

EXPLANADAS Y MUELLES COMERCIALES AL ABRIGO DEL DIQUE DE BOTAFOC EN EL PUERTO DE IBIZA



J. Martín¹, A. Matias¹, V. Díaz², E. Pita³

INTRODUCCIÓN

La construcción de la Explanada y Muelles comerciales al abrigo del dique de Botafoc en el Puerto de Eivissa, pretende responder a los importantes problemas de gestión derivados de la falta de superficie para la explotación portuaria y a la ausencia de limitación física entre el puerto y la ciudad, que viene siendo fuente de conflictos desde tiempo inmemorial. Las obras consisten en la ejecución de dos muelles transversales y de un muelle longitudinal perpendicular a los dos anteriores. Delimitada por el muelle longitudinal se ha generado una explanada de 75.000 m² sobre la cual se realizará una ordenación que permitirá ubicar una estación marítima, pasarelas para desembarque de pasajeros, así como zonas necesarias para el tránsito de mercancía y correcta explotación del Puerto.

En esta ponencia se describirán brevemente los aspectos más significativos que se han tenido en cuenta durante la fase de proyecto, licitación y obra, destacando las implicaciones geotécnicas y estructurales asociadas. Además, se profundizará en diversos aspectos de relevancia en el diseño. También se pretende resaltar el plan de vigilancia ambiental y el plan especial de vigilancia ambiental durante el vertido y dragado acordado con la UNESCO, señalando que el Medio Ambiente ha sido uno de los factores que más se han tenido en cuenta por la Autoridad Portuaria de Baleares tanto en el diseño como en la ejecución de esta importante infraestructura.

EVOLUCIÓN DEL PROYECTO

Primer proyecto

El primer proyecto fue redactado en 2005. En el estudio de alternativas que se llevó a cabo, se concluyó que la mejor tipología para todos los muelles (longitudinales y trans-

¹ AUTORIDAD PORTUARIA DE BALEARES.

² PROINTEC.

³ INCREA.

INFRAESTRUCTURAS, LOGÍSTICA Y SOSTENIBILIDAD

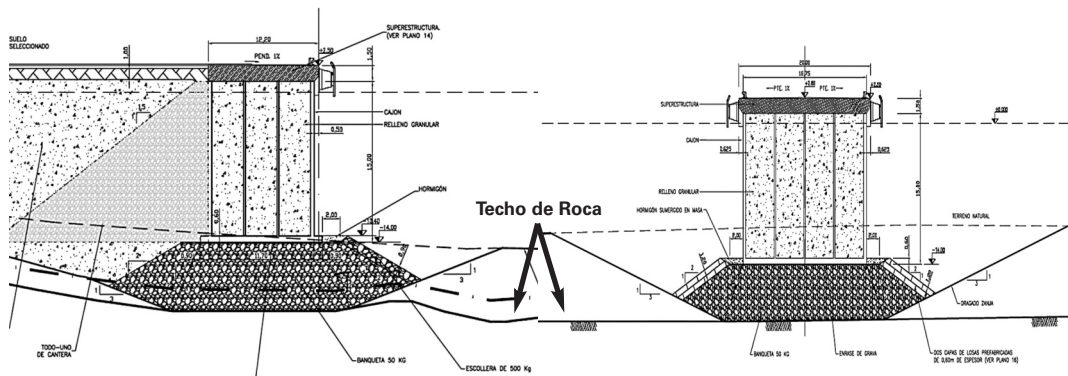


Figura 1. Alternativa muelles longitudinales y transversales de cajones.

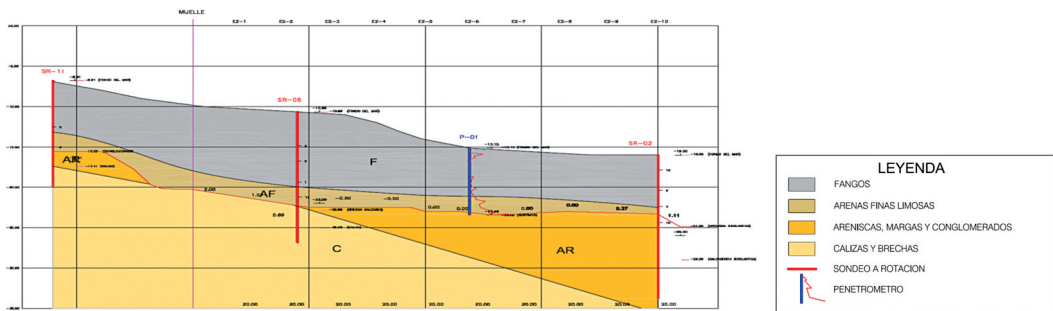


Figura 2. Perfil Geotécnico realizado por CEMOSA.

versales) era una solución de cajones, apoyados sobre banquetas (véase figura 1). Era una solución que implicaba un volumen de dragado considerable y por ello se apuntaba la conveniencia de que en la licitación del concurso se permitiese la presentación de una variante en la que los muelles transversales fueran ejecutados pilotados.

Para poder desarrollar la solución de cajones elegida para todos los muelles, se diseñó y llevó a cabo una campaña geotécnica adaptada a esta tipología. La empresa Cemoza realizó un total de 11 sondeos a rotación con extracción continua de testigo, así como 6 sondeos de penetración dinámica. El objetivo de esta campaña fue identificar el techo de roca (calizas y brechas calcáreas), aunque fuese una roca blanda, e identificar y caracterizar los niveles superiores: fangos; arenas finas limosas; areniscas, margas y conglomerados (véase figura 2).

Segundo proyecto

En el primer proyecto anterior, el volumen de dragado era muy importante y por importante impacto medioambiental se decidió desarrollar un nuevo proyecto, en noviembre de 2008, adaptado a la nueva R.O.M. 0.5-05, en el que los muelles transversales eran pilotados (cimentación profunda). Además, se redujo la superficie

de explanada, así como la longitud del muelle longitudinal. Para los muelles transversales, se desarrolló una solución con el tablero simplemente apoyado en los pilotes, solución que ya se había ejecutado con éxito en otros muelles de la Autoridad Portuaria de Baleares.

Proyecto Variante

Sobre la base de este segundo proyecto, en 2009 se licitó un concurso en el que se permitía presentar una variante con los pilotes empotrados en el tablero. Las obras fueron adjudicadas a la U.T.E. Ferrovial-Cyes-Llull Sastre, con su solución variante, con pilotes empotrados en el tablero (véase figura 3). A continuación se describen, las ventajas y desventajas de comportamiento estructural del tablero empotrado.

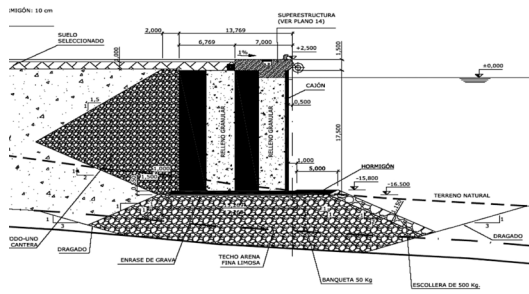
Ventajas

- Menores esfuerzos por cargas horizontales
- Menores deformaciones
- Menores efectos de 2º Orden
- Mejor comportamiento frente a empujes

Desventajas

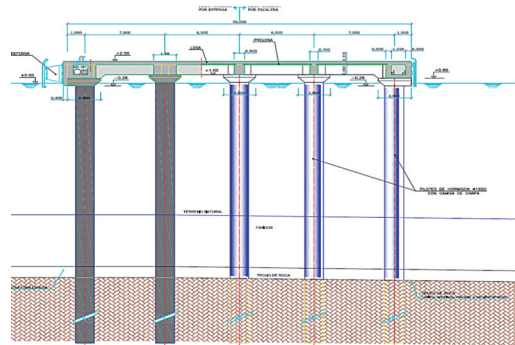
- Nudos complicados de ejecutar (Hormigonado, solapes, etc).
- Calculo y diseño complicados y complejos

Tras la adjudicación, la Autoridad Portuaria de Baleares solicitó que en el proyecto constructivo los muelles transversales estuviesen diseñados para resistir un tiro de bolardo de 150 t, en vez de las 100 t previstas inicialmente, con el fin de facilitar el atraque de los grandes cruceros que está previsto atraquen en el puerto de Eivissa.



Muelle longitudinal

Figura 3. Solución variante.



Muelle transversal

TRABAJOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PILOTES

Campaña geotécnica complementaria

Con el fin de desarrollar adecuadamente esta solución, la UTE complementó la geotecnia del proyecto de licitación con una campaña adicional en 2010. En esta campaña se realizaron 16 nuevos sondeos a rotación (con la intención de reconocer y caracterizar en profundidad también los sustratos rocosos), fundamentalmente en la zona

INFRAESTRUCTURAS, LOGÍSTICA Y SOSTENIBILIDAD

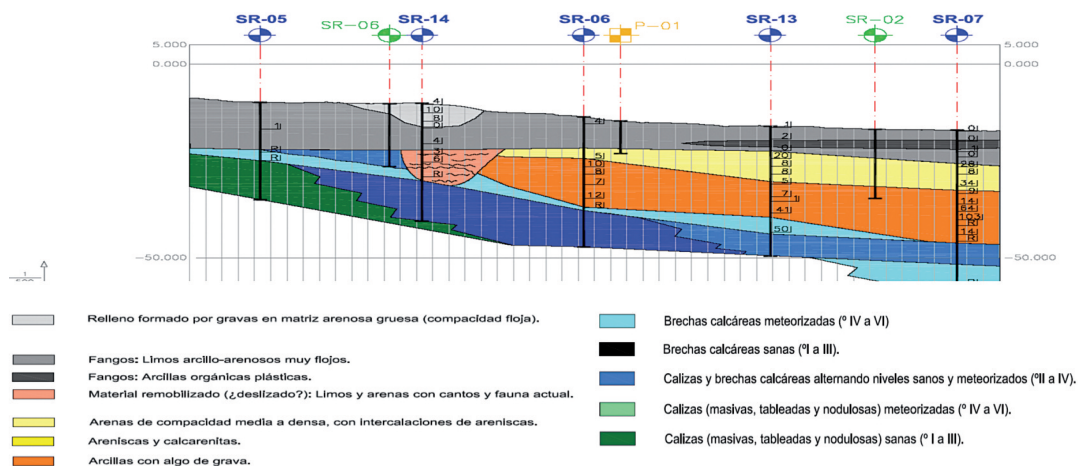


Figura 4. Perfil geotécnico del MT 2 según la campaña geotécnica complementaria.

de los muelles transversales pilotados, y 11 ensayos CPTU, en la zona del muelle longitudinal y de su explanada. Como consecuencia de esta campaña, se redefinió la geotecnia del proyecto de licitación.

Bajo esta nueva caracterización del terreno, la UTE e Increa, con la asistencia técnica de Cemosá, llevaron a cabo una nueva caracterización de las unidades geotécnicas identificadas (véase figura 4).

Elementos considerados para la optimización de los pilotes

La Autoridad Portuaria de Baleares, a través de Increa, realizó una optimización de los pilotes de los muelles transversales, tanto de su longitud como de su armado. De esta manera se han conseguido unos ahorros muy importantes tanto en la longitud de pilote como en su armado. Este proceso de optimización se realizó de la siguiente manera:

Desarrollo, para cada módulo, de un modelo en SAP en tres dimensiones, considerando los módulos de balasto de cada uno de los niveles geotécnicos, a partir de los datos de la campaña geotécnica complementaria.

De este modo, puede llevarse a cabo una determinación más fiable de la envolvente de esfuerzos a lo largo de los pilotes y discriminar distintas zonas de armado a lo largo de la longitud del pilote (véase figura 5).

Ensayos "in situ": La Autoridad Portuaria de Baleares y la Asistencia Técnica (UTE Eptisa - Prointec) han promovido la realización de un ensayo de carga **Célula de Osterberg** en uno de los pilotes. El mismo se llevó a cabo entre el 17 y el 18 de enero de 2011. Sus resultados permitieron incrementar de modo significativo los parámetros resistentes de las unidades geotécnicas y reducir así, aún más, las longitudes de los pilotes.

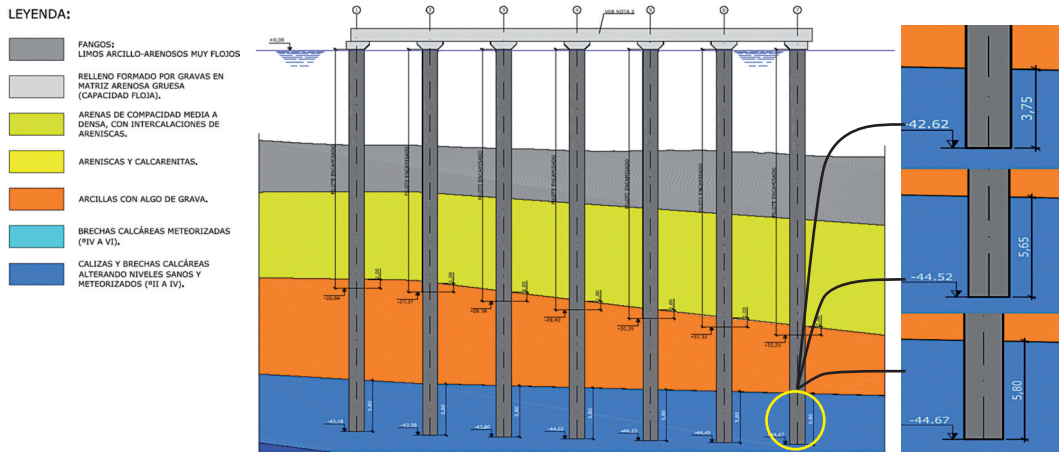


Figura 5. Optimización de longitudes de pilotes para distintas filas.

Ensayo Célula de Osterberg

El Doctor Jorj O. Osterberg, Catedrático emérito de Ingeniería civil en la Universidad del Noroeste, inventó y desarrolló un dispositivo para ensayos de carga en cimentación profunda. La O-cell es un dispositivo de gatos que se sacrifican, calibrados y de energía hidráulica que se instala en el interior de la unidad de cimentación. Al trabajar en dos direcciones, hacia arriba contra la resistencia de fuste y hacia abajo contra la resistencia de punta, la O-cell separa automáticamente los datos de resistencia.

La reacción para movilizar la resistencia de fuste encima del O-cell cuando se realiza el ensayo y la resistencia de fuste aporta la reacción para simultáneamente movilizar la resistencia de punta. El ensayo de carga con la O-cell continúa hasta que tiene lugar una de las siguientes tres situaciones:

- Se alcanza la máxima resistencia de fuste, Se alcanza el valor límite de la capacidad de la punta.
- Se llega a la capacidad máxima de la O-cell.

Cada célula de Osterberg está diseñada especialmente para permitir la medición directa de la expansión de la propia célula (véase figura 6). Al medir también el movimiento y compresión de la parte superior del pilote, se determina el movimiento hacia abajo. El rango de capacidades de las células Osterberg varía desde los 0.7 MN (150 kips) a 27 MN (6,000 kips), referencia folleto de Loadtest (2006).

Ventajas Ensayo

- No requiere estructuras de reacción o anclajes: Mayor seguridad, ahorro de coste y menor espacio de trabajo necesario y tiempo de preparación.

INFRAESTRUCTURAS, LOGÍSTICA Y SOSTENIBILIDAD

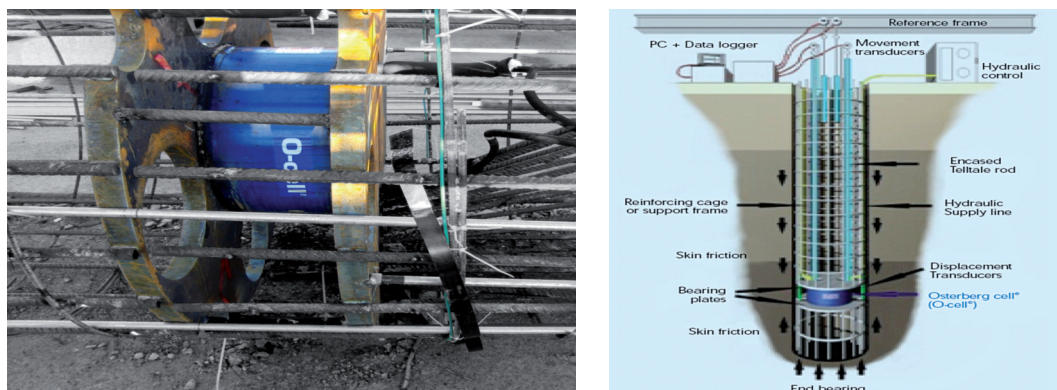


Figura 6. Célula de Osterberg y esquema general del ensayo.

- Cuantifica por separado valores reales de R_f (de los distintos estratos) y R_p del pilote. Altas capacidades de ensayo: Hasta 200 MNw (20.000 Tn).
- Economía frente a los ensayos estáticos convencionales (prueba de carga estática escalonada, penetración, etc): Mayor cuanto más grande es la carga máxima a aplicar.
- Permite su realización en pilotes en agua, condiciones de acceso restringido o con nivel de hormigonado muy bajo.

Finalidad del Ensayo

La finalidad de este ensayo es **evaluar la resistencia del terreno** en el que se están ejecutando los pilotes de los nuevos muelles transversales en el Puerto de Eivissa para **contrastarla con los parámetros** adoptados para el **modelo de cálculo del terreno**.

El modelo del terreno que se está empleando en los cálculos de los pilotes es el que se recoge en la siguiente tabla:

Terreno	Densidad aparente (t/m ³)	C t/m ²	ϕ °	$R_p(1)$ t/m ²	$R_f(1)$ t/m ²	K_b t/m ³
Fango	1,70	0	23	0	0	0
Arenas (finas y medias), areniscas y calcarenitas	2,00	0	33	150	3,00	3.700
Arcillas	2,05	0	30	250	4,50	3.000
Caliza mateORIZADA	2,30	0	35	550	8,20	11.000
Roca y brechas calizas, G.M. I a III	2,65	-	-	700	50,00	250.000

Tabla 1. Parametrización del terreno

Por lo tanto, para la definición y realización de ensayo es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Elección del Pilote , Elección de la Profundidad
- y Elección de la Carga.

Además es fundamental una correcta instrumentación del pilote para obtener parámetros representativos (véase figura 7).

TABLA 1

COTA BATIMÉTRICA (m)	NIVEL	
— 1.55		
— 10.65	AIRE/AGUA	
— 15.75	FANGO	SG 3
— 23.95	ARENA	
— 26.95	ARCILLA OCRE	SG 2
— 34.75	ARCILLA ROJA	SG 1
— 36.55	R. MET	
— 37.75	R. SANA	OC
— 39.75	R. SANA	

OC= OSTERBERG CELL
SG= STRAIN GAUGE

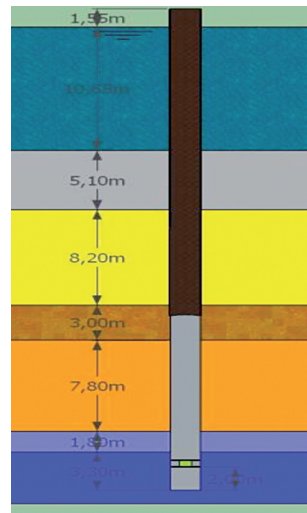


Figura 7. Instrumentación pilote.

Elección del Pilote

Se realizó este primer ensayo en el módulo 4 del Muelle Transversal 1 (véase figura 8). Se puede observar, que entre los sondeos de la campaña complementaria, sólo el sondeo SR-10 se sitúa en la zona donde irá el futuro módulo 4.

Se elige por tanto el pilote más próximo a este sondeo como pilote a ensayar. De este modo, se garantiza el mejor conocimiento posible del terreno realmente atravesado.

Elección de Profundidad

Para definir la profundidad a la que debería ubicar la célula Osterberg dentro del pilote era preciso tener una idea de la relación entre la resistencia por punta y por fuste del pilote a ensayar.

De cálculos anteriores se conocía que la longitud de los pilotes estaba condicionada por el modo de fallo de hundimiento. Si se extrapolan las cargas en cabeza de pilote del módulo 3 del Muelle Transversal 1 (ya calculado) al módulo 4, se tiene que la lon-

INFRAESTRUCTURAS, LOGÍSTICA Y SOSTENIBILIDAD

gitud de empotramiento en las calizas debe ser del orden de 6 m (valor calculado con el perfil del terreno más desfavorable dentro del módulo 4).

Para esta longitud de empotramiento, y con el perfil del terreno del sondeo SR-10, se tiene el siguiente reparto de resistencias por punta y por fuste.

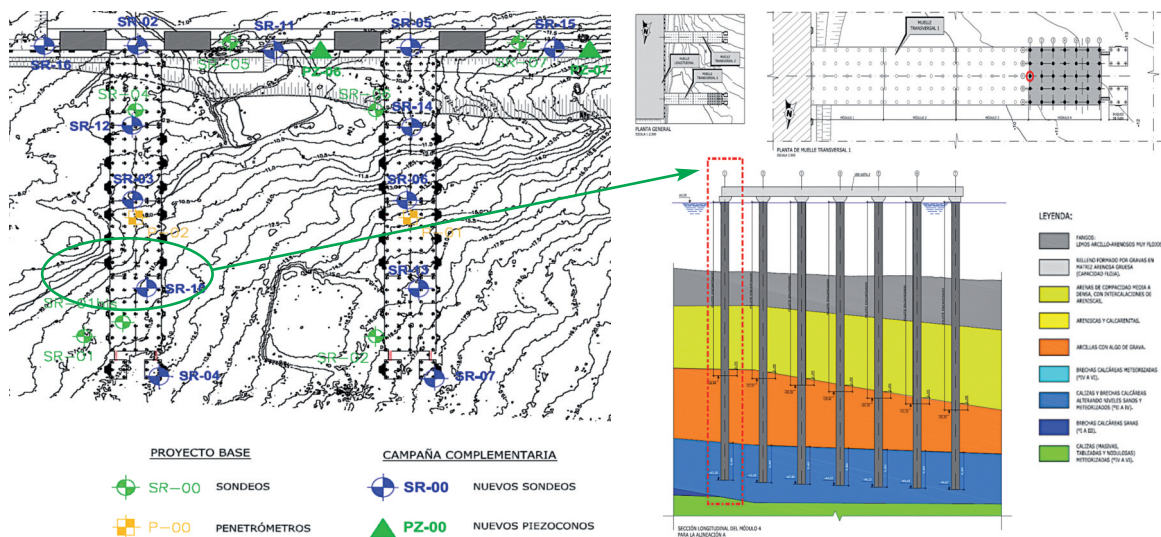


Figura 8. Elección pilote para ensayo de célula de Osterberg.

Longitud del pilote (L_p)	45,10 m
Cota fin de pilote (C_{fp})	-44,10 m
Diámetro exterior del pilote (D_p)	1,65 m
Diámetro interior del pilote (D_{pi})	0,00 m
Área transversal del pilote (A_p)	2,1382 m ²
Densidad del pilote (γ_{map})	2,50 t/m ³
Peso lineal del pilote (pp)	5,35 t/m
Peso lineal sumergido del pilote (pp_{sum})	3,15 t/m
Perímetro exterior del pilote (P_{pil})	5,18 m

FORMULACIÓN BÁSICA (Art. 3.6.4.1)

Peso efectivo del pilote exento (W_{p1})	40,65 t
Peso efectivo del pilote enterrado (W_{p2})	103,69 t
Peso efectivo del pilote (W_p)	144,34 t

Resistencia por punta (O_p)	1,00	1.051,07 t
Resistencia unitaria por la punta (q_{pu})		491,56 t/m ²

z (m)	R_p (t/m ²)
-43,97	488,27
-45,19	519,78

	Espesor h (m)	Perímetro m	Af m ²	Resistencia unitaria por fuste (t/m ²)	R fuste Qf (t)
Fangos	5,30	5,18	27,47	0,00	0,00
Arenas/Areniscas	10,60	5,18	54,95	2,40	131,87
Arcillas	1,50	5,18	7,78	3,60	27,99
	9,50	5,18	49,24	4,50	221,60
Calizas GM II a VI	6,00	5,18	31,10	8,20	255,03
Resistencia por fuste (Qf)					636,60 t

Como puede observarse, la resistencia por punta era bastante superior a la resistencia por fuste más el peso del pilote. Ello quiere decir que, para investigar la resistencia de todas las capas del terreno, no era posible encontrar un punto del pilote donde se igualaran las fuerzas ascendentes y descendentes que provocarían el fallo del pilote. Por tanto, se decidió disponer la célula Osterberg en el extremo inferior del pilote.

Elección de la Carga

Definida la ubicación de la célula Osterberg, quedaba por definir la carga de diseño. Ya se ha mencionado anteriormente que la resistencia por punta era muy superior a la resistencia por fuste más el peso del pilote. Era, por tanto, el fallo de la parte del pilote por encima de la célula Osterberg el que sirva para determinar la carga de ensayo.

De acuerdo con los cálculos obtenidos en la formulación básica (Art. 3.6.4.1) se tiene que:

- La resistencia teórica por fuste de la parte superior del pilote es de 636,50 t.
- El peso total del pilote es de 144,34 t.

Con el fin de tener en cuenta diversas desviaciones (factores de seguridad, criterios más o menos conservadores en la definición de los parámetros del terreno, etc.) y para que se puedan aprovechar mejor las resistencias (principalmente, por fuste) que puedan alcanzarse en el terreno, es aconsejable que la célula sea capaz de levantar del orden del doble del valor estricto de cálculo (780,84 t).

Resultados

Carga Máxima bi-direccional aplicada: **16,1 MNw** (véase figura 9).

- Los valores de Rf obtenidos en el ensayo de los distintos estratos son mayores que los supuestos en el cálculo previo.
- Agotamiento de O-Cell sin llegar a movilizar Rf o Rp máx. → Coef. Seguridad real > estimado en cálculo.

INFRAESTRUCTURAS, LOGÍSTICA Y SOSTENIBILIDAD

- Incremento al alza de resistencias por fuste de calizas sanas, calizas meteorizadas y arcillas.
- Desplazamiento plato inferior célula: **2,73 mm**. (R_f terreno inferior + R_p) y en plato superior **1,63mm** R_{f1}, R_{f2}, R_{f3}

Conclusiones

- **Optimización en recalculo, Increa** (5 Mód. + 2 Duques de alba):
 - Longitud de pilote: Disminución del **7,5%** (Empotramiento en roca).
 - Longitudes de empotramiento en caliza meteorizada G.M. II-IV.

Antes de Osterber	Optimizado (75% pilotes proy.)	
3,75 - 5,80 m	2,00 m	60%

- **Optimización en Ejecución por Ensayo OC y geólogo a pie de pontona :**

- Longitud de pilote (geólogo): Disminución del **3%** (Empotramiento en roca).
- Reducción de longitud en todos los pilotes calculados con los parámetros corregidos tras el ensayo OC (véase figura 9); la optimización se realizó en los módulos 4 del muelle transversal 1 y en los módulos 1, 2, 3 y 4 del muelle transversal 2.

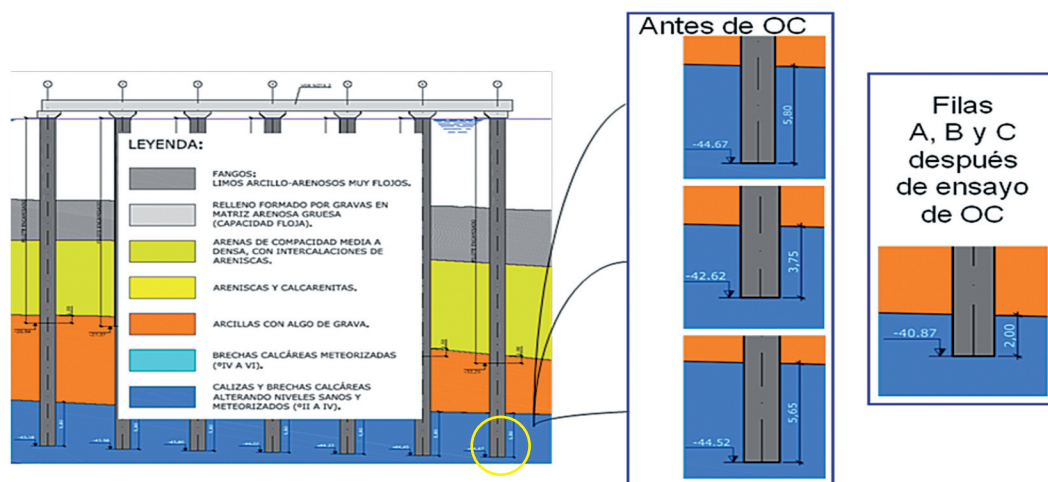


Figura 9. Reducción del empotramiento en pilotes después del ensayo O.C.

SEGUIMIENTO AMBIENTAL.

El Seguimiento ambiental que se está llevando a cabo durante la ejecución de la obra garantiza una elevada protección del medio ambiente propia de un entorno natural de gran valor como es el que nos encontramos en Ibiza. Dicho seguimiento ambiental se

INFRAESTRUCTURAS, LOGÍSTICA Y SOSTENIBILIDAD

fundamenta en el Estudio de Impacto Ambiental (EsIA) en su momento tramitado por la Autoridad Portuaria y sobre el cual se produjo una resolución positiva por el Órgano Ambiental (DIA) el 17 de junio de 2008. En el Estudio de Impacto Ambiental existía una propuesta de Plan de Vigilancia Ambiental (PVA) que se ha sido mejorada notablemente debido a los compromisos de la Autoridad Portuaria con la UNESCO, al ser Ibiza Patrimonio de la Humanidad. Esta mejora del Plan de Seguimiento ha tenido como objetivo:

Llevar a cabo el seguimiento de la evolución de los impactos, incluyendo la eficacia de las medidas correctoras.

Detallar la metodología con que se hará dicho seguimiento.

El PVA realiza el seguimiento y análisis de los siguientes controles: Niveles de Ruido, Calidad del Aire, Calidad Agua Marina, Calidad de Sedimentos, Biosfera Marina, Control Arqueológico y la elaboración de un Proyecto de Integración Paisajística (véase figura 10).

Considerando la importancia que tiene Ibiza como Patrimonio de la Humanidad, a finales de Julio de 2010 se presentaron las conclusiones y compromisos manifestados y adquiridos con la UNESCO, a raíz de la 34ª Reunión del Comité, destacando lo siguiente:

- “las Obras no ponen en peligro los bienes declarados Patrimonio de la Humanidad” y dentro de los Compromisos “la Elaboración de un Plan Especial de Vigilancia Ambiental de Vertido y Dragado” (PEVAVD). Este plan debía contener los siguientes 5 puntos:

1. la identificación de los riesgos potenciales, 2. El contacto con las personas responsables de su verificación, 3. La definición de la gravedad de las alertas, 4. La descripción de las acciones de respuesta, procedimientos, medios a utilizar contra las posibles emergencias y 5. La publicación en internet del control de las obras.

Para el cumplimiento de estas disposiciones se plantearon cuatro (4) objetivos de medición donde se realizaban la comprobación diaria de la situación real del punto de vertido, identificando y actuando sobre tres zonas de control para el análisis del riesgo (Zona de Vertido, Zona de Ses salines y Zona de Espardell), teniendo las siguientes estaciones de control (3 a 1 km y 3 a 3 km en ZV, 3 a 2 Km y 3 en limite

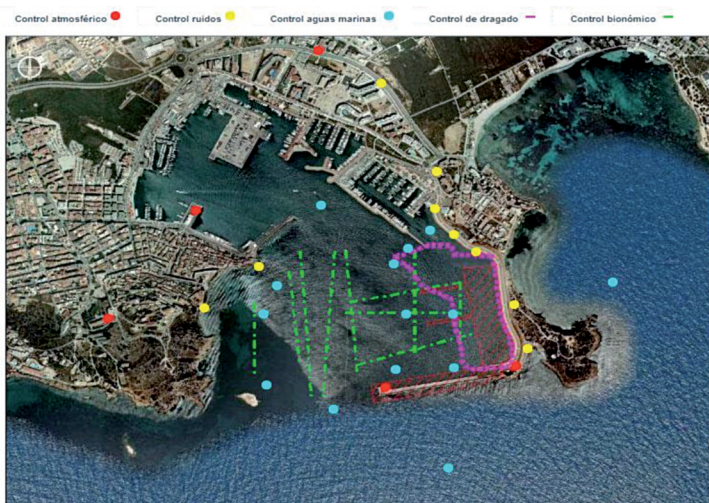


Figura 10. Plano seguimiento PVA. Puntos de control

INFRAESTRUCTURAS, LOGÍSTICA Y SOSTENIBILIDAD

Reserva, y 2 al Este y 4 Oeste de Espardell), analizando en cada una de ellas los siguientes parámetros (Transparencia, Irradiancia, Turbidez, Sólidos de Suspensión, añadiendo controles de la tasa de sedimentación y transectos en la isla de Espardell) (véase figura 11).

Una vez identificadas las zonas y planteados los objetivos, comenzó el seguimiento con las predicciones diarias de la evolución de la pluma de vertido, mediante el modelo matemático MIKE 21. Este modelo simulaba vertidos cada 3 horas y se alimentaba con datos de viento y oleaje publicados por Puertos del Estado. Para comprobar la validez del modelo se contrastaba con las campañas que se realizan a diario en las diferentes zonas durante el tiempo en el que se produjo vertido en el punto autorizado. De esta manera las predicciones acompañadas de un protocolo de alertas, (basado en los valores de referencia obtenidos en las campañas previas realizadas), permitían garantizar los compromisos adquiridos con la UNESCO de prevenir posibles afecciones a los bienes protegidos por la UNESCO.

Para garantizar la transparencia informativa del proyecto se ha elaborado una página web mediante la cual se publican todos de los resultados obtenidos del seguimiento ambiental de la obra. Esta página web es: <http://www.ambientalmuellebotafocibiza.com>. Además, durante las operaciones de dragado y vertido, también se puso en funcionamiento un sistema para monitorizar las rutas de los buques draga de forma que se pudiera detectar si una draga no alcanzaba el punto de vertido autorizado, se podía ver a través de la web: <http://www.localizatodo.com>.

Sin duda alguna podemos afirmar que el seguimiento ambiental de estas obras está siendo uno de los más exigentes y costosos de las obras portuarias realizadas en nuestro país dándose así respuesta por parte de la Autoridad Portuaria de Baleares a demanda de la sociedad ejercida a través de las diferentes administraciones e Instituciones para desarrollar una infraestructura tan necesaria para la isla de Ibiza pero de una manera sostenible.



Figura 11. Estructura de seguimiento PEVADV.