión ejercida por la carga almacenada o estacionada sobre la superficie del muelle.

Es importante destacar que estas cargas no se pueden superponer, por lo que se seleccionará la carga más desfavorable de ambas, la cual será utilizada en los cálculos.

$$0 < z < 2$$

$$\sigma_u = q + \gamma * z = 2 + 1.9z \text{ t/m}^2$$

$$u = 0$$

$$\sigma'_u = \sigma_u - u = 2 + 1.9z \text{ t/m}^2$$

$$k_a = \frac{-\sin \varphi'}{1 + \sin \varphi'} = 0.217$$

$$e'_a = \sigma'_u * k_a - 2 * c' * \sqrt{k_a} = 0.4z + 0.434 \text{ t/m}^2$$

$$2 < z < 10.5$$

$$\sigma_u = q + \gamma * 2 + (z - 2) * \gamma_{\text{SAT}} = 1.2 + 2.3z \text{ t/m}^2$$

$$u = \gamma_w * (z - 2) = 1.025z - 2.05 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma'_u = \sigma_u - u = 1.275z + 3.25 \text{ t/m}^2$$

$$k_a = \frac{-\sin \varphi'}{1 + \sin \varphi'} = 0.217$$

$$e'_a = \sigma'_u * k_a - 2 * c' * \sqrt{k_a} = 0.28z + 0.71 \text{ t/m}^2$$

De manera que:

- $z = 2, e'_a = 1.23 \text{ t/m}^2$
- $z = 10.5, e'_a = 3.65 \text{ t/m}^2$

Para calcular la resultante del empuje activo efectivo emplearemos el siguiente método:

$$E'_{a1} = \frac{1}{2} * 1.23 * 2 = 1.23 \text{ t/m}$$

$$E'_{a2} = 1.23 * 7.5 = 9.23 \text{ t/m}$$

$$E'_{a3} = \frac{1}{2} * (3.65 - 1.23) * 7.5 = 9.08 \text{ t/m}$$

De manera que el empuje total es:

$$E'_a = 19.54 \text{ t/m}$$

4.6. Fuerza horizontal por tiro de bolardo

Se ha tenido en cuenta un tiro horizontal de amarre de 0.5 toneladas por metro (0.5 t/m) o, en unidades del Sistema Internacional, 5 kN/m. Este tiro horizontal de amarre representa la carga que debe soportar el muelle debido a las operaciones de amarre de embarcaciones. Aunque la ROM 0.2-90 no proporciona valores específicos para instalaciones deportivas, se ha considerado apropiado utilizar esta carga de amarre de 5 kN/m como una estimación adecuada para las condiciones de la estructura del muelle en este contexto. Esta carga de amarre debe ser tomada en cuenta en los cálculos de diseño del muelle para garantizar que la estructura sea lo suficientemente resistente y segura para soportar todas las condiciones operativas previstas.

5. Comprobaciones de seguridad

5.1. Comprobación frente al deslizamiento

El coeficiente de seguridad frente al deslizamiento es un parámetro crítico en el diseño de estructuras de contención como muelles. Debe ser mayor que 1.5 para garantizar la estabilidad de la estructura. En su cálculo, se suman todas las fuerzas verticales (F_v) y luego se dividen por todas las fuerzas horizontales (F_d) multiplicadas por el coeficiente de fricción (μ) entre la estructura y el terreno.

$$F_d = \frac{\sum F_v}{\sum F_h} * \mu = 3.16$$

Por lo tanto, el muelle dimensionado cumple frente al deslizamiento

5.2. Comprobación frente al vuelco

El coeficiente de seguridad es un parámetro fundamental en el diseño de estructuras, y su valor debe ser mayor que 1.5 para garantizar la estabilidad de la estructura. Cuando se trata de la estabilidad frente al vuelco, el coeficiente de seguridad se utiliza para evaluar si la estructura es lo suficientemente resistente para resistir fuerzas que puedan hacerla volcar.

$$F_d = \frac{\sum M_{estabilizantes}}{\sum M_{desestabilizantes}} = 2.71$$

Por lo tanto, el muelle cumple frente al vuelco

5.3. Comprobación frente al hundimiento

Para poder comprobar si el muelle resiste frente al hundimiento, debe cumplir la siguiente relación:

$$F_{hundimiento} = \frac{P_{vh}}{P_v} > 2.5$$

El cálculo de la carga de hundimiento se llevará a cabo utilizando la fórmula de Brinch-Hansen, la cual está definida en la ROM 0.5-05. Esta fórmula es una herramienta crucial en el diseño de cimentaciones y estructuras, ya que permite estimar cómo una carga aplicada afectará la capacidad de carga y el hundimiento del suelo en la ubicación específica del muelle. La utilización de esta fórmula garantiza un enfoque preciso y confiable para

determinar la capacidad de carga y el comportamiento del suelo, lo que es esencial para asegurar la estabilidad y seguridad de la estructura del muelle.

$$P_{vh} = q * N_q * f_q + c * N_c * f_c + 1/2 * \gamma * B' * N_\gamma * f_\gamma$$

La fórmula que se utilizará para el cálculo de la carga de hundimiento se define mediante varios parámetros, donde:

- "q" representa la sobrecarga debida al peso de tierras a la profundidad de la cimentación, en el entorno del cimiento. En este caso, se establece que "q = 0", lo que significa que no se considera una sobrecarga adicional debida al peso de las tierras en el entorno del cimiento.
- "c" es la cohesión del suelo, pero se especifica que es nula en este caso, lo que indica que no se tiene en cuenta la cohesión del suelo en el cálculo.
- " γ " representa el peso específico del suelo.
- " N_q ," " N_c ," " N_γ " son coeficientes de capacidad de carga que se utilizan en el cálculo.
- " f_q ," " f_c ," " f_γ " son factores de corrección aplicados a los coeficientes de capacidad de carga.
- "B" es la base efectiva de la cimentación. $B' = B - 2 * e$, donde e es la excentricidad según la dirección horizontal =
- $N_\gamma = 106.1$, según la tabla 3.5.3. de la ROM 0.5-05.
- $f_\gamma = s_\gamma * i_\gamma * d_\gamma * r_\gamma * t_\gamma$
- $s_\gamma = 1 - 0.4 \frac{B'}{L'}$
 - $i_\gamma = \text{coeficiente de inclinación} = (1 - \tan \delta)^3$
 - $d_\gamma = \text{efecto de la resistencia del terreno sobre el plano de cimentación} = 1$
 - $r_\gamma = \text{efecto de la inclinación del plano de cimentación} = 1$
 - $t_\gamma = \text{cimentaciones en zonas de pendiente} = 1$

Por lo que la carga transmitida al terreno será de:

$$P_v = \frac{\sum F_v}{B} = \frac{905.28}{4} = 226.32 \text{ kN/m}^2$$

Para concluir;

$$F_{\text{hundimiento}} > 2.5$$

Por lo que el muelle resiste frente a hundimiento



6. Bibliografía

http://www.abcpuertos.cl/documentos/Rom_Guia/8_Muelles_Parte_I_III.pdf

ROM 0.2-90

ROM 0.5-05

ROM 2.0-11