Universidad de Oviedo

Ingeniería Hidráulica
Universidad de Oviedo

CONCURSO DE INGENIOS HIDRÁULICOS Y AERODINÁMICOS

3ª Edición: Puertos

Ensayo de estabilidad naval de cajones flotantes.

2º | GRADO DE INGENIERIA CIVIL
DOBLE GRADO CIVIL - MINAS

13de diciembre de 2016

ANTONIO NAVARRO | navarroantonio@uniovi.es
EDUARDO ÁLVAREZ ÁLVAREZ - ANTONIO JOSÉ GUTIÉRREZ TRASHORRAS
JOAQUÍN FERNÁNDEZ FRANCOS - EDUARDO BLANCO MARIGORTA
JOAN SOLER GUITART - RAFAEL JIMENO ALMEIDA

PINN-14-036

INTRODUCCIÓN

La construcción de puertos (obras marítimas en general) es una de las actividades fundamentales de los Ingenieros Civiles, y se remonta al menos hasta el 1.500 a.C. (expedición egipcia al país de Punt). Por puerto podemos entender "un lugar de la costa, natural o artificial, protegido de los temporales, en el cual los barcos pueden permanecer al abrigo de éstos y realizar tanto las operaciones de carga o descarga como las de reparación o de mantenimiento que requieran".

Se comenzaron a construir cuando el hombre trató de proteger a sus barcos de la fuerza de los elementos del mar; aunque primero buscó refugio en ensenadas, bahías y desembocaduras de los ríos, sin embargo, se encontró con el problema de las mareas, ya que en pleamar podía entrar y salir de estos lugares naturales de abrigo, pero en bajamar y con el azolve que generalmente se presenta en estas áreas, sus embarcaciones quedaban varadas sin posibilidades de hacerse al mar. Con lo que muy pronto se vio en la necesidad de realizar estructuras artificiales de abrigo y protección, y de atraque.

Una particularidad de los puertos construidos en “mares bravías”, como el Cantábrico, con respecto a otras infraestructuras, es que se puede afirmar, de modo general, que sufrirá durante su fase constructiva y/o su vida útil episodios de pérdida severa de operatividad, ya sea por agitación, rebase, inicio de avería en las obras exteriores o, incluso, destrucción parcial o total. Este hecho, que no es admisible en otro tipo de estructuras, se debe al peculiar carácter de la acción del oleaje.

Los cajones flotantes utilizados para la construcción de diques verticales se estudian en dos fases o estados diferentes fundamentales, que implican:

- La construcción, botadura, navegación y fondeo del cajón.
- Resistir, con garantía de seguridad, las acciones que afectan a su estabilidad y operatividad, una vez construida la obra.

Es la primera fase la que se estudiará en la edición de este año, en lo que se refiere a la estabilidad naval (flotación) de dichos cajones, y que se comportan en la práctica como un “barco de hormigón”.

El cálculo riguroso de las obras de abrigo portuarias, cada vez más exigente debido al constante aumento de calados y de exposición de la obra a la acción directa del oleaje, exige realizar ensayos en modelos a escala, que nos permitan calibrar la infinidad de parámetros que los programas de simulación numérica permiten considerar hoy en día. Además, esta disciplina ha tenido siempre una componente experimental muy importante, debido a la imposibilidad de resolver (ni siquiera plantear) todos los fenómenos físicos y estructurales que se deben considerar. Los diques verticales están construidos con elementos rígidos, en forma de grandes cajones de hormigón armado que se fondean sobre una base de cimentación y se entrelazan originando una pared vertical por el lado mar, en donde la ola rebota, reflejándose así el oleaje.

Se presenta al final de estas Bases una bibliografía útil para comenzar a explorar el mundo de los diques verticales.

BASES DEL CONCURSO

1) Consiste en realizar el **diseño y construcción de un cajón flotante**[1] para la construcción de diques verticales (con un número de celdas variable entre 1 y 9), rectangular, a escala 1/50 (aproximadamente), dentro de los parámetros que se indican en el apartado "Algunos datos" de las presentes Bases; de tal forma que **sea capaz de flotar en un tanque de agua (relativamente tranquila), y sea capaz soportar el llenado o lastrado del mismo con agua**, sin sufrir ni el hundimiento ni escoras inadmisibles durante el proceso de navegación y fondeo.

2) El objetivo final es el **ensayo a escala reducida en un canal hidrodinámico**, y se debe conseguir que una maqueta de dicho diseño:

- Flote en el tanque o canal **de forma estable**, sin necesidad de lastre alguno.
- Superar un **estado límite de lastrado del interior del cajón con agua** sin escoras apreciables ni, por supuesto, hundimiento.
- Y obviamente, manteniendo la integridad estructural y sin experimentar deformaciones permanentes.

3) **Académicamente**, se pretende que los participantes profundicen por su cuenta en un fenómeno relativamente complejo, relacionado con la asignatura Hidráulica e Hidrología de 2º de Ingeniería Civil y Doble Grado de Ingeniería Civil y de los Recursos Mineros, como es de la estabilidad a la flotación de cuerpos semi-sumergidos.

4) El **Jurado**, formado por profesionales de reconocido prestigio en el ámbito de la **Ingeniería Civil**, se reserva la potestad de catalogar a los modelos dudosos como "esperpento estructural" o "engendro estructural" (E^2 en cualquier caso, ver nota[1]), que no podrán ser ensayados.

Igualmente, el Jurado puede proceder a la disección de los modelos que presenten serias dudas por incumplimiento de los criterios indicados posteriormente ("Algunos datos").

La deliberación final del Jurado se realizará al acabar los ensayos, y el resultado se dará a conocer el día de la entrega de premios; siendo su **decisión inapelable** (obviamente).

[1] Es imprescindible cumplir con ciertos criterios de "ortodoxia" a la hora de fabricar los diseños: la maqueta debe parecerse a un cajón portuario, tener la sección típica de un cajón portuario, y el esquema estructural coherente con las cargas que la presa debe soportar (peso propio, presión estática y dinámica del oleaje). En el caso de presentar soluciones estructurales altamente innovadoras (lo cual se agradece) es imprescindible justificar el correcto funcionamiento estructural de la misma mediante un pequeño anejo de cálculo.

Los criterios que específicamente se puntuarán en esta edición son, por orden:

- Flotación (**estable** y sin lastre).
- Economía: **mínimo peso** (es decir, mínimo uso de material).
- Fondeo: se simulará la fase de fondeo mediante el lastrado con agua de todo el interior del cajón (con independencia del número de celdas), hasta el llenado total o hundimiento/escora inadmisible; obteniendo mayor puntuación la solución que **mayor volumen de agua** (relativo al hueco interior) contenga sin perder la estabilidad.
- **Calidad de la ejecución** del cajón.

5) El **premio** consiste en una nota positiva (10) en la asignatura para todos los participantes (que se contabiliza en las prácticas de laboratorio), de acuerdo a los criterios recogidos en la Guía Docente de la asignatura; así como la entrega de una placa conmemorativa a los 3 primeros clasificados, y diverso material didáctico donado por alguno de los patrocinadores. La Organización está cerrando el patrocinio con varias empresas (ver dorso de estas Bases), a los cuáles agradecemos su colaboración.

Debido al éxito de las primeras ediciones de este Concurso, la Organización cursará invitación para participar a los alumnos de 3º y 4º de Ingeniería Civil que lo deseen, incluso de otros Grados. En cualquier caso, se reservará al menos uno de los premios para los alumnos de 2º, destinatarios específicos de la convocatoria.

Los Profesores del Área de Ingeniería Hidráulica también participarán en el Concurso; pero renuncian expresamente al premio, en el hipotético caso de que ganaran (cosa que no tiene por qué suceder; y que de hecho no ha sucedido en ninguna de las ediciones… por ahora).

Fecha y lugar

- Presentación de los modelos y atención a los medios: **martes 13 de diciembre de 2016, 11:45 h. E.P.M.**, hall principal. En este mismo acto, el Jurado admitirá a concurso los modelos presentados que cumplan con la normativa de estas Bases.

- Ensayo (posiblemente destructivo) de los modelos y deliberación del Jurado: **martes 13 de diciembre de 2016, a partir de las 16:00 h. E.P.M.**, Laboratorio del Área de Ingeniería Hidráulica.

- Entrega de premios: **febrero (día por determinar) de 2017, 13:00 h. E.P.M.**, sala de Grados.

(Las fechas pueden sufrir ligeras modificaciones debido a otros eventos festivos o lectivos y la disponibilidad de los miembros del Jurado).

Requisitos y disponibilidades

- **Grupos de hasta 3 alumnos**, como máximo. Será necesario rellenar una **ficha de inscripción** por grupo, que acompaña a estas Bases, y enviarla por correo electrónico o entregarla en el Área de Ingeniería Hidráulica **antes de las 14:00 h. del día 12 de diciembre de 2016**. Las Bases y la ficha se encuentran disponibles en el Campus Virtual de la asignatura Hidráulica e Hidrología de 2º curso de Ingeniería Civil y Doble Grado Civil-Minas o en el Área de Ingeniería Hidráulica. No hay inconveniente en hacer grupos más amplios desde el punto de vista operativo, pero en ese caso, deberán presentarse tantos modelos como sea necesario para cumplir la ratio de "1 maqueta por cada 3 alumnos".

- Cada grupo presentará un **breve Informe** de la estructura diseñada y realizará un ensayo del modelo en el canal hidrodinámico, en fase de flotación y fondeo. El Informe debe contener claramente el valor de todos los parámetros restrictivos del concurso (ver apartado "Algunos datos"), sin perjuicio de que el Jurado realice in situ las comprobaciones que estime convenientes.

En el citado documento se debe indicar la geometría elegida (exterior e interior, con el número de celdas), los cálculos y consideraciones efectuadas (de la estabilidad de la flotación, de resistencia del fuste, solera y tabiques interiores, justificación de los coeficientes de seguridad elegidos, posibles - y seguras - discrepancias entre los datos teóricos y la realidad, etc.), el método constructivo empleado, así como cualquier otra circunstancia que pudiera ayudar al Jurado a dirimir posibles empates entre los participantes (por ejemplo, si dos maquetas soportan la carga máxima de llenado del cajón durante el fondeo). En la primera página deberán constar los nombres de los miembros del equipo y el del dique que se construiría con estos cajones.

- La Organización dispondrá (además del canal, claro, y de una báscula para pesaje de los modelos) un dispositivo de llenado "relativamente" uniforme de todas las celdas; lo cuál no exime a los concursantes de prever un desequilibrio accidental durante el llenado. La Organización no se hace responsable de los desperfectos que los "previsibles" fallos en la flotación o fondeo, puedan causar, por alguna extraña razón, a bienes y/o personas. Se podrá usar cualquier tipo de EPI que los participantes estimen oportunos.

- Para realizar los cálculos de estabilidad, fuerza hidrostática sobre los modelos, análisis estructurales, etc., se podrá utilizar cualquier sistema y programa informático que los participantes puedan conseguir[2]. Es útil la consulta de la página de Puertos del Estado, para encontrar la normativa disponible.

- Lamentablemente, las instalaciones del laboratorio no serán accesibles hasta el día en que se proceda a efectuar los ensayos. No obstante, se apunta como idea la posibilidad de realizar pruebas "caseras" en una bañera, por ejemplo; no sería la primera tesis doctoral que se lee con este "sofisticado" sistema. El tiempo estimado para la fase de diseño es una variable totalmente indeterminada. En cambio, el modelo puede construirse en una tarde.

[2] Se advierte que los cálculos de por sí pueden resultar bastante farragosos, sin necesidad de estropearlos más utilizando un ordenador…

ALGUNOS DATOS

Materiales:

- **Solera y fuste del cajón:** el cajón debe construirse obligatoriamente con alguna clase de hormigón o mortero a base de conglomerante hidráulico (no se debe olvidar que somos Ingenieros de Caminos). El material de los **tabiques interiores** (en el caso de que se dispongan) es libre. Se deben describir en el Informe todos los materiales empleados, así como estimar sus densidades secas y saturadas.

- **Soporte:** dado que los pesos de los modelos resultantes pueden no ser manejables con una sola mano, es imprescindible disponer de algunos puntos de anclaje para el manejo de los mismos mediante grúa.

- **"Impermeabilización":** si se considera oportuno, cualquier método que se utilice para impermeabilización de paramentos o para garantizar la estanqueidad interior de las celdas, debe ser explícitamente descrito en el Informe.

- **Cimentación:** el plano de cimentación del cajón debe ser necesariamente plano y horizontal. Se puede disponer un vuelo en la solera o zapata, siempre que no exceda el 10% de las dimensiones en planta del cajón.

Tipología estructural:

Los cajones deben servir como **subestructura de un dique vertical,** con la libertad de decidir el número de celdas interiores (entre 1 y 9), con las dimensiones generales y restricciones descritas en las presentes Bases.

Restricciones:

La **eslora** del cajón deberá ser **igual o mayor de 35 cm**.

El **puntal** del cajón será de **50 cm** +/-0,5 cm.

La **manga** del cajón será de **25 cm** +/-0,5 cm.

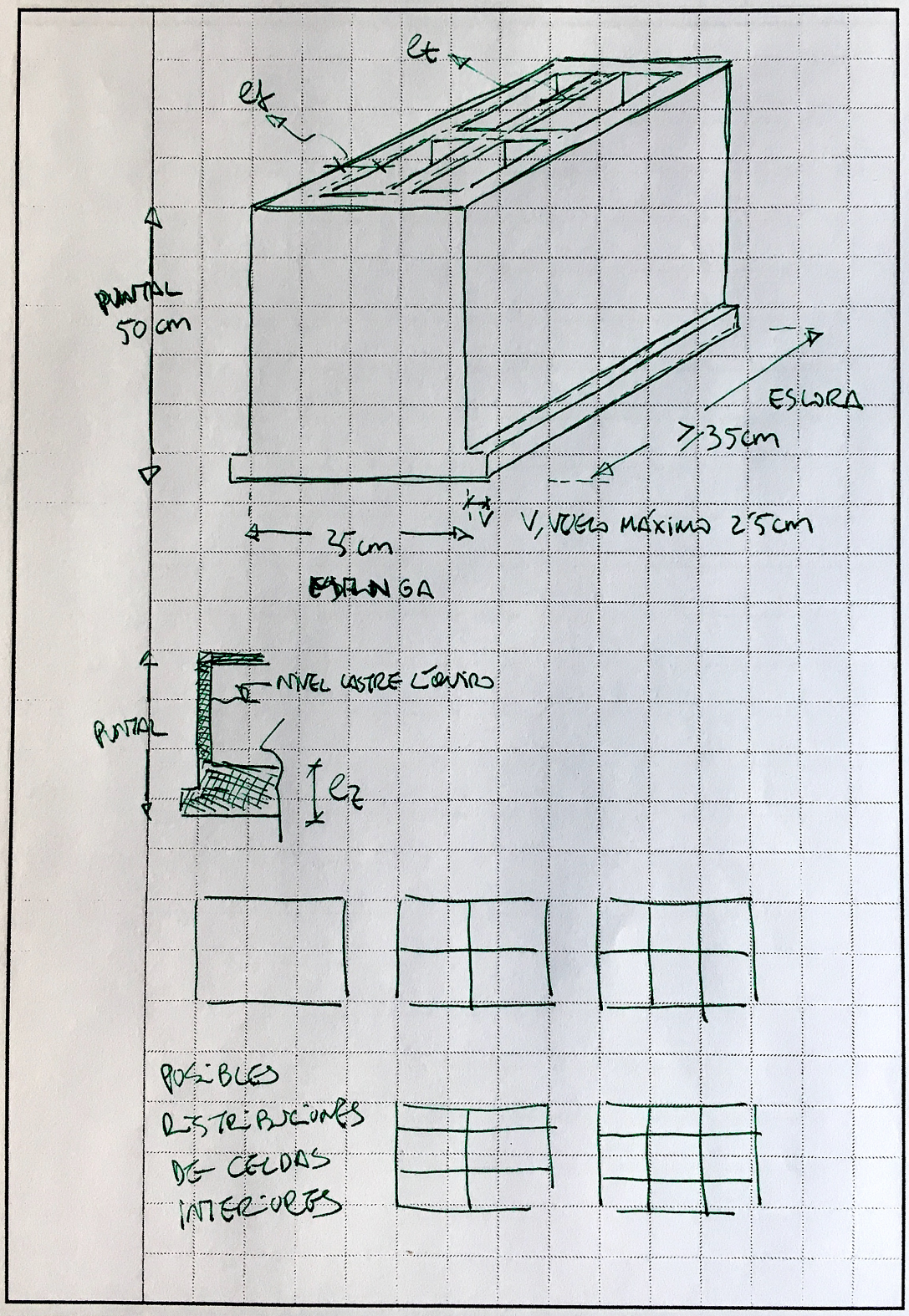
El espesor de la **solera, fuste y tabiques interiores** será libre, debiendo garantizar, eso sí, la integridad estructural del cajón. Se debe ser cuidadoso en la ejecución de las esquinas y de los tabiques, pudiendo disponer algún "mallazo" de refuerzo.

Se indica que los modelos se pesarán antes y después del ensayo, y que el peso mínimo para obtener la puntuación final será el mayor de los dos pesajes.

El incumplimiento (a juicio del Jurado) de cualquiera de estas restricciones es motivo de descalificación, y por tanto, no se podrá pasar a la fase de ensayo.

Los siguientes esquemas muestran los límites geométricos del concurso mediante un esquema orientativo de las restricciones impuestas a las maquetas:

Ingeniería Hidráulica Universidad de Oviedo	II CONCURSO INGENIOS HIDRÁULICOS	NOV 2016
	7 AEROINVENTOS : PRESAS	



CÁLCULOS

Consideraciones filosóficas

Esta es la parte realmente "divertida" del Concurso. A pesar de que "solo" estamos analizando un problema de empuje hidrostático del agua sobre un cuerpo más o menos regular… realmente la cosa puede complicarse lo suficiente. Lo que hay que hacer, con respecto a esto último, es pensar todo lo que puede salir mal y buscar soluciones y procedimientos para corregirlo o minimizarlo.

Sobre las ecuaciones o métodos de cálculo, todo es válido para obtener una solución, hasta llamar al primo que trabaja en la NASA, MIT o similar (no lo hagas porque le pondrás en un buen aprieto y te jurará odio eterno).

Si no se maneja un ordenador, e incluso así, habrá que utilizar hipótesis y métodos de cálculo simplificados. La gracia está en elegir los que facilitan la solución sin comprometer el cálculo.

Como regla general, cuanto más se desarrolle una ecuación y se profundice en el sentido físico antes de "cortar", más exacta va a ser la solución.

En todo este proceso es importante tener una idea de cuales son los órdenes de magnitud de los distintos términos de las ecuaciones. No es lo mismo, por ejemplo, considerar constante en el tiempo un término que varía entre 35 y 38 (unidades del SI) cuando los demás términos están alrededor de 250 (esta sería una hipótesis muy justificable), que intentar tomar el valor medio de una variable que oscila entre 420 y 0 cuando sólo hay otro término en la ecuación y además en la relación aparece una raíz cuadrada (este delito está tipificado en el código penal Art. 347 p. 65.4 y castigado con pena de prisión desde tres años y un día a quince años).

Otra noción interesante es que se van a tener más incógnitas que ecuaciones, y, por supuesto, los datos de partida son más bien escasos. Hay un montón de soluciones posibles y habrá algunos de los valores que tendremos que fijar fiándonos de nuestro instinto.

Cálculo de la estabilidad a la flotación

$$\vec{G} = Vol.sol \cdot \vec{g} \cdot \rho_{hormigón} = \vec{E} = Vol.sum \cdot \vec{g} \cdot \rho_{agua}$$

$$\rho + y_c - y_G = GM \geq 0$$

siendo:

- ρ radio metacéntrico
- γ_G distancia del centro de gravedad del cajón a su base.
- γ_C distancia del centro de carena (centro de gravedad del líquido desplazado) del cajón a su base.
- G posición del centro de gravedad (centro de masas de hormigón más lastre)
- M posición del metacentro
- C_C posición del centro de carena

El radio metacéntrico se calcula mediante la expresión:

$$\rho = \frac{I}{V}$$

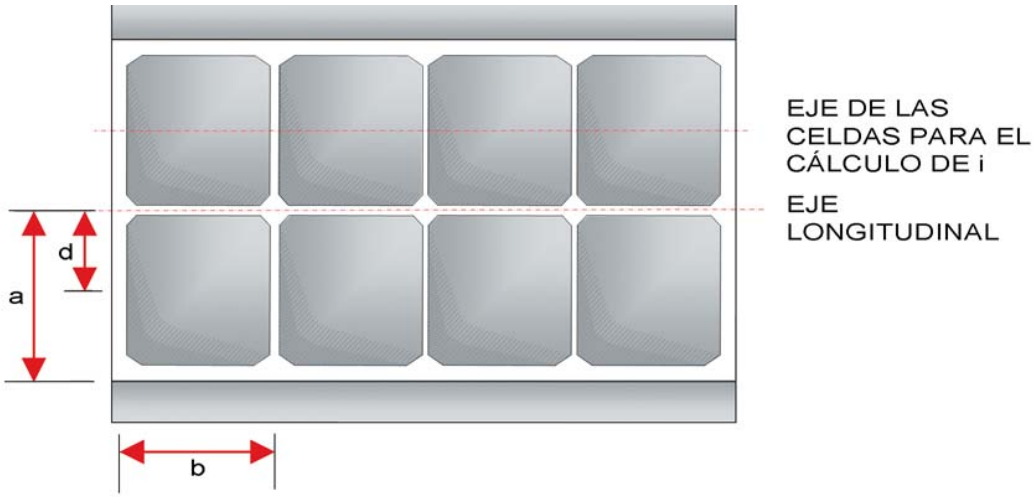
siendo:

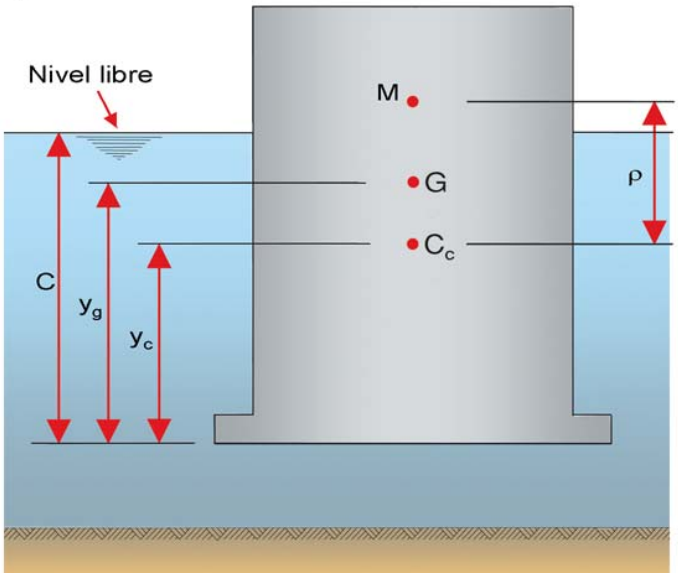
- I momento de inercia de la sección recta del fuste a nivel del mar con respecto al eje longitudinal del cajón (m^4).
- V volumen desplazado por el cajón (m^3).

$$c = \frac{p - v_z \gamma_w}{\gamma_w \times SF}$$

siendo:

- p peso del cajón, más el peso de los lastres (kN).
- v_z volumen de las zapatas (m^3).
- γ_w peso específico del agua de mar (kN/ m^3).
- SF área de la sección recta del fuste (m^2).





Celdas incomunicadas

$$I_e = I - \sum i$$

siendo:

I_e momento de inercia a considerar para calcular ρ
i momento de inercia de las celdas lastradas con respecto a un eje paralelo al longitudinal del cajón pasando por el c.d.g. del área de las celdas.

Celdas comunicadas

$$I_e = I - \sum i_l$$

siendo:
I_e momento de inercia a considerar para calcular ρ.
i_l momento de inercia de las celdas lastradas con respecto al eje longitudinal del cajón.

Para ambos casos

$$\rho = \frac{I_e}{V}$$

Realmente, es todo lo que necesitamos saber. Y es que los Ingenieros de Caminos nos sentimos relativamente cómodos en el terreno de la estática. “Las cosas tienden a no caerse…”, aunque es cierto que en ocasiones ponemos demasiado empeño en que suceda lo contrario. El cálculo de la estabilidad de la flotación del cajón puede ser más o menos difícil debido a la estimación de variables tales como homogeneidad del material, etc., que por las ecuaciones a utilizar. De todas formas, si alguien quiere complicarse la vida, podría investigar sobre la influencia del número de celdas, su distribución y su intercomunicación o no, etc.

Por último, no hay que olvidar que, cuando todo lo demás falla, siempre queda la posibilidad de cerrar los ojos y confiar en la Fuerza.

NOTA IMPORTANTE: estas Bases tienen carácter provisional, hasta que se resuelvan todos los detalles organizativos pertinentes. No obstante, definen suficientemente el problema para poder comenzar su resolución. Cualquier cambio en estas Bases, así como la publicación definitiva de las mismas, se hará por medio de los canales habituales de la asignatura.

SOBRE DISEÑO, CÁLCULO Y CONSTRUCCIÓN DE DIQUES

Se indican algunas referencias útiles para realizar los diseños. Aquí se pueden encontrar ideas sobre el diseño y construcción de diques verticales y los métodos de cálculo. Obviamente, no es necesario ver todas, ni, mucho menos, comprar alguna.

- Negro Valdecantos, V. *et al*. "Diseño de Diques Verticales", Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid. Colección Senior, nº 26. Madrid. 2008.
- "Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias", Ministerio de Fomento, Puertos del Estado, Madrid. 2006.
- Negro Valdecantos, V. "Puertos. Obras. Conceptos básicos y casos reales de estudio". E.T.S.I.C.C. y P., U.P.M., Madrid. 2001.
- José Luis Galmés Giralt & José Luis Monso de Prat. "Diseño Innovador de diques verticales con geometrías cilíndricas". E.T.S.I.C.C. y P., U.P.C., Barcelona. 2005.
- Llago Acero, R. *et al*. "New procedures for the construction of caissons for maritime Works". Revista de Obras Públicas Julio/Agosto 2007/No 3.479. pp. 33 a 50.
- Torroja, E. "Razón y ser de los tipos estructurales", Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid. 2007.
- http://www.puertos.es/es-es.
- White, F.M. "Fluid Mechanics". Mc Graw–Hill. 5th edition. 2003.

COMITÉ CIENTÍFICO, JURADO Y COLABORADORES DE EDICIONES ANTERIORES

Comité Científico y Jurado:

Dª. Gema Olivar Menéndez, Ing. Industrial, Duro Felguera.

D. Gabriel Falcón Saralegui, Ing. de Caminos, Canales y Puertos, TAPUSA.

D. Alberto Hernández Castillo, Ing. de Caminos, Canales y Puertos, FCC.

D. José Manuel Fdz. Llavona, Ing. de Caminos, Canales y Puertos, CICCP Asturias.

D. Tomás Mediavilla Bueno, Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Ogensa.

D. Adolfo Rodríguez, Ing. De Minas, Ogensa.

D. Víctor Orodea López, Ing. de Caminos, Canales y Puertos, COPROSA.

Dª. Begoña Morales Aspra, Diseñadora Gráfica, RJB.

D. Juan Ríos Trigos, Ldo. Historia, RJB.

D. José Ángel Jódar, Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Serpa.

D. Luis Peñalver Lamarca, Ing. de Caminos, Canales y Puertos, AST.

D. Juan Carlos Santos Fernández, Ing. Industrial, Media Madera.

D. Eduardo Blanco Marigorta, Dr. Ing. Industrial, Uniovi.

D. Juan José del Coz Díaz, Dr. Ing. Industrial, Uniovi.

D. Alfonso Lozano Luengas, Dr. Ing. Industrial, Uniovi.

Dª. Mª Belarmina Díaz Aguado, Dr. Ing. De Minas, Uniovi.

D. Enrique Covián Regales, Dr. Ing. Agrónomo, Uniovi.

D. Miguel Casero, Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Uniovi.

D. Silverio García Cortés, Dr. Ing. De Minas, Uniovi.

D. Ángel Martín Rodríguez, Dr. Ing. Industrial, Uniovi.

D. Joaquín Fernández Francos, Dr. Ing. Industrial, Uniovi.

D. Eduardo Álvarez Álvarez, Dr. Ing. Industrial, Uniovi.

D. Rafael Jimeno, Dr. Ing. De Caminos, Canales y Puertos, Pdo. Asturias, Uniovi.

D. Felipe Álvarez Rabanal, Dr. Ing. Industrial, Uniovi.

Dª. Mar Alonso-Martínez, Dr. Ing. Industrial, AST y Uniovi.

D. Antonio Navarro Manso, Dr. Ing. De Caminos, Canales y Puertos, Uniovi.

Colaboradores:

Tableros y Puentes

AST Ingeniería

Coprosa

Ogensa

FCC

RJB Design Studio

ACHE

C.I.C.C.P. Asturias

Media Madera

Inersa

Trofeos Toni2, Oviedo

Serpa

Torroja Ingeniería