

Nuevo puente sobre la ría del Odiel en Punta Umbría.

Condicionantes especiales para el proyecto de la cimentación



José Luis Sánchez Jiménez, Director
Dpto. Estructuras de TYPESA; y
Pedro Ramírez Rodríguez, Director
Dpto. Geotecnia de TYPESA.

Resumen

El proyecto de una nueva Conexión Sur Metropolitana de Huelva tiene como objetivo la redistribución de los intensos flujos de tráfico de toda el área con criterios de máxima protección medioambiental del entorno de marismas mareales de gran valor, encargado a TYPESA por la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía y por Gestión de Infraestructuras de Andalucía S.A. (GISA). Destaca el tramo del Puente sobre la ría del Odiel, diseñado por el Profesor D. Javier Manterola, atirantado de 300 m de luz central.

El diseño de las cimentaciones debe contar con las desfavorables condiciones geotécnicas de terreno con importantes espesores de suelos

blandos saturados, para lo que es necesario contar con datos del terreno de la mayor fiabilidad para una caracterización precisa de su comportamiento tenso-deformacional.

Palabras clave: Puente atirantado, cimentaciones, pilotes, caracterización geotécnica, marismas, suelos blandos saturados.

Ámbito de actuación

La ciudad de Huelva se localiza en un enclave singular desde el punto de vista físico, entre la desembocadura de los ríos Tinto y Odiel. Este emplazamiento ha condicionado históricamente el desarrollo de infraestructuras de transporte que faciliten las comunicaciones con las poblaciones de su entorno inmediato situadas en las

orillas opuestas de ambos cauces.

La construcción del puente sobre el río Tinto contribuyó a la mejora de las comunicaciones terrestres entre la capital onubense y las localidades situadas en el litoral “este” (fundamentalmente Palos de la Frontera y Mazagón).

De igual forma, el puente sobre el río Odiel supuso un avance sustancial para los desplazamientos entre Huelva capital y Aljaraque, potenciando además el reciente desarrollo



Figura 2. Planta ortofoto.

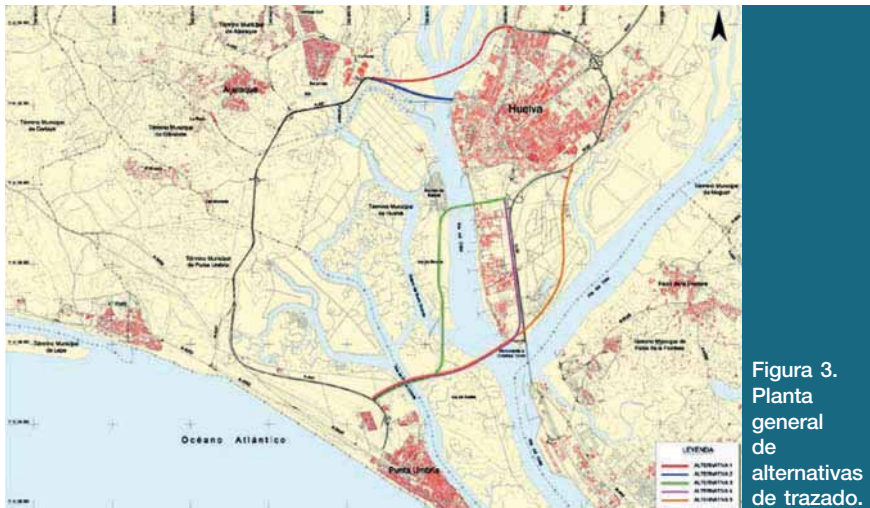


Figura 3. Planta general de alternativas de trazado.

urbanístico de esta población, que se ha convertido en lugar de residencia de parte de la población de la aglomeración urbana de Huelva.

Sin embargo, la creciente demanda de movilidad motivada por esta nueva configuración territorial, en la que puestos de trabajo y servicios esenciales (administrativos, educativos y sanitarios entre otros) se concentran en la capital, da lugar, en la actualidad, a situaciones de congestión viaria cada vez más frecuente, tanto en los accesos a la propia ciudad de Huelva como en su red interna, que ha de soportar los flujos de tráfico interurbano.

Para resolver estos problemas la Dirección General de Infraestructuras Viarias de la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía plantea la construcción de una Conexión Sur Metropolitana de Huelva, que permitirá la redistribución de los intensos flujos de tráfico que actualmente soportan los puentes sobre la Ría del Odiel, canalizando los movimientos entre la capital y las poblaciones del litoral oeste de Huelva (Punta Umbría, El Portil, El Rompido y Cartaya). TYPESA, con la colaboración del Prof. D. Javier Manterola para el diseño del tramo del puente sobre la ría del Odiel, recibe el encargo de la redacción del proyecto.

Esta nueva infraestructura está concebida además para permitir la creación de un sistema de transporte público moderno, eficiente, ecológico y alternativo a los despla-

mientos en vehículo privado, permitiendo la vertebración y el desarrollo sostenible de la incipiente Área Metropolitana de Huelva.

Durante el estudio de soluciones de la Conexión Sur Metropolitana de Huelva se han planteado diversas alternativas que contemplan desde soluciones de conexión por el norte, hasta soluciones con trazado soterrado, siendo finalmente descartadas por cuestiones de funcionalidad o de viabilidad constructiva.

Condicionantes ambientales y patrimoniales

El ámbito de actuación se localiza junto a las Marismas del Odiel, que hoy en día constituye el mayor complejo de marismas mareales del litoral andaluz. Dicha zona presenta una gran sensibilidad desde el punto de vista medioambiental; no en vano está declarada como Paraje Natural, Lugar de Interés Comunitario (perteneciente a la Red Natura 2000) y Reserva de la Biosfera. En su interior destacan Reservas Naturales como la Isla de Enmedio y la Marisma del Burro.

Las Marismas del Odiel se encuentran surcadas por una extensa red de cauces fluvio-marítimos, entre los que destacan el propio río Odiel, que, en su tramo final, confluye con el río Tinto, la Ría de Punta Umbría, o el estero del Burro Grande. Dado que una eventual conexión entre Huelva y los territorios situados al

oeste del Odiel necesariamente ha de atravesar el citado espacio protegido, en la concepción de la Conexión Metropolitana ha primado desde el primer momento la sensibilidad frente a los valores ambientales que atesora el ámbito de actuación, influyendo de este modo tanto en la selección del corredor como en el diseño de la infraestructura.

También cabe señalar la presencia de enclaves de interés arqueológico, dado que la confluencia de los ríos Tinto y Odiel ha sido lugar de asentamiento de diversas poblaciones a lo largo de la Historia.

En particular, puede destacarse el enclave del Almendral, en la zona norte de la Isla de Saltés, con algunos vestigios del siglo VII, y de mayor entidad desde el siglo XII, asociados a una ciudad islámica medieval. Otros enclaves de interés son el litoral de Aljaraque, en la zona norte, y el litoral de Punta Umbría, en la zona del "Eucaliptal".

Descripción del trazado de la Conexión Sur Metropolitana

La solución finalmente propuesta trata de aminorar en lo posible las afecciones al entorno desde el punto de vista medioambiental, reduciendo en lo posible la longitud de paso a través del Paraje Natural de las Marismas del Odiel, y evitando el paso a través de la Reserva de la Isla de Enmedio y las zonas de interés arqueológico de El Almendral.

La Conexión Sur Metropolitana tiene su origen sobre la autovía H-30, a la altura del enlace de acceso a Huelva "sur", discurriendo en su primera parte en sentido norte-sur, en paralelo al trazado de la citada carretera, hasta situarse en las inmediaciones de la Punta del Sebo (próximo ya al monumento a Colón) donde gira hacia el oeste y encara el paso sobre la ría del Odiel. Desde ese punto la plataforma discurre ya sobre estructura, situación que no abandona hasta alcanzar las inmediaciones de la población de Punta Umbría.



Figura 4.
Infografía.
Vista de
la
Ría del Odiel
desde Huelva
hasta el sur.

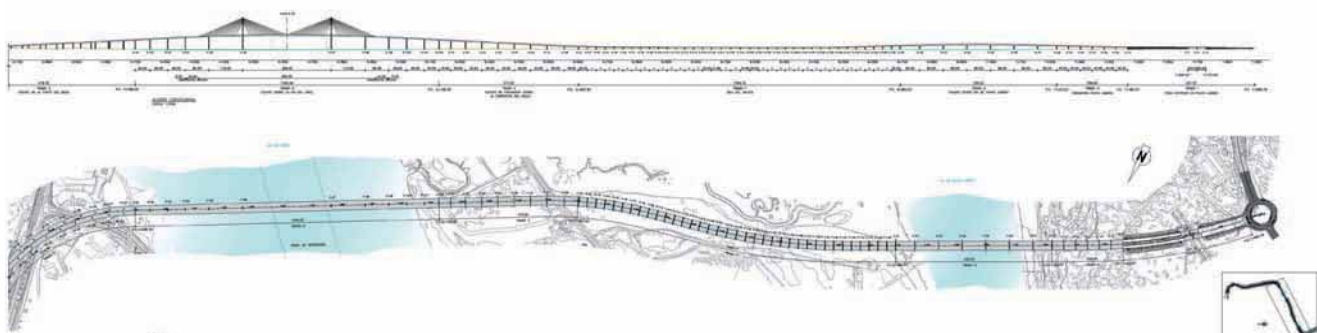


Figura 5. Desarrollo del trazado.

El cruce sobre la ría del Odiel se resuelve mediante la ejecución de un puente singular de más de 1 000 metros de longitud y 45 metros de altura sobre el agua, que permite compatibilizar la actuación con el tráfico marítimo del canal de acceso a la zona interior del Puerto.

Ya en la Isla de Saltés, dentro del Paraje Natural de Las Marismas del Odiel, el trazado discurre ligeramente elevado sobre el terreno (sobre estructuras) a través del pasillo definido por el gancho arenoso de El Almendral –zona con menor valor ambiental relativo del entorno– sin afectar a la Zona arqueológica de “Saltés”, que queda situada junto a su margen derecha.

Finalmente la rasante se eleva para afrontar el cruce sobre la ría de Punta Umbría y alcanzar la autovía A-497, junto a la localidad del mismo nombre.

Descripción general de la estructura

Desde un punto de vista estructural la actuación supone un reto sin-

gular, tanto por la entidad del puente sobre la ría del Odiel como por el encaje del conjunto de las estructuras del tramo en un entorno tan delicado y sensible como las marismas de la ría del Tinto, la ría del Odiel y la ría de Punta Umbría.

Todo el trazado se enfrenta a condiciones de cimentación muy complejas por diferentes y variados motivos. En general, en toda la traza se encuentran espesores de rellenos cuaternarios con potencias muy importantes, que exigen cimentaciones profundas para las estructuras que transmiten cargas bajas y medias, y cimentaciones especiales muy profundas para las estructuras que transmiten cargas altas. Otro condicionante sustancial es el medio tan extraordinariamente agresivo en el que se van a disponer las cimentaciones de la estructura sobre la ría del Odiel, lo que obliga a dotar a los materiales de características y medidas específicas para preservar su integridad y garantizar su durabilidad.

El hecho de atravesar el Paraje Natural de las Marismas del Odiel con plataforma elevada sobre el terreno

da lugar a un imponente viaducto de 3 983 m de longitud, que integra los puentes singulares sobre las rías del Odiel y de Punta Umbría.

El alto valor ecológico y paisajístico de las zonas de marisma constituye el principal condicionante de diseño del trazado de la vía, únicamente supeditado al mantenimiento del gálibo vertical de paso sobre los canales de navegación de las rías del Odiel y Punta Umbría, de 45 y 15 m respectivamente, y que obligan a elevar su rasante. En el resto de la actuación se plantea un perfil longitudinal relativamente ajustado al terreno, de forma que ésta genere el menor impacto visual posible.

El cruce sobre la ría del Odiel: Puente atirantado

La ría del Odiel cuenta con una anchura cercana a los 900 m en cualquiera de las soluciones de paso consideradas, siendo necesario respetar el canal de navegación de acceso al puerto interior y a la zona de astilleros, de 180 m de anchura y 45 m de altura libre.



Figura 6. Infografía del puente sobre la ría del Odiel.

La sección transversal de la conexión metropolitana presenta dos calzadas de dos carriles de circulación, separadas por una plataforma reservada para transporte público. Esta disposición da lugar a una plataforma de anchura mínima de 31 m.

Los condicionantes funcionales de partida expuestos determinan la necesidad de proyectar un puente de gran luz, cuyo diseño se debe compaginar con el impacto que produce la ejecución una obra de tal envergadura, en un entorno de especial singularidad y que demanda un detenido estudio de implantación.

La solución propuesta consiste en un puente atirantado con longitud total de 1 030 m y vano principal de 300 m, con una distribución de luces de 50 + 2x60 + 80 + 115 + 300 + 115 + 80 + 2x60 + 50 m. El vano principal está atirantado a los pilonos superiores, que tienen una altura aproximada sobre la rasante de 60 m.

El atirantamiento del tablero está resuelto con un doble plano que enmarca la plataforma del futuro tranvía. El tablero está formado por un

cajón bicelular de hormigón de 9,0 m de ancho inferior, 11,0 m de ancho superior y almas inclinadas, con un canto de 3,0 m. Los voladizos se resuelven con costillas de hormigón transversales cada 5.0 m.

Los pilonos se definen mediante forma de A, empotrados en el tablero, alojándose sus arranques en la separación entre la plataforma de transporte público y las calzadas. Tiene una altura sobre rasante de 60 m aproximadamente.

Bajo el tablero se disponen pilas de hormigón con un capitel con transiciones curvas adaptadas al tablero. Todas las cimentaciones de las pilas se resuelven con pilotes excavados

“in situ” de 2,0 m de diámetro y unos 60 m de longitud. Los encepados se constituyen disponiendo entre 9 y 36 pilotes por pila.

Las cargas en los pilonos principales alcanzan valores en el entorno de las 34 000 t, mientras que, en las pilas de los accesos, la reacción vertical ronda las 8 000 t. Inicialmente se ha previsto hacer trabajar a los pilotes a tensiones no superiores a 4 MPa.

Puente sobre la ría de Punta Umbría

En el tramo final, próximos ya a la población de Punta Umbría, se localiza el cruce sobre la ría del mismo nombre, en un paisaje de singular belleza. En el punto de cruce, la ría presenta una anchura cercana a los 300

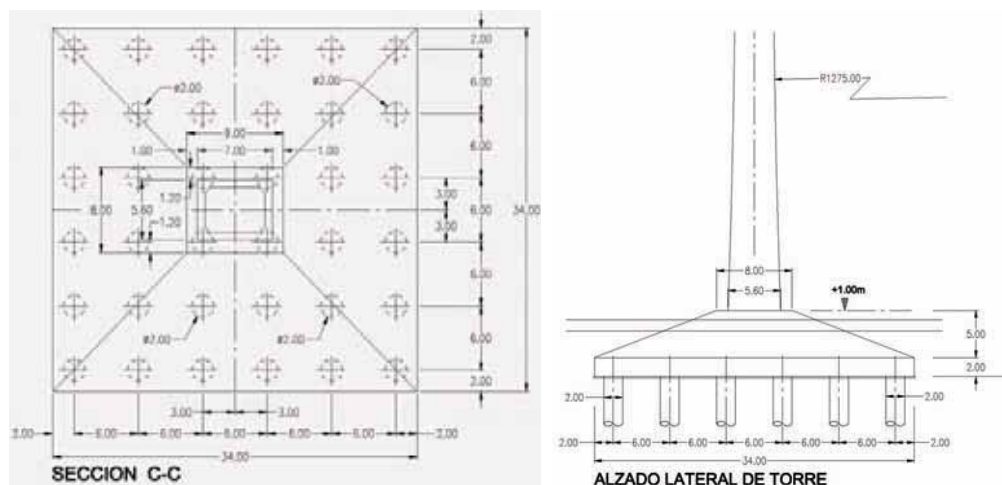


Figura 7. Encepado de las pilas principales de la cimentación del Puente sobre la ría del Odiel.

m, debiendo respetarse un canal de navegación de 40 m de ancho y 15 m de altura, que permita a las embarcaciones remontar el cauce y navegar hacia mar abierto por la ría del Odiel.

Se plantea una solución clásica y bien conocida, el puente de canto variable inferior, con 5 vanos de vanos de 80 m más dos vanos de 65 m de compensación. En sección transversal es una sección mixta con doble cajón metálico de canto variable y losa de hormigón “in situ”. El canto total varía de 4,70 m en pilas a 2,70 m en centro de vano.

La cimentación de las pilas del puente presenta la misma problemática que en el puente sobre la ría del

Odiel, aunque las cargas aquí son significativamente menores. Se proyectan pilotes excavados "in situ" de diámetro 1,50 m y de unos 40 m de profundidad.

Puente sobre la Punta del Sebo

En los accesos al puente sobre la ría del Odiel desde el este, a través de la zona conocida como Punta del Sebo, se plantea un puente de hormigón con una sección transversal similar al puente atirantado, de modo que puedan utilizarse los mismos medios constructivos, simplificándose toda la operación en su conjunto.

El puente sobre la Punta del Sebo destaca por la complejidad de su encaje geométrico, dado el gran número de condicionantes que las infraestructuras existentes imponen a la implantación de pilas: la Autovía H-30, la Avenida Francisco Montenegro, los ramales ferroviario del Puerto, la central térmica Cristóbal Colón y las numerosas conducciones y líneas eléctricas de transporte que garantizan el suministro al Polo Químico de Huelva.

Una solución que responde de forma óptima a estos condicionantes es un tablero de hormigón postesado, formado por dos cajones (ancho tipo de 31 m) separados 15,50 m entre ejes y de 4,50 m de anchura cada uno, con voladizos de 5,50 m en cada extremo, encajando vanos de hasta 60 m de luz. Esta estructura es similar a la de los vanos exteriores del puente atirantado, por lo que se ejecutará con la misma autocimbra que sirve para su construcción, adaptando los encofrados a cada caso.

La cimentación en esta zona presenta una problemática similar al resto de estructuras del trazado, por lo que se diseñan pilotes excavados in situ de 1,5 m de diámetro y de unos 25 a 40 m de profundidad.

Tramo en estructura sobre la Isla de Saltés

En esta zona, típica de marisma, se ha previsto que todo el tramo se re-



Figura 8. Infografía del puente sobre la ría de Punta Umbría.

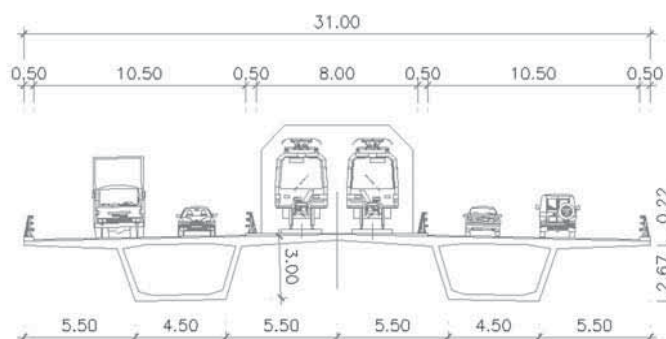


Figura 9. Sección tipo puente sobre la Punta del Sebo.

suelva en estructura, respetando las condiciones mínimas de permeabilidad territorial que demanda el entorno atravesado. Se ha encajado una estructura de vanos isostáticos con tableros de vigas prefabricadas doble T de canto 1,50 m, para luces de 30 m. Las pilas se forman con un dintel de hormigón de 2,50 m de canto y tres fustes separados 11,0 m entre ejes.

La cimentación de esta estructura se resuelve mediante encepado y pilotes prefabricados hincados de 0,40 x 0,40 con una longitud media estimada de 20 m.

La baja capacidad portante y la po-

sible incidencia de los asientos diferenciales diferidos, han condicionado la decisión de diseñar un puente isostático, de forma que estos asientos no produzcan esfuerzos significativos en la estructura. Los detalles de apoyo de las estructuras isostáticas y los dinteles deben permitir un eventual recalce del vano que facilite recuperar parte del asiento diferencial, si el producido realmente es mayor que las estimaciones teóricas compatibles con la funcionalidad de la plataforma.

La estructura prefabricada con vigas tipo dobles T prefabricadas presenta la ventaja de minimizar las afec-

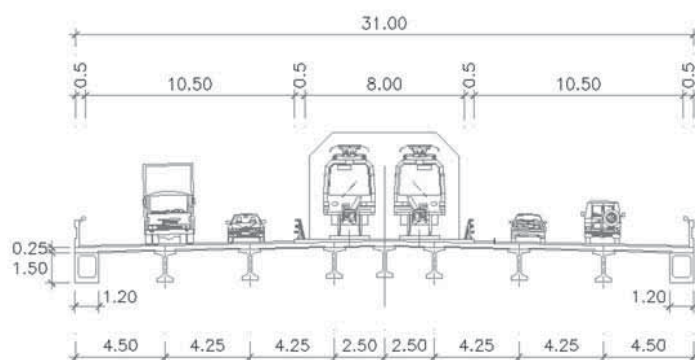


Figura 10. Sección tipo tablero estructura sobre la Isla de Saltés.

ciones al entorno, permitir una rápida y limpia ejecución. Además, la certidumbre en la fabricación, control y suministro de estos elementos son mayores que los que se lograrían con su construcción “in situ”, permitiendo plazos de ejecución ajustados. El factor de escala que proporciona el gran número de piezas iguales convierte esta solución en la más económica y eficiente de entre las que pueden plantearse con estos condicionantes.

Dadas las características geotécnicas del terreno, y para evitar las molestias y contaminación que pueden producir los pilotes a ejecutar “in situ” mediante lodos de tipo bentónico, entendiendo que estas zonas deben tener la máxima protección posible, se ha preferido proyectar la cimentación mediante pilotes hincados prefabricados, que minimizan la contaminación y los plazos de ejecución, siendo muy adecuados para su ejecución en el sustrato existente y con longitudes medias.

Esquema geológico-geotécnico del emplazamiento

Desde el punto de vista geológico, la zona afectada por el presente proyecto se ubica en el sector occidental de la Depresión del Guadalquivir, en las cercanías de su límite septentrional. Esta depresión constituye una de las principales cuencas terciarias de la Península Ibérica, limitada al norte por el Macizo Ibérico o Hespérico de la Meseta y al sur por las Cordilleras Béticas.

La cuenca del Guadalquivir es una depresión alargada en dirección ENE – OSO. Las cotas de esta cuenca varían desde los 800 m de altura en el extremo oriental, al nivel del mar en la zona de Huelva - Cádiz. Hoy día continúa el relleno de la cuenca bajo el mar en el Golfo de Cádiz.

Se trata de la última expresión de una cuenca de tipo antepaís situada entre los dominios Atlántico y Mediterráneo.

El relleno sedimentario de la Cuenca del Guadalquivir se puede dividir

en varias unidades de morfología sigmoidal debida al relleno progresivo de la cuenca a partir de los márgenes norte, este y sur. Este serie de depósitos comenzó hace unos 8 millones de años y continúa actualmente en el Golfo de Cádiz.

De esta secuencia forma el grueso de los materiales presentes en el área de estudio, de más a menos profundidad, turbiditas axiales, las Arcillas de Gibraleón y las denominadas Arenas de Huelva. El tránsito entre las Arcillas de Gibraleón y las

antropicos son los siguientes:

Formaciones del sustrato

No afloran en el área estudiada por encontrarse tapizados por los potentes depósitos holocenos de los ríos Odiel y Tinto. Por ello, únicamente han sido reconocidas en las columnas de los sondeos geotécnicos realizados para la campaña de investigación.

Para ajustar las edades se ha realizado una datación de toda la columna estratigráfica de materiales atravesados mediante técnicas micropaleontológicas. En ellas se han



Figura 11. Sondeo SA-2 sobre plataforma flotante

Arenas de Huelva está marcado en la zona de estudio por un aumento del contenido en glauconita, que es un filosilicato complejo característico en los sedimentos de la transición Plioceno - Mioceno de la zona.

En la superficie se depositan los materiales cuaternarios holocenos que constituyen el relleno final de la cuenca. Entre estos materiales se encuentran formaciones litorales y fluvio-marinas de la ría de Huelva. Este sistema está constituido por los estuarios de los ríos Odiel y Tinto, que tras su confluencia en la zona de la Punta del Sebo conforman un canal común hasta su desembocadura en el Océano Atlántico.

Los distintos grupos litológicos presentes en el área de estudio, ordenados de más antiguos a más modernos y diferenciando entre sustrato, formaciones superficiales y rellenos

distinguido dos grandes grupos de materiales:

– Arcillas y limos carbonatados de color gris azulado (M-P). Mioceno Superior – Plioceno Inferior. Arcillas de Gibraleón.

Es una formación conocida en la zona como “Arcillas Azules de Gibraleón”, definida por Civis *et al.* (1987) y datada por Sierro (1984) como Torroniense Superior – Plioceno Inferior.

Se trata de un conjunto arcillas limosas y limos arcillosos de plasticidad media, de color grisazulado en cortes frescos y tonalidades marrón-verdosas en zonas más alteradas, dispuestos en forma masiva, con intercalaciones esporádicas de niveles más limosos o arenosos. Destaca su abundante contenido micropaleontológico.

A techo de esta formación son comunes las marcas biogénicas (bioturbaciones) y la aparición de niveles



Figura 12.
Sondeo SA-2
Arcillas grises
de 77,0 a
80,5 m.

de glauconita. La potencia de este conjunto varía desde decenas de metros hasta más de 2 000 m en la zona del Golfo de Cádiz.

– *Limos areno-arcillosos carbonatados de color marrón amarillento (P).* *Plioceno medio. Arenas de Huelva.*

Estos materiales, conocidos como “Arenas de Huelva”, se disponen de manera concordante sobre las Arcillas de Gibralfaró. La transición entre ambas formaciones está marcada por la presencia de un nivel glauconítico de unos 2 m de espesor. Este nivel glauconítico no ha sido reconocido de forma clara en los sondeos, pero sí se ha identificado un aumento de glauconita entre los 65 y 85 metros, lo que podría marcar la transición gradual entre las Arcillas de Gibralfaró y las Arenas de Huelva.

Se trata de limos arenosos y arenas limosas muy finas con elevados contenidos de arcilla de color marrón amarillento con tonos ocre y grisáceos; y su contenido macropaleontológico se limita a algunos moldes de bivalvos, aunque su microfauna es muy abundante.

– *Arenas y microconglomerados.* *Pliocuaternalio. Arenas de Bonares.*

Las Arenas de Bonares (Mayoral y Pendón, 1987), se disponen discordantes sobre las arenas de Huelva. Se trata fundamentalmente de arenas y microconglomerados. En los sondeos geotécnicos realizados se han localizado arenas gruesas en sus zonas más superficiales que podrían pertenecer tanto a las Arenas de Bo-

nares como a las Arenas de Huelva.

Formaciones superficiales. Cuaternario.

Depósitos aluviales con predominio de gravas (Qg)

Constituyen el nivel de base de la cuenca estuarina de los Ríos Odiel y Tinto, representando depósitos correspondientes a episodios de mayor energía del transporte fluvial.

Esta facies agrupa gravas y arenas silíceas, de tamaño de grano grueso a muy grueso, en matriz limosa.

El espesor de este nivel es variable según zonas, tal y como ha podido constatarse en las investigaciones realizadas. De este modo se han detectado desde valores del orden de 5-6 m en las columnas de algunos sondeos hasta no haber sido interceptado durante la perforación de otros.

Depósitos arcillosos (Qa)

Se trata de sedimentos de naturaleza fundamentalmente arcillosa que aparece entre 15 y 25 m de profundidad. Frecuentemente se localizan bajo sedimentos aluviales arenosos o directamente bajo los depósitos actuales o subactuales de limos y fangos.

Depósitos aluviales fundamentalmente arenosos (Qs)

Está constituida por espesores de hasta 20 m de arenas de tamaño de grano fino a muy fino y un contenido en fracción limosa en general inferior al 20%. Se trata de material granular fino bien gradado, de coloraciones que varían desde el gris claro hasta beis claro.

Depósitos actuales y subactuales de limos y fangos (Qm)

Estos materiales conforman el relleno actual de la ría del Odiel. El espesor de los mismos es variable pero, tal y como se ha reconocido en la columna de los sondeos, inferior a los 10 m de potencia, se trata de limos orgánicos de colores oscuros y de consistencia muy blanda de muy elevado contenido en agua.

Terrazas fluvio-marinas (Qt).

Son depósitos granulares de variada granulometría, predominando las fracciones más gruesas (gravas, cantos) originados como consecuencia del encajamiento de la red fluvial.

Únicamente han sido detectados en las investigaciones realizadas en la zona final del trazado, en la margen derecha de la Ría de Punta Umbría, recubiertos por un pequeño espesor, en torno a 2-3 m, de arenas eólicas.

Arenas eólicas (Qe).

Es una formación de arenas blancas silíceas de tamaño de grano medio a fino, mal gradadas y con un bajo contenido en finos.

Este conjunto alcanza un amplio desarrollo horizontal en la parte final del trazado, constituyendo una extensa franja de unos 2,5 km de anchura máxima y escaso espesor (2-3 m), entre la ría de Punta Umbría y El Rompido.

Hidrogeología

Las formaciones dominantes desde el punto de vista hidrogeológico son someras y están compuestas fundamentalmente por arenas y gravas. Poseen una apreciable superficie de absorción y elevada porosidad, encontrándose justo encima de las margas impermeables, apareciendo agua con gran facilidad sobre todo en los niveles arenosos neógenos.

Los materiales existentes en las zonas de marisma (la más extendida en la zona de actuación) pueden considerarse sin embargo de baja permeabilidad. Esta característica, junto a su morfología ligeramente cóncava, hace de estos depósitos unos terrenos pobremente drenados, ocupados temporal o permanentemente por las

aguas, originando zonas encharcadas.

Además de la capa freática superficial, pueden existir otras en profundidad, debidas a acuíferos cautivos en niveles permeables por porosidad intergranular.

Formaciones geotécnicas consideradas

Se han diferenciado las siguientes formaciones geotécnicas:

Rellenos compactados (Rc). Formación de edad cuaternaria constituida por materiales de naturaleza muy variada perteneciente a viarios, zona industrial y urbanización. Se trata fundamentalmente de gravas y gravillas redondeadas marrones en matriz arenosa y arenas medias-gruesas con bastantes cantos. En ambos casos se han estimado contenidos variables de finos que van desde indicios hasta bastante.

Rellenos tipo vertedero (Rv). Formación de edad cuaternaria constituida por materiales de vertido procedentes de la actividad industrial próxima a la zona de proyecto. Entre otros materiales, existen vertidos de fosfoyesos y cenizas de pirita, que presentan espesores de entre 3 m y 10 m. Se trata de materiales de consistencia muy blanda cuyo tratamiento se enmarca en los de gestión de vertidos industriales.

Arenas eólicas (Qe). Formación de edad cuaternaria constituida por arenas finas con pequeños contenidos de gravas y finos. Está formada por arenas blancas silíceas de tamaño de grano medio a fino, mal graduadas y con un bajo contenido en finos, de carácter predominantemente granular no plástico. Presenta intercalaciones de niveles en los que las arenas aparecen mezcladas con gravas.

Fangos grises (Qm). Formación de edad cuaternaria constituida por arcillas limosas grises de baja plasticidad (CL) que adquieren una tonalidad ocre

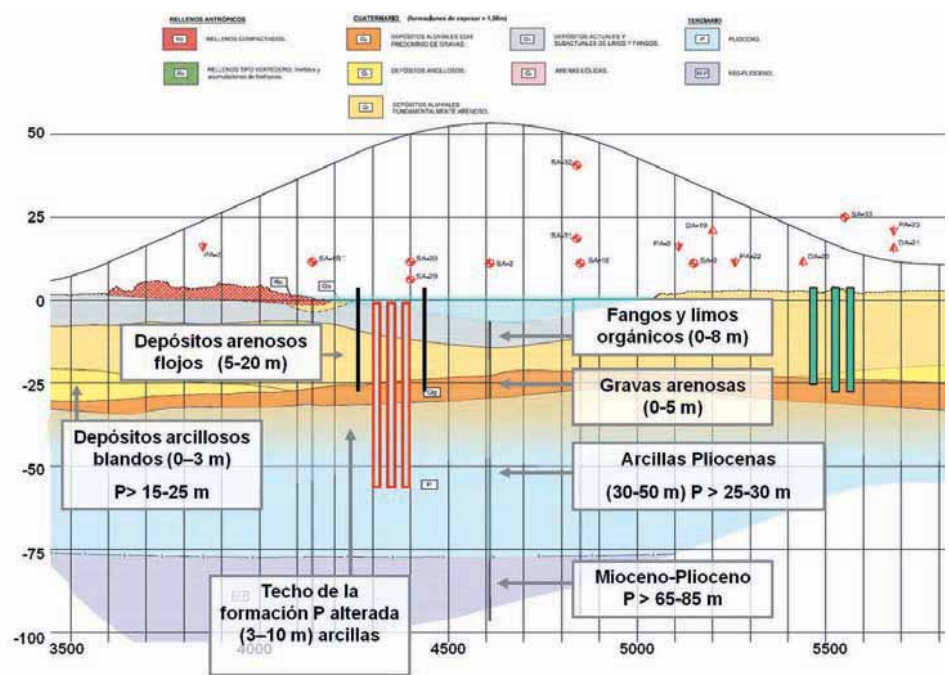


Figura 13. Detalle del perfil geotécnico en la zona del cruce del río Odiel.

con la profundidad. Se caracterizan principalmente por su alto contenido en finos arcillosos y su elevado contenido en materia orgánica. Presentan una consistencia muy blanda.

Arenas medias-finas(Qs). Formación de edad cuaternaria constituida por arenas medias-finas y contenidos variables de finos arcillosos y gravas. Estos materiales se clasifican según el sistema USCS como SP-SM, es decir, como arenas mal graduadas y arenas limosas. La compactidad típica es de medianamente densa a densa.

Arcillas limosas grises(Qa). Formación de edad cuaternaria constituida por arcillas limosas grises de consistencia blanda a muy blanda que se disponen bajo el nivel de arenas medias finas. Se trata de materiales cohesivos de plasticidad media que se clasifican según el sistema USCS como CL y CH, arcillas de baja plasticidad o de alta plasticidad según las muestras ensayadas.

Gravas medias-finas(Qg). Bajo los niveles de arenas medias-finas (Qs) y de las arcillas limosas grises (Qa), se han encontrado materiales de edad cuaternaria formados por gravas y arenas silíceas, de tamaño de grano grueso a muy grueso en matriz limosa. Se encuadran dentro de la denominada formación Qg-gravas medias-finas.

Tienen un carácter predominantemente granular y presentan una compactidad densa a muy densa.

Los materiales de esta formación se han clasificado según el sistema USCS como GW-GM, correspondiente a gravas bien graduadas y gravas limosas.

Arcillas limosas carbonatadas (P). Formación del Plioceno medio constituida por arcillas limosas y limos arcillosos con tonos gris azulado con contenidos variables de arenas finas. Se trata de suelos cohesivos con, en general, altos contenidos de finos. Presentan una consistencia firme a dura. Los materiales de esta formación se clasifican según el sistema USCS como CL, CH y ML, es decir como arcillas de baja a alta plasticidad y limos de baja plasticidad, respectivamente, con grado de expansividad relativamente bajo.

Para la caracterización geotécnica del terreno se ha partido de información existente y de los trabajos de campo realizados. La investigación geotécnica está integrada por sondeos (hasta 108 m de profundidad en algún caso), calicatas, ensayos de penetración dinámica (DPSH), ensayos de penetración estática, con ensayos de disipación de presión de poros (CPTU), ensayos de deformabilidad

in situ (presiómetros) y ensayos de laboratorio. Esto ha permitido caracterizar geotécnicamente las distintas formaciones diferenciadas que previsiblemente se verán afectadas durante el desarrollo de la obra.

A partir del análisis de resultados algunos de los parámetros característicos de la formación son los que se indican en la *tabla 1* (página 39).

Condicionantes especiales para el diseño de la cimentación

Genéricamente, para la definición de las tipologías de cimentación más adecuadas para este proyecto, se han tenido en cuenta, entre otros, los siguientes aspectos:

Esquema geológico y características geotécnicas

Se trata de suelos muy finos, sumergidos y saturados, con algún nivel más arenoso en los primeros metros y de naturaleza fundamentalmente arcillo-limosa, de compacidad floja y consistencia blanda hasta profundidades muy elevadas (> 40 m) lo que se traduce en baja resistencia al corte, creciente gradualmente hasta grandes profundidades (> 60 m), lo que plantea problemáticas derivadas de su naturaleza, tanto por capacidad de carga como por posibles asentos, instantáneos y diferidos por consolidación.

Agresividad del medio

Tanto la naturaleza de las aguas del río Odiel como del río Tinto a lo largo del cauce y la intensa actividad minera e industrial de sus cauces y la actividad química en esta zona de Huelva ha favorecido que el agua en el estuario del Odiel, presente valores de PH que suele ser ácido, con valores que son, con frecuencia inferiores a 6, lo que se debe tener en cuenta en los hormigones en contacto con el terreno y el agua del medio, y en el tipo de cemento, dosificaciones, aditivos, así como el control de fisuración con las cuantías necesarias y protecciones complementarias para garantizar la durabilidad a lo largo de la vida útil de la infraestructura.

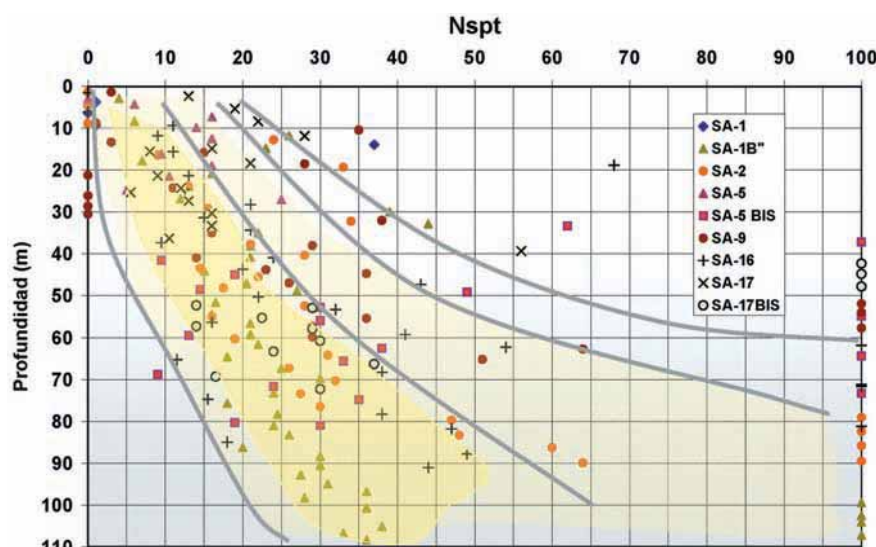


Figura 14. Variación de Nspt con la profundidad.

Se considera, de forma simplificada, un ambiente muy agresivo (ataque fuerte Qc) para la zona de la Marisma del Pinar y bastante agresivo (ataque medio Qb) para el resto de la obra hasta Punta Umbría.

Sismicidad y riesgo de licuefacción

La zona presenta un grado de sismicidad relativamente apreciable dentro del territorio peninsular, correspondiendo, de acuerdo con el Mapa de Peligrosidad Sísmica de la Norma de Construcción Sismorresistente NCSP-07, al Término Municipal de Huelva una aceleración sísmica básica de 0,10 "g" y un valor del coeficiente de contribución de la Falla Azores – Gibraltar de $K = 1,3$.

Para este tipo de construcciones, clasificadas de importancia especial, se obtiene una aceleración de cálculo de $a_c = 0,21$ "g" que incluye el efecto de amplificación del suelo.

Desde ese punto de vista, además de la consideración de la aceleración como acción sísmica como hipótesis de cálculo estructural, ha sido necesario realizar un estudio específico de riesgo de licuefacción. En particular, las formaciones saturadas de más baja resistencia al corte, hasta los 10-15 m de profundidad, podrían ser susceptibles de presentar riesgos de licuefacción para determinadas aceleraciones sísmicas si la magnitud supera el umbral crítico, con el consiguiente riesgo de pérdida de

resistencia por fuste y de confinamiento lateral en los tramos superiores de los pilotes.

Para analizar este aspecto se ha considerado la relación de la tensión de corte cíclica CSR (*cyclic shear stress ratio*) combinado con la intensidad de sismo, de acuerdo con los criterios de Seed e Idriss (1971).

Acciones y requisitos de la estructura

La estructura exige una limitación de asentos <5 cm para el puente principal y distorsiones angulares inferiores a 1/1 000. Para los tramos isostáticos de luces más cortas, entre 25 a 30 m, se limita el asiento máximo a 3 cm, por criterios no ya estructurales sino funcionales.

A efectos de desplazamiento horizontal el comportamiento del conjunto se evalúa con un modelo estructural de interacción suelo-estructura que, para las tipologías adoptadas, en general no resulta limitativo en el diseño.

Criterios de accesibilidad de equipos y maquinaria

El escaso calado en las márgenes de los cauces y en la zona de marisma, unido a una significativa carrera de marea (3,70 m), además de los criterios ambientales, plantea dificultades para el acceso a los emplazamientos de los encepados, lo que, unido a la dificultad de disponer de materiales adecuados para la formación de penínsulas provisiona-

les, se prevé resolver mediante plataformas metálicas apoyadas en pilote hincado recuperable y configuración de recintos temporales (islas) en los apoyos del cauce mediante tablestacados recuperables.

Antecedentes de cimentaciones en la zona

Por las desfavorables condiciones que ofrece el medio en este sector de Huelva son numerosas las obras marítimas que han empleado en su construcción pilotes de tipologías muy diversas, desde pilotes perforados con camisa perdida, hasta hincados prefabricados de hormigón o metálicos con o sin azuche en punta, o más convencionales con entubación recuperable. Ejemplos de estas actuaciones son el puente sobre el río Tinto hacia Matalascañas, el puente sobre el estero del Burro Grande, o los numerosos pantalanos asociados al Polo Industrial de la margen izquierda del Odiel.

Protecciones ambientales

La intensa protección medioambiental que caracteriza el ámbito de actuación, constituyendo el mayor complejo de marismas mareales del litoral andaluz, supone un condicionante de primera magnitud para la definición no sólo de la tipología de cimentación más adecuada a este requerimiento, sino de los equipos y medios auxiliares para llevarla a cabo.

Como se ha señalado con anterioridad, gran parte de este área está declarado como Paraje Natural, Lugar de Interés Comunitario (pertenece a la Red Natura 2000) y Reserva de la Biosfera.

Disposiciones de Normativa y reglamentarias

Además de las recomendaciones de ámbito europeo, recogido en EUROCODIGOS, y otros documentos de referencias técnicas, se han considerado las siguientes:

- Guía de Cimentaciones en Obras

de Carretera. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. Madrid 2004.

- ROM 0.5-95 Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias. Ministerio de Fomento. Puertos del Estado. Madrid 2005.

- CTE – Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-C Seguridad Estructural – Cimentaciones. Ministerio de Fomento. Dirección General de la Vivienda, la Arquitectura y el Urbanismo. Madrid 2006.

- Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP). Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. Madrid 1998.

- Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. Madrid 2006.

- NCSP-07 “Norma de construcción sismorresistente: puentes” Real

FORMACIÓN	NSPT TÍPICO	DENSIDAD APARENTE γ_{ap} (kN/m ³)	LÍMITE LÍQUIDO LL %	ÍNDICE DE PLASTICIDAD IP %	ÁNGULO DE ROZAM. INTERNO EFFECTIVO ϕ	COHESIÓN EFFECTIVA C (kPa)	COEF. DE POISSON ν	MÓDULO PRESIÓM. E_p (MPa)
Rellenos								
Compactados Rc	5-15	19	–	–	28	15	0,32	20,0
Rellenos tipo vertedero Rv	2-5	17	–	–	5-35 (20)	5-15 (10)	0,35	1,9
Arenas eólicas Qe	10-14 (12)	19	NP	NP	30	0	0,32	16,0
Fangos					7-32	0-14		
grises Qm	<5	18	25-30	20-25	(15)	(5)	0,35	1,4
Arenas medias - grises Qs	1-40 (16)	20	NP	NP	32	5	0,31	27,0
Arcillas limosas grises Qa	0-15 (7)	19	25-55 (40)	6-30	27	15	0,33	15,0
Gravas medias - finas Qg	15-R (53)	21		NP	35	5	0,31	35,0
Arcillas limosas carbonatadas (Arenas de Huelva) P hasta cotas 60-65)	20-R (35)	20	25-60	15-25	15-32 (23)	45-150 (100)	0,30	25,0
Arcillas limosas carbonatadas (Arcillas de Gibratón) P (cotas inferiores a 60-65m)	25-R (50)	20	25-60	15-25	15-35 (25)	45-150 (120)	0,30	39,0

TABLA 1. Algunos parámetros característicos de las formaciones identificadas.

decreto 637/2007 de 18 de mayo de 2007 BOE 2/07/2007.

Tipologías de cimentación y tratamientos de mejora del terreno considerados

Desde el punto de vista de la continuidad física de la infraestructura por condicionantes geotécnicos se pueden identificar cinco subtramos agrupados por presentar problemáticas similares:

- Subtramo 1: desde el inicio de la actuación hasta la Punta del Sebo, atravesando las Marismas del Pinar.

Los terrenos de apoyo de los rellenos son de naturaleza diversa, variando entre vertidos, rellenos compactados, fangos, arcillas grises, gravas, depósitos eólicos, etc., una zona llana caracterizada por una explanación moderada y terraplenes de pequeña altura y taludes suaves.

La presencia de niveles en superficie de baja capacidad portante es la principal dificultad que se ha detectado en el entorno en estudio para el proyecto de terraplenes.

Se ha establecido un criterio de diseño de terraplenes que ha limitado su altura a no superar en general 3 m para que la presión transmitida al terreno sea compatible con su capacidad de carga y deformabilidad. En los casos en los que no ha podido respetarse esta limitación geométrica o que el apoyo de los rellenos se ha previsto especialmente complicado, se ha considerado la disposición de tratamientos de refuerzo y mejora del terreno de apoyo, entre los que cabe señalar columnas de grava, columnas de mortero con desplazamiento, *jet-grouting*, pilotes hincados (prefabricados de hormigón armado o de eucalipto), así como el empleo de mechas drenantes y geosintéticos con función drenante, de filtro y de refuerzo en la base de los terraplenes.

- Subtramo 2: el cruce de la ría del Odiel, que por su singularidad constructiva -puente atirantado-, ejecución de obras en el cauce de la ría del Odiel, con calados relativamente limi-



Figura 15. Equipos de pilotes sobre pontona para ampliación de pantalanés.

tados lo que condicionará las obras auxiliares para el emplazamiento de equipos especiales de cimentación. En este tramo se disponen los apoyos de mayor carga del puente lo que exigirá la formación de islas artificiales para la construcción de las cimentaciones que reciben mayor carga.

En la zona de ubicación de los apoyos del puente la potencia de suelos cuaternarios llega a superar 35 m, con un nivel superficial de rellenos antrópicos de unos 3 m y de fangos entre 6 a 8 m.

El diseño considera que las cargas de la cimentación del viaducto se deben transmitir en profundidad superando los niveles blandos y de arenas flojas más superficiales (susceptibles de licuefacción) hasta alcanzar las formaciones menos deformables de las arcillas grises pliocenas (P).

La solución de cimentación contemplada es de pilotes de extracción de 2,0 m de diámetro, con disposición de una camisa de acero perdida, y al amparo de una entubación recuperable, tipo "morsa", y de lodo bentonítico en los siguientes metros. La longitud es del orden de 60 m, lo que supone una esbeltez de 30. Se considera que la forma de trabajo será fundamentalmente por fuste para limitar asentos. La tensión de trabajo se prevé relativamente reducida, 4 MPa, no resultando limitativa del diseño, por las desfavorables condiciones del terreno.

En este caso los valores de resistencia unitaria considerada por fuste varían entre 14 kPa para los niveles de arcillas limosas grises cuaternarias hasta 85 kPa para los niveles de arcillas limosas grises del plioceno. Para el proyecto se ha optado por considerar factores de seguridad 3, tanto para fuste como para punta.

Se prevé el control de integridad mediante la disposición de tubos para ensayos de transparencia ultrasónica (*cross-hole*) y adicionalmente, para los pilotes de mayor diámetro se ha previsto la realización de prueba carga estática con célula bidireccional del tipo *Osterberg*. Esta tecnología ha sido aplicada con éxito, entre otras obras recientes, en el puente del Tercer Milenio y en el Pabellón Puente de la Expo'08 de Zaragoza.

- Subtramo 3: el paso a través de la Isla de Saltés, dentro del Paraje Natural de las Marismas del Odiel, donde se conjugan las dificultades geotécnicas propias de un terreno de marisma con un entorno de alta sensibilidad medioambiental. En los tramos de estructura del paso a través de la isla de Saltés se prevé la hinca de pilotes prefabricados, que presenten la posibilidad de realizar un seguimiento y análisis dinámico de la hinca (P.D.A.), lo que permite comprobar la resistencia del terreno y la capacidad portante del pilote mediante el parámetro básico del rechazo, de-

finido como la longitud de avance de la hincada de un pilote en cada golpe frente a unas condiciones geológico-geotécnicas preestablecidas.

- **Subtramo 4: el cruce de la ría de Punta Umbría**, de similares circunstancias al cruce sobre la ría del Odiel aunque de menor envergadura, se prevé la cimentación profunda mediante encepados de pilotes de 1,0 a 1,5 m de diámetro y longitudes en el rango de 40-50 m.

- **Subtramo 5: Tramo final, ya en la península de Punta Umbría**, sobre terrenos de mejor calidad geotécnica, al constituir una barra litoral, lo que permitirá soluciones de relleno y cimentación con menor necesidad de disponer tratamientos especiales.

Resumen y conclusiones

El proyecto de una Conexión Sur Metropolitana de Huelva, se concibe como una solución que permitirá la redistribución de los intensos flujos de tráfico que actualmente soportan los puentes sobre la Ría del Odiel, canalizando los movimientos entre la capital y las poblaciones del litoral oeste de Huelva (Punta Umbría, El Portil, El Rompido y Cartaya).

Durante el estudio de soluciones de la Conexión Sur Metropolitana de Huelva se han planteado diversas alternativas que contemplan desde soluciones de conexión por el norte, hasta soluciones con trazado soterrado, siendo finalmente descartadas por cuestiones de funcionalidad o de viabilidad constructiva.

Genéricamente, para la definición de las tipologías de cimentación más adecuadas para este proyecto se han tenido en cuenta las desfavorables condiciones geotécnicas de terreno con importantes espesores de suelos blandos saturados, de baja resistencia y alta deformabilidad, la agresividad del medio con valores de PH ácido, la sismicidad y el riesgo de lixiviación potencial de los niveles arenosos más superficiales, las posibilidades de accesibilidad de equipos, y las limitaciones de movimientos que

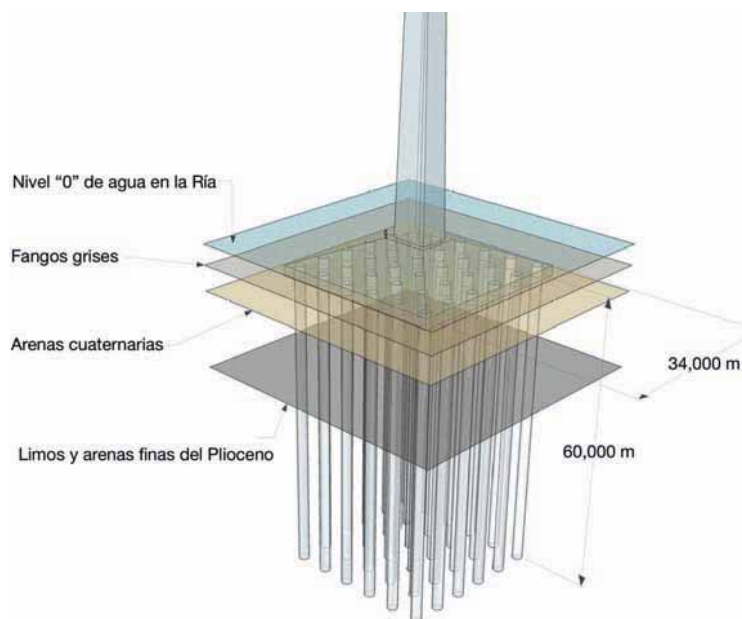


Figura 16. Modelo 3D geométrico de la cimentación del puente principal.



Figura 17. Puente sobre el Estero del Burro Grande.

imponen la propia estructura.

De forma muy especial se ha tenido en cuenta la intensa protección medioambiental que caracteriza el ámbito de actuación, constituyendo el mayor complejo de marismas marales del litoral andaluz.

El diseño de las cimentaciones del Nuevo Puente sobre la ría del Odiel en Punta Umbría y de las obras auxiliares y de acompañamiento, supone un reto que requiere la disposición de datos del terreno de la mayor fiabilidad para una caracterización precisa de su comportamiento tenso-deformacional, un análisis de cálculo riguroso mediante procedimientos y programas numéricos que permitan cuantificar el comportamiento del conjunto estructura-cimentación, tanto a corto como a lar-

go plazo, para distintas hipótesis de acciones, una ejecución de obra muy cuidada y exigente, y, finalmente, sistemas y dispositivos de auscultación y control adecuados para la verificación de la idoneidad del proyecto, en consonancia con la singularidad de la infraestructura y del medio natural en el que se enmarca.

Agradecimientos

Finalmente, los autores desean expresar su agradecimiento a la Dirección General de Infraestructuras Vías la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía y a la Gestión de Infraestructuras de Andalucía, S.A. (GIASA), por la confianza depositada para la presentación de este artículo. ■