



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



Estudio de Soluciones para la Ampliación del Puerto de Altea (Alicante). Obras de Abrigo y Ordenación Interior.

ANEXO VI:

Estudio Geológico y Geotécnico

Índice:

1. OBJETO.....	3
2. CONDICIONES GEOLÓGICAS E HIDROLÓGICAS	3
2.1 Marco geológico general	3
2.1.1 Geología regional	3
2.1.2 Geología local.....	6
2.2 Hidrología.....	7
2.3 Tectónica	8
2.4 Sismicidad	9
3. DESCRIPCIÓN DEL TERRENO	10
3.1 Propiedades generales de la zona	10
3.2 Características litológicas de la zona	10
3.3 Características geomorfológicas de la zona	11
3.4 Características hidrológicas de la zona	11
3.5 Características geotécnicas de la zona	12
4. CÁLCULO DE LOS ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS	13
5. CONCLUSIONES	17
6. REFERENCIAS	18
7. APÉNDICE	18

Índice de figuras:

Figura 1. Mapa Geológico de España.....	4
Figura 2. Leyenda del Mapa Geológico de España	5
Figura 3. Mapa de riesgo de sismos.....	9
Figura 4. Batimetría puerto deportivo de Altea	11
Figura 5. Sección transversal dique de abrigo	13

1. Objeto

El objetivo de realizar el Estudio Geológico y Geotécnico es definir las características geológicas y geotécnicas de la zona, así como garantizar que las nuevas obras de abrigo a ejecutar para la ampliación del puerto deportivo cumplan el estado límite último de hundimiento.

Para su redacción, se tomarán como referencia los mapas geológicos y geotécnicos elaborados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Además, para la realización de los cálculos de fallo por hundimiento se van a seguir la “ROM 0.5-05: Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias”.

Al no contar con ningún estudio geotécnico de la zona, se ha recopilado la información suficiente como para comprender la realidad geológica y geotécnica del área y se han establecido unas hipótesis y parámetros del terreno aproximados que permitan la elaboración de los cálculos pertinentes desde el lado de la seguridad.

2. Condiciones geológicas e hidrológicas

2.1 Marco geológico general

Para llevar a cabo el estudio geológico general de la zona se ha utilizado la Hoja 848-Benidorm, del Mapa Geológico de España, publicada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) a escala 1:50.000.

La zona de estudio se encuentra en la fachada oriental de la Península Ibérica. Forma parte del extremo noreste de los Sistemas Béticos, por esta razón, el territorio presenta un perfil rocoso con un relieve muy accidentado y con grandes desniveles. Esto es debido a que, a pocos kilómetros de la costa, en el norte del puerto deportivo, se encuentra la Serra de Bèrnia i Ferrer, con alturas superiores a los 1000 metros, además de los picos de Puig Campana y Monte Ponoch.

2.1.1 Geología regional

Si se observa el mapa geológico, véase la Figura 1, la zona del puerto deportivo de Altea se ve afectada por cinco tipos de materiales diferentes, los cuales se describirán en el siguiente apartado:

- ⇒ Terrazas. Gravas con matriz arcillosa (38)
- ⇒ Depósitos masivos (terrazas). Gravas y arenas cementadas (40)
- ⇒ Playas. Arenas y conchas sueltas. Gravas sueltas (43)
- ⇒ Coluviones. Cantos con matriz limo-arcillosa (46)
- ⇒ Fondo de valle. Arcillas y limos con cantos (50)

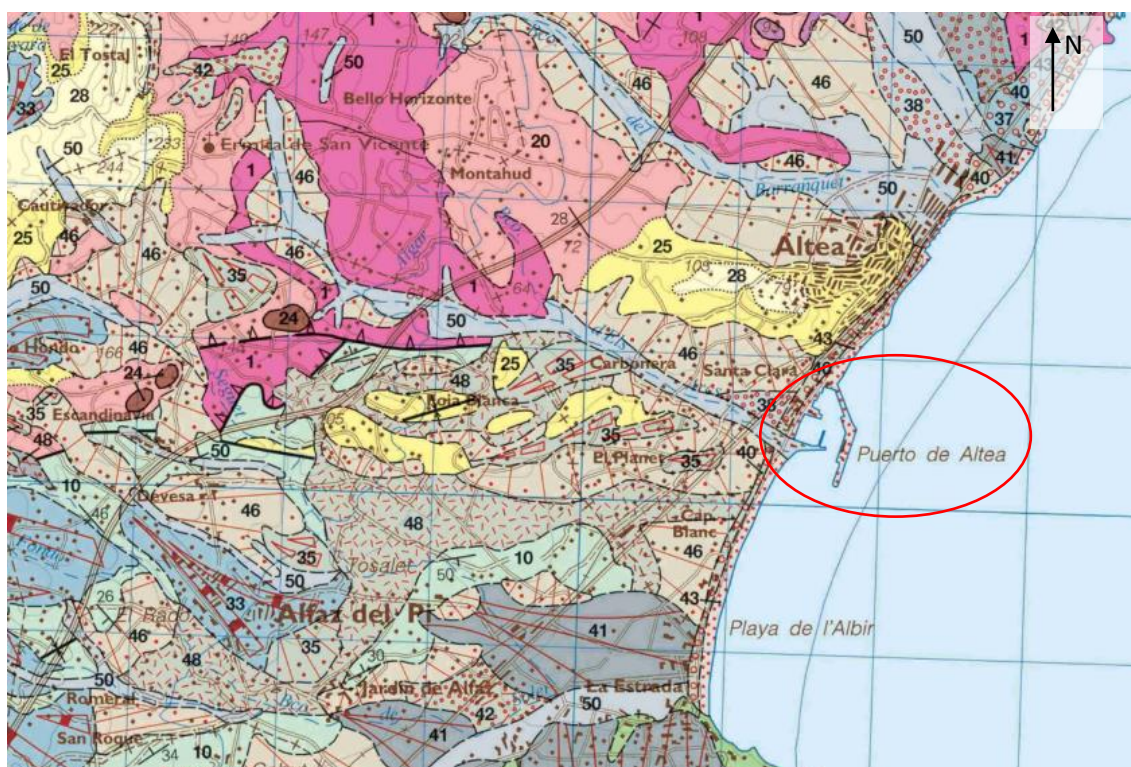


Figura 1. Mapa Geológico de España. (Fuente: www.igme.es)

La región de Altea está enmarcada geológicamente en el sector oriental del Prebético. Los materiales representados poseen una edad comprendida entre el Triásico (era Secundaria) y el Mioceno superior y Plioceno (era Terciaria), además de los depósitos cuaternarios que rellenan los cauces fluviales y el fondo marino cercano a la costa.

Durante la era Secundaria los sedimentos marinos fueron los más abundantes y estaban formados principalmente por calizas dolomíticas y margosas, margas y areniscas. En los sedimentos continentales predominan las arcillas asociadas a depósitos de yeso y sal, los conglomerados y las areniscas. Dentro de esta era se encuentra el periodo Triásico cuyos materiales más característicos son las areniscas de color rojo, las calizas conchíferas y las margas con arcillas, yesos y sales.

Durante la era Terciaria los materiales más característicos fueron rocas en vías de consolidación (arcillas, arenas, gravas), calizas, areniscas y conglomerados. Dentro de esta era se encuentran diferentes periodos, entre ellos el Mioceno y el Plioceno. En el Mioceno los materiales característicos son margas y arcillas coronadas por calizas y sobre una base de conglomerados. Los sedimentos de edad Mioceno inferior están escasamente representados en la hoja de Benidorm, con afloramientos dispersos y recubrimientos cuaternarios importantes. En el Plioceno tuvo lugar un sensible cambio del clima. Los materiales geológicos son semejantes a los del periodo anterior.

Este periodo, en la zona de Altea, es de difícil estudio debido a las resedimentaciones, es decir, la masa principal de sedimentos procede de otros anteriores. Son muy frecuente en toda la serie terciaria los fósiles resedimentados en materiales de edad posterior.

Por último, durante la era Cuaternaria predominan, entre otros, las llamadas terrazas fluviales. Estas son aluviones que se depositan en forma escalonada a ambos lados del cauce de un río y, posteriormente, sufren un proceso de erosión.

Por otra parte, cabe destacar la presencia de dos fallas con dirección este-oeste, que se nombrarán más adelante.

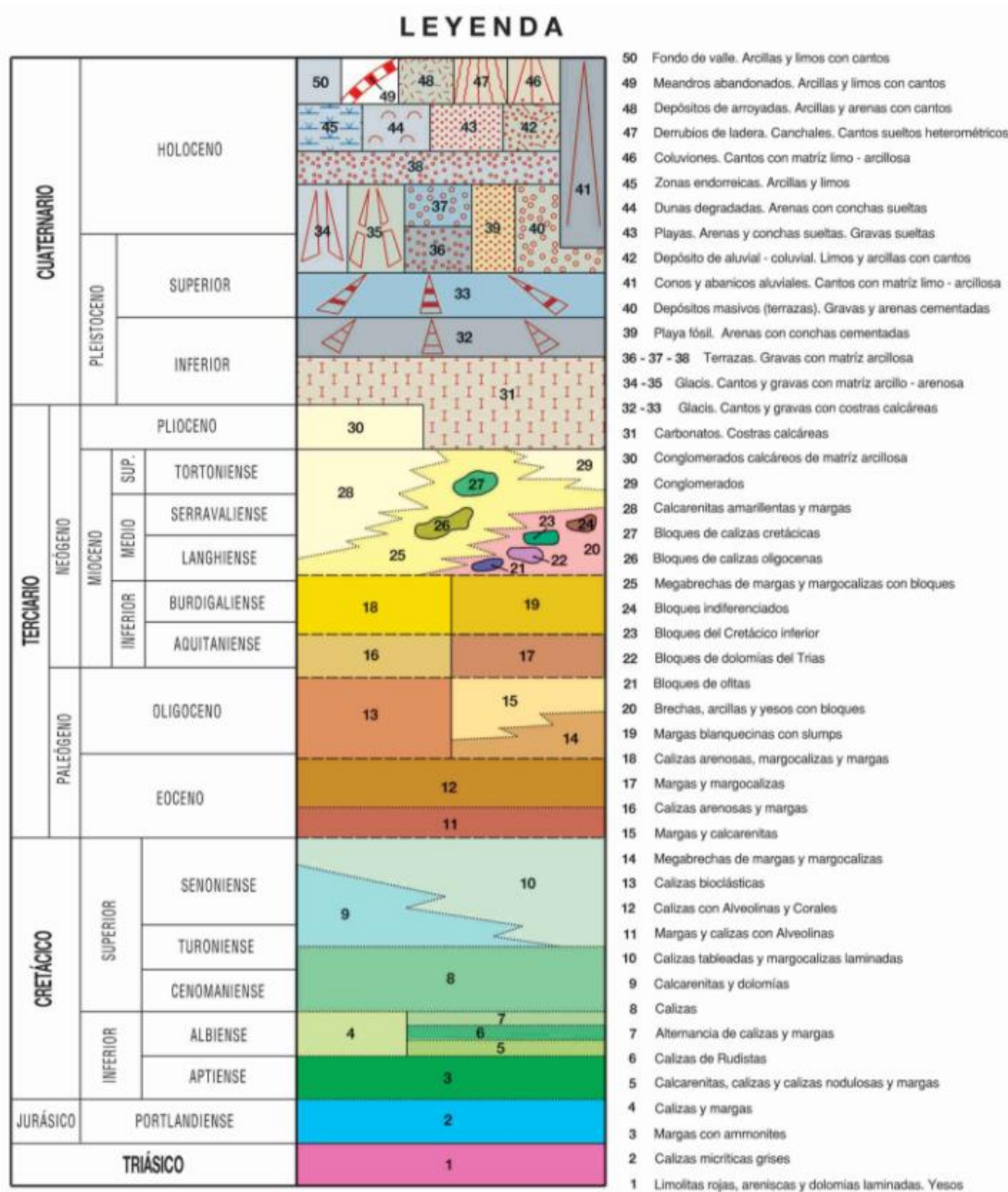


Figura 2. Leyenda del Mapa Geológico de España. (Fuente: www.igme.es)

2.1.2 Geología local

Las principales características de los materiales presentes en la zona de estudio son las siguientes:

⇒ Terrazas. Gravas con matriz arcillosa (38)

Este material pertenece al periodo Pleistoceno superior-Holoceno, representado por materiales del Cuaternario. Estos materiales son de escaso desarrollo. Este tipo de formaciones superficiales se ubican en los valles de los Ríos Algar y Guadalest.

Se ha diferenciado un sistema de terrazas de 3 niveles, constituidos por 2-3 metros de gravas imbricadas de calizas, subredondeadas con centil 15-20 cm y moda de 3-5 cm, con matriz limo-arcillosa de color beige a rojizo.

Destaca la mezcla de depósito de terraza de origen continental con depósito de terraza de origen marino en la desembocadura del río Algar en la parte centro-oriental de la costa.

⇒ Depósitos masivos (terrazas). Gravas y arenas cementadas (40)

Este tipo de depósitos pertenecen al Pleistoceno superior-Holoceno. Se encuentran bien representados en la playa de l'Olla al norte de Altea, donde se ha podido diferenciar dos niveles: uno de 1 m aproximadamente compuesto de canos homogéneos de caliza de 5-8 cm de media, matriz biocalcareníta y cemento carbonatado y, otro situado debajo del anterior de las mismas características, pero con menos restos de fauna marina, esto es, con matriz más arenítica y cemento asimismo carbonatado.

⇒ Playas. Arenas y conchas sueltas. Gravas sueltas (43)

Estos depósitos de origen marino se extienden a lo largo de toda la costa, destacando por su longitud y amplitud, las de Poniente y Levante en Benidorm, las del Albir y Altea y la playa de la Fosa, en Calpe. Pertenecen al Holoceno.

Desde el punto de vista litológico se diferencian 2 tipos de playas:

- Arenosas: caracterizadas por la acumulación de arenas de grano muy fino con restos de conchas.
- De gravas: en cuya formación intervienen gravas y cantos con morfologías planares, arenas y restos de fauna marina.

Se han localizado asimismo en la cala de los Basetos y en el pueblo de Calpe afloramientos de arenas y restos de conchas cementados, pertenecientes a antiguas playas emergidas actualmente con respecto al nivel del mar.

Morfológicamente se ha podido diferenciar una pequeña zona cerrando posteriormente la cala de Morales, en el Cuadrante SO de la hoja, con las mismas características litológicas que las playas arenosas, pero con un suave relieve, por lo que se cartografió como restos de dunas, fuertemente degradados por la intensa presión antrópica a que están sometidas.

⇒ Coluviones. Cantos con matriz limo-arcillosa (46)

Estos depósitos se componen de cantos angulosos, dispuestos caóticamente, y englobados en una matriz arcilloso-arenosa.

Se localizan en las laderas de los principales relieves del área: Monte Ponoch, y Sierra de Bernia, y asociados a los relieves invertidos de los depósitos de glaciares, participando de las características litológicas de los mismos.

El espesor de los coluviones puede llegar a los 3 m. se les asigna una edad Holoceno.

⇒ Fondo de valle. Arcillas y limos con cantos (50)

Esta unidad cartográfica engloba tanto a los sedimentos de cauces activos (Algar, Guadalest) como a los tramos de cauces abandonados, así como a los rellenos de los valles de fondo plano, situados en el ámbito de la Hoja, y con dinámica de aportes mixto entre aluvial y de laderas.

El aluvial de los ríos Algar y Guadalest está formado por gravas y cantos bien redondeados, arenas y arcillas, mientras que los rellenos de los valles son depósitos de limos y arcillas de tonos paraos que engloban cantos de calizas y areniscas, con organización interna.

En conclusión, por ser una zona litoral, los materiales están expuestos a una gran agitación dinámica debida a la acción del oleaje, lo que provoca que bajo del mar se encuentren arenas muy finas, removidas y mal graduadas. No obstante, bajo esta capa, cuyo espesor se desconoce, puede ser que se encuentren megabrechas de margas y margocalizas con bloques.

Por otra parte, la zona carece de sondeos marinos o cualquier otro ensayo que pueda proporcionar a ciencia cierta cuál es el material subyacente.

Asimismo, es muy probable que en el fondo marino a muy poca profundidad se encuentre roca, si se observan las trayectorias de los materiales. El cálculo de Estado Límites Últimos se hará para el material más blando para estar del lado de la seguridad, es decir, para las Megabrechas de margas y margocalizas con bloques.

2.2 Hidrología

Las características hidrológicas de la zona de estudio referente al puerto deportivo de Altea se han obtenido de la memoria anexa a la Hoja 73 del Mapa Hidrogeológico de España elaborada por el Instituto Geológico y Minero de España.

El sector Serra de Bèrnia-Punta de l'Albir comprende una serie de barrancos y cauces de muy diferente entidad que desembocan en este tramo de costa, la bahía de Altea, limitado por los destacados relieves de la Serra de Bèrnia-Morro de Toix al norte y la Serra Gelada-Penyas de l'Albir al sur. El principal curso fluvial es el río Algar que, con una cuenca de más de 200 km², es el río más caudaloso que desemboca en la costa alicantina después del río Segura, gracias a los

aportes de importantes manantiales alimentados por los acuíferos de la Serra de Bèrnia-Ferrer-Xortà y por el acuífero norte de Aitana. La existencia de importantes relieves calizos y bandas margosas impermeables en la base determina la geomorfología y la hidrología del área.

Cabe resaltar las aportaciones del importante manantial cárstico de las fuentes de l'Algar, situado a la entrada del estrecho que corta las calizas eocenas en el extremo occidental de la Serra de Bèrnia.

El aporte sedimentario está determinado por las elevadas pendientes de los afluentes procedentes de los macizos calcáreos, la existencia de estrechos o congostos como los del río Algar y Bolulla y la fácil excavación de niveles blandos en el curso bajo. Como consecuencia, las terrazas fluviales del río en su tramo bajo muestran paquetes de gravas y cantos calizos con abundante matriz limoarenosa.

Desde su confluencia con el río Guadalest hasta el mar, el lecho del río se caracteriza por la sobrecarga sedimentaria de materiales gruesos y por la formación de barras de bloques, cantos y gravas fluviales que conforman un característico río con barras centrales y laterales. Las gravas son de textura media y gruesa, incluyendo bloques de diámetro mayor a 30 cm. El río discurre a lo largo de todo el tramo confinado entre terrazas fluviales con bandas inundables en sus márgenes. Los ambientes inundables incluyen las zonas de migración reciente del cauce y las terrazas más bajas.

Esto explica por qué en los estratos superiores de la zona de estudio se halla una gran cantidad de material sedimentario, compuesto por arenas y gravas, así como la formación de terrazas.

2.3 Tectónica

La hoja de Benidorm (30-33) está situada en el extremo nor-oriental de las Cordilleras Béticas, en el dominio del Prebético Interno.

Las Cordilleras Béticas constituyen la parte más occidental de la Cadena Alpina Mediterránea. Forman los relieves meridionales de la Península Ibérica, alineados en dirección ENE-OSO, y sus estructuras se continúan por el mar hasta las Islas Baleares, al ENE y por la Cordillera Rifeña, en África al Sur, por medio de un acusado giro en la zona del Estrecho de Gibraltar. Su límite septentrional lo constituye la Cuenca del Guadalquivir en el sector oeste, la Meseta y su cobertera tabular en la parte central, y el extremo SE de la Cordillera Ibérica en la zona oriental.

Generalmente se admite que el conjunto orogénico bético-balear y los relieves norteafricanos rifeños tienen un origen común debido a la colisión y movimientos relativos de la Placa Ibérica, la Placa Africana y una pequeña placa intermedia, la Placa de Alborán, que se introduce como una cuña entre ambas. Según este esquema, las zonas Externas béticas corresponderían al antiguo margen continental de la Placa Ibérica, mientras que las Zonas Internas provendrían, en su mayor parte, de la Placa de Alborán.

La estructura general de la Zona Prebética, donde se encuadra la mayor parte de la hoja de Benidorm, viene determinada por el despegue de la cobertera a nivel del Triás. Esta cobertera se encuentra plegada y fracturada, con pliegues de dirección dominante OSO. La vergencia

dominante es NNO, y la directriz principal, se encuentra afectada por fallas direccionales transversales (N 120-150°E), en general con desplazamiento dextral.

En la parte septentrional de la Hoja, sin embargo, las estructuras presentan orientación ONO. El borde Sur de la Sierra de Bernia se encuentra jalonado por fallas muy verticalizadas con esta orientación (fallas de Callosa y El Algar), mientras en la parte septentrional, la falla de Bernia, con desplazamiento normal, limita esta alineación estructural con el sinclinal de Calpe, de orientación similar. Estos pliegues pueden relacionarse genéticamente con la Cadena Ibérica, ya que son paralelos a la misma y continuación de ella.

La vertiente meridional de la Sierra de Bernia, al Norte de Altea la Vieja, presenta cierta complejidad estructural; los cretácicos dibujan un pliegue anticlinal complejo limitado al N y S por fallas muy verticales, la estructura de este sector parece originada por un empuje vertical de naturaleza diapírica (Keuper) más que por una compresión lateral.

Para concluir, se puede decir que la tectónica de la zona no está activa, además de que cerca de la zona de estudio no se encuentran fallas que puedan afectar a la ampliación del puerto.

2.4 Sismicidad

La sismicidad en la Comunidad Valenciana es de tipo superficial. Un mapa de la misma permite establecer zonas de mayor o menor riesgo sísmico. Al sur hay algunos alineamientos sísmicos en dirección N45W y N45E.

Las zonas de más probable sismicidad se dan en el sur de Valencia y en la provincia de Alicante, del resto puede decirse que son prácticamente asísmicas.

En el mapa referido a Alicante, en la zona donde se encuentra el puerto deportivo de estudio se clasifica con riesgo alto.

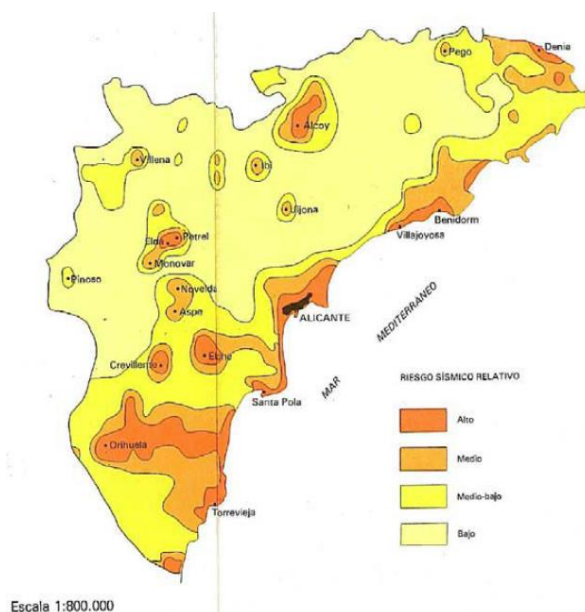


Figura 3. Mapa de riesgo de sismos. (Fuente: Universidad de Alicante)

3. Descripción del terreno

3.1 Propiedades generales de la zona

La geotecnia de la zona de estudio se describe en la Hoja 8-9/73 del Mapa Geotécnico General de Alicante, elaborado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Esta hoja está situada en la costa Oriental de la Península Ibérica, cuyos límites geográficos están definidos por las coordenadas, referido al meridiano de Greenwich:

- Longitud: 0° 31' 11" 0 – 0° 48' 49" 0
- Latitud: 38° 00' 04" 5 – 38° 40' 04" 4

La hoja está dividida en dos regiones y seis áreas. Estas divisiones se han efectuado para una descripción geotécnica más fácil y para ello se han seguido criterios geológico-litológicos y geomorfológicos (división en regiones) además de criterios de tipo tectónico, hidrológico y geotécnico (división de áreas).

El puerto deportivo de Altea se encuentra dentro de la Región I la cual agrupa todos los materiales considerados blandos o sueltos, y factibles de dar origen a suelos de espesores considerables; su disposición es horizontal o subhorizontal y poseen una tectonización prácticamente nula; el relieve suele ser suave.

Dentro de la Región I, la zona de estudio está enmarcada en el Área 1 la cual incluye la denominada, geomorfológicamente, llanura litoral, la cual esta constituida por aportes cuaternarios de arena, limo y alguna grava; su relieve es plano y se halla representada por una estrecha franja paralela a la costa y que va desde Benidorm a Altea.

3.2 Características litológicas de la zona

En la Memoria del Mapa Geotécnico General, se explican mediante una ficha resumen las características litológicas de cada una de las unidades de clasificación de las áreas, tanto sus condiciones físicas y mecánicas como su comportamiento ante los agentes de erosión externa. El área de estudio de la zona del puerto, nombrada anteriormente, es el Área 1 de la Región I.

Esta área es la llanura litoral, representada por una franja de arenas, limos y gravas, que va desde Benidorm a Altea bordeando Sierra Helada; los materiales están dispuestos de manera horizontal y es posible la acumulación granulométrica de alguno de ellos. Presentan un suelo vegetal potente, algo arcillo-limoso.

El Mapa Geotécnico General se adjunta al final del anejo en el Apéndice, donde se pueden distinguir las formaciones superficiales y los sustratos.

3.3 Características geomorfológicas de la zona

En la Hoja aparece una ficha resumen donde se describen los principales rasgos geomorfológicos, los efectos de la actividad endógena en las distintas formaciones y el comportamiento de los materiales ante los agentes de erosión externa, y analiza qué repercusión tiene sobre las condiciones constructivas de los terrenos de cada unidad de clasificación de 2º orden (Áreas). En la zona a estudiar, Área I1, se cita literalmente lo siguiente:

Presenta una morfología plana, con pendientes del orden del 3%, los materiales son estables bajo cualquier condición, tanto naturales como por la acción del hombre; la capa de tierra vegetal arcillosa es importante.

En la imagen inferior se puede observar la batimetría correspondiente al puerto deportivo de Altea. En ella se puede advertir que la pendiente de descenso de la costa es suave. Además, debido a la dinámica litoral, es decir, al transporte de sedimentos tanto marinos como fluviales, el estrato superior puede presentar entre 0,5 y 2 metros de espesor de material clasificado como suelo.

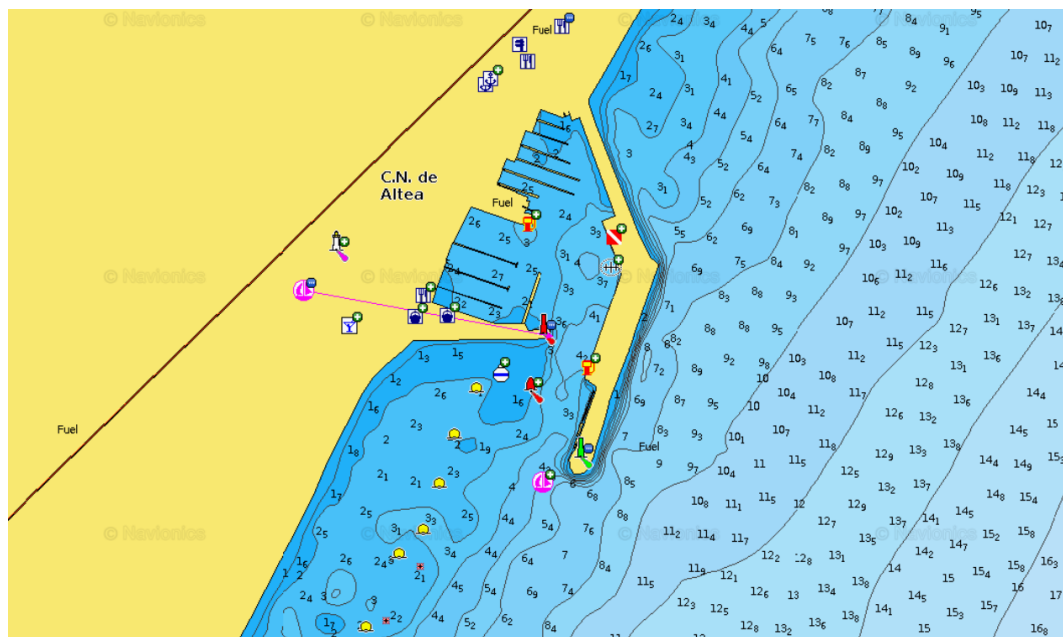


Figura 4. Batimetría puerto deportivo de Altea. (Fuente: www.navionics.com)

3.4 Características hidrológicas de la zona

En este apartado se resumen las características hidrogeológicas de las distintas formaciones y se analizan sus repercusiones en las condiciones constructivas de los terrenos.

Se analizan la permeabilidad de los materiales, las características de los acuíferos y las condiciones de drenaje. Todos estos datos figuran en un mapa y en una ficha resumen, que recoge las características hidrogeológicas fundamentales de cada unidad de clasificación.

La zona de estudio está formada por materiales en conjunto permeables o semipermeables; en profundidad presentan gran permeabilidad algunas zonas, lentejones de gravas.

El drenaje se efectúa por percolación natural, dada su morfología plana, con nivel freático a escasa profundidad (2-3 m) dando, en general, unas condiciones drenantes aceptables.

Acuíferos por porosidad intergranular.

En el Apéndice, se adjunta el Mapa Geotécnico General (Características Hidrogeológicas) donde se observa que los materiales son semipermeables en la zona de estudio. También cabe destacar que es una zona prácticamente sin acuíferos, en lo que respecta a la hidrología subterránea.

3.5 Características geotécnicas de la zona

Son aquellas propiedades de los suelos que determinan su comportamiento al verse solicitadas a esfuerzos.

Las dos más importantes son la resistencia y la compresibilidad, responsables de la capacidad portante del suelo y de los asentos de las estructuras.

Las dos propiedades citadas son función principalmente de la naturaleza litológica, y se ven afectadas por una larga serie de variables: contenido de humedad, relación de vacíos, contenido en materia orgánica e historia geológica. Todo ello será valorado de una manera cualitativa, para definir por último la capacidad portante como muy alta, alta, media, baja y muy baja; así como los asentos en muy levados, elevados, medios, bajos y muy bajos.

Como las anteriores características, éstas también figuran en una ficha resumen y en el Mapa Geotécnico General (Características Geotécnicas).

Las características obtenidas, citadas en la ficha resumen, son las siguientes:

- ⇒ Capacidad de carga baja.
- ⇒ Asientos de tipo medio, para cargas medias (2-4 kg/cm²) a largo plazo.

Finalmente, haciendo un resumen conjunto de todas las características expuestas en los apartados anteriores se puede decir que el terreno de la zona de estudio presenta condiciones constructivas muy desfavorables. Esto es debido a que, pese a que la zona presenta un relieve con pendientes suaves del 2%, la capacidad de carga del terreno es baja, lo que puede dar lugar al fallo de la obra por asentos excesivos si esta es muy rígida.

Cabe destacar también que no se hace referencia a la presencia del nivel freático debido a que la obra a ejecutar tiene lugar dentro del medio marino, por lo que se debe trabajar en continuo contacto con el agua.

4. Cálculo de los Estados Límite Últimos

La tipología de dique que se va a construir para llevar a cabo la ampliación del puerto deportivo es de tipo talud. Mediante esta solución se consigue evitar los problemas mencionados en el apartado anterior y que la infraestructura tenga un comportamiento adecuado. Así, se conseguirán asientos progresivos de la estructura sin que se produzca la rotura. Las dimensiones más representativas se adjuntan en la Figura 5.

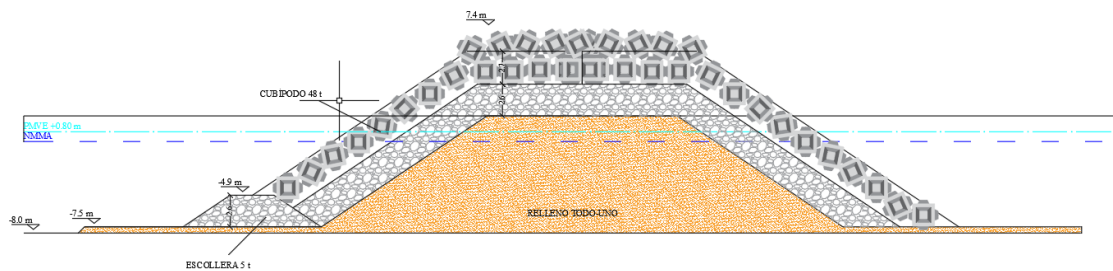


Figura 5. Sección transversal dique de abrigo. (Fuente: Elaboración propia)

La altura del dique es de 15 metros y tiene un ancho total de 64 metros.

Para realizar el cálculo de hundimiento se va a seguir la metodología de las *Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias ROM 0.5-05*.

Dado que se trata de una zona costera, el material que se encuentra en el fondo del mar son arenas muy removidas debido a la acción dinámica de las olas y las corrientes marinas.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la zona carece de estudios previos por lo que no se sabe exactamente hasta qué profundidad hay arenas y debajo de ellas cuál es el material existente. Por lo tanto, se debe hacer una suposición para la realización de los cálculos y para ello se hará desde una hipótesis que permita estar del lado de la seguridad.

La ubicación de las obras se encuentra cercana a la costa, por lo que lo más probable es que a escasos metros debajo de la arena se encuentre roca, dado el relieve accidentado de la zona. Por consiguiente, al hacer un dragado de hasta la cota -4 metros se asume que el dique apoyará directamente sobre el estrato rocoso. Se asume la situación más desfavorable, es decir, se supondrá que el material existente son las megabrechas de margas y margocalizas con bloques.

A continuación, se procede al cálculo de la carga de hundimiento en suelo cohesivos firmes y rocas, establecido por la ROM 0.5-05, según el método simplificado.

Los datos necesarios son:

- ⇒ Geometría de la cimentación.
 - Ancho, $B = 64$ m
 - Altura, $H = 15$ m
 - Largo, $L = 1$ m (los cálculos se harán por unidad de longitud al ser una obra lineal)
- ⇒ Inclinação de la carga sobre la cimentación (ángulo δ) = 90° (carga vertical y centrada).
- ⇒ Características de la roca.
 - Resistencia a compresión simple de la roca = 18 MPa.
 - Grado de alteración de la roca III.
 - Valor de RQD = 30%.

La presión vertical efectiva de hundimiento de cimentaciones sobre formaciones rocosas, según la ROM 0.5-05, puede estimarse como:

$$p_{vh} = 3(p_r \cdot q_u)^{1/2} \cdot f_D \cdot f_A \cdot f_\delta < 15 \text{ MPa}$$

Donde:

- ⇒ p_{vh} = presión vertical efectiva que produce el hundimiento.
- ⇒ $p_r = 1$ MPa, presión de referencia.
- ⇒ q_u = resistencia a compresión simple de la roca sana = 18 MPa.
- ⇒ f_D = factor de reducción debido al diaclasamiento. Será el mínimo de los siguientes:

$$f_D = 2 \cdot \left(\frac{s}{B^*}\right)^{1/2} \leq 1 \quad ; \quad f_D = 0,2 \cdot \left(\frac{B_0 \cdot RQD(\%)}{B^*}\right)^{1/2} \leq 1$$

$$f_D = 0,2 \cdot \left(\frac{1 \cdot 30(\%)}{64}\right)^{1/2} = 0.14 \leq 1$$

- s = espaciamiento entre litoclasas. No se utilizará este procedimiento cuando $s < 0,10$ m.
Como se trata de un material muy fracturado, se supone que este espaciamiento es menor a 0,10 m por lo que se descarta la primera fórmula.
 - B^* = ancho equivalente de la cimentación = $B = 64$ m (por ser carga centrada y vertical).
 - B_0 = ancho de referencia, se tomará $B_0 = 1$ m.
 - RQD = índice de fragmentación de la roca = 30.
- ⇒ f_A = factor de reducción debido al grado de alteración de la roca. Se tomará el valor siguiente:

Grado de meteorización (ver 2.2.9.7)	Factor f_A
I	I
II	0,7
III	0,5

- ⇒ f_δ = factor que tiene en cuenta la inclinación de la carga. Se tomará:

$$f_{\delta} = (1,1 - tg\delta)^3 < 1$$

$$f_{\delta} = (1,1 - tg0^{\circ})^3 = 1.331 < 1 \rightarrow f_{\delta} = 1$$

Por lo tanto, la presión vertical efectiva que produce el hundimiento es:

$$p_{vh} = 3(1 \cdot 18)^{1/2} \cdot 0.32 \cdot 0,5 \cdot 1 = 2,04 MPa < 15 MPa$$

Una vez obtenida la presión vertical efectiva, se debe comprobar la seguridad frente al hundimiento. Para ello se debe cumplir la desigualdad:

$$p_{v,comp} \leq p_{v,adm}$$

El coeficiente de seguridad frente al hundimiento, F, queda definido por:

$$F = \frac{p_{vh}}{p_v}$$

Donde:

- ⇒ p_{vh} = presión vertical de hundimiento obtenida al aplicar el método de cálculo correspondiente = 2,04 MPa.
- ⇒ p_v = presión vertical actuante en la hipótesis de carga correspondiente, calculada como:

$$p_v = \frac{N}{B^*}$$

- ⇒ N = fuerza vertical efectiva

$$N = A \cdot \gamma$$

Siendo:

- ⇒ A = área del dique.
- ⇒ γ = peso específico del material.

Puesto que el dique está formado por tres materiales, hormigón (cubípodos), escollera y todo-uno, el cálculo de la carga vertical transmitida se va a dividir en tres partes.

1. Carga transmitida por la escollera

El peso específico para una escollera natural tiene un valor aproximado de 17 kN/m³. Por lo que el peso propio será:

$$PP = N = \gamma \cdot A = 17 \cdot 156 = 2.652 \text{ kN/m}$$

Para saber la tensión que ejerce sobre el terreno se divide el peso propio por el ancho menor de la banqueta.

$$p_{v1} = \frac{PP}{B} = \frac{2.652}{59} = 44,95 \text{ kN/m}^2$$

2. Carga transmitida por el hormigón

El peso específico del hormigón armado tiene un valor de 25 kN/m^3 . Por lo que el peso propio será:

$$PP = N = \gamma \cdot A = 25 \cdot 165 = 4.125 \text{ kN/m}$$

Para saber la tensión que ejerce sobre el terreno se divide el peso propio por el ancho menor de la banqueta.

$$p_{v2} = \frac{PP}{B} = \frac{4.125}{64} = 64,45 \text{ kN/m}^2$$

3. Carga transmitida por el todo-uno

El peso específico para una grava floja tiene un valor de 16 kN/m^3 . Por lo que el peso propio será:

$$PP = N = \gamma \cdot A = 16 \cdot 268 = 4.288 \text{ kN/m}$$

Para saber la tensión que ejerce sobre el terreno se divide el peso propio por el ancho menor de la banqueta.

$$p_{v3} = \frac{PP}{B} = \frac{4.288}{43} = 99,72 \text{ kN/m}^2$$

Por lo tanto, la presión vertical actuante será:

$$p_v = p_{v1} + p_{v2} + p_{v3} = 44,95 + 64,45 + 99,72 = 209,12 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,209 \text{ MPa}$$

Finalmente, el coeficiente de seguridad frente al hundimiento será:

$$F = \frac{p_{vh}}{p_v} = \frac{2,04}{0,209} = 9,76$$

Si se compara el valor obtenido con la tabla de coeficientes de seguridad que establece la ROM 0.5-05:

Tabla 3.5.4. Coeficientes de seguridad frente al hundimiento de cimentaciones superficiales. Valores mínimos recomendados para obras de carácter ISA bajo (5 a 19)

Método de cálculo	Tipo de combinación y Coeficiente, F		
	Cuasi-Permanente, F ₁	Fundamental, F ₂	Accidental o sísmica, F ₃
Ensayos presiométricos	2,6	2,2	2,0
Ensayos de penetración estática	2,6	2,2	2,0
Otros ensayos de campo	3,0	2,5	2,2
Método "suelos firmes y rocas"	2,8	2,3	2,1
Cálculo analítico	2,5	2,0	1,8

Esta tabla es válida ya que según la ROM 1.0-09 a los puertos de uso náutico-deportivo con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique les corresponde un valor de índice de impacto social y ambiental (ISA) bajo.

Como el valor obtenido es mucho mayor al exigido por la ROM0.5-05, se puede afirmar que la estructura proyectada cumple el Estado Límite Último de Hundimiento, con un gran margen de seguridad.

5. Conclusiones

El objetivo inicial de este estudio geológico y geotécnico era definir las características geológicas y geotécnicas de la zona, así como garantizar que las nuevas obras de abrigo a ejecutar cumplan el estado límite último de hundimiento.

Este estudio forma parte de uno de los anexos del "*Estudio de Soluciones para la Ampliación del Puerto de Altea (Alicante). Obras de Abrigo y Ordenación Interior.*". Dado la envergadura del trabajo, el nivel de detalle no es demasiado elevado.

Con la redacción de este documento se ha logrado enmarcar el área de estudio que envuelve al puerto deportivo, definiendo la geología y las características geotécnicas, entre otros.

La carencia de estudios previos en la zona ha dificultado ser más preciso con las características del terreno, lo que ha obligado a hacer numerosas hipótesis, todas ellas del lado de la seguridad.

Finalmente se ha calculado el Estado Límite Último de Hundimiento, mediante un procedimiento simplificado. Mediante este se ha calculado la carga transmitida al terreno por el dique y se ha comprobado que es muy inferior a la carga de hundimiento que soporta el terreno.

Para concluir, se puede decir que se han alcanzado los objetivos planteados al inicio del estudio, para un nivel de detalle adecuado, acorde con el proyecto principal, el cual es un estudio de soluciones.

6. Referencias

- ⇒ Gobierno de España. Ministerio de Fomento. “ROM 0.5-05: Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias”, 2005.
- ⇒ Instituto Geológico y Minero de España, 2018. Disponible en: <http://www.igme.es/> [consultado 25.08.2018]

7. Apéndice