

VENTAYOL, A.; PALAU, J. Y ROCA, A. (2002): "El Contexto Geotécnico de la Ciudad de Barcelona". Ingeniería del Terreno. IngeoTer 1. U.D. Proyectos. E.T.S.I. Minas. U.P.M. Madrid.

EL CONTEXTO GEOTÉCNICO DE LA CIUDAD DE BARCELONA

Albert Ventayol*, **Joan Palau****, **Antoni Roca*****

Con la colaboración de Arnau Céspedes*, Pere Buxó****, Jesús Carbonell*.

*Licenciado en Geología. ** Dr. en Geología. *** Dr. en Físicas. **** Ingeniero Geólogo y Geólogo.

Bosch & Ventayol GeoServeis, S.L.; RSE Aplicaciones Territoriales S.A.; Institut Cartogràfic de Catalunya.

1. INTRODUCCIÓN.

El conocimiento del marco geotécnico en el que se va a desarrollar una obra es fundamental para su correcta planificación y ejecución, desde la programación de la siempre necesaria campaña de sondeos, hasta las etapas de revisión del correspondiente estudio geotécnico.

La experiencia indica que disponer de cartografías geotécnicas del territorio permite anticipar problemas, plantear investigaciones adecuadas y contrastar los resultados obtenidos, lo que sin duda redundará en un mejor conocimiento de la zona.

En este capítulo se analiza el contexto geotécnico de la ciudad de Barcelona, tomando como referencia la Memoria contenida en el CD ROM "Mapa Geotècnic de Barcelona", realizado por los autores conjuntamente con el Institut Cartogràfic de Catalunya. Este producto, distribuido por esta última entidad, permite la consulta de una serie de mapas temáticos, visualizar sondeos representativos del entorno de la ciudad, así como realizar sondeos virtuales en cualquier lugar del mapa.

El capítulo se completa con un ejemplo en el que los sondeos virtuales efectuados previamente, permitieron planificar correctamente una importante campaña geotécnica, demostrando las ventajas que supone disponer de este tipo de cartografías.

2. MARCO GEOGRÁFICO.

La zona en análisis se emplaza entre la nueva desembocadura del Llobregat y la llanura litoral situada al noreste del Besós, teniendo como límites el mar y la Cordillera Litoral. Excepto por lo que concierne a los relieves montañosos y los deltas de los ríos, esta superficie coincide con el denominado Llano de Barcelona.

Este llano es una plataforma morfológica, suavemente inclinada hacia el mar, que enlaza progresivamente hacia el noroeste con la vertiente marítima de la Serra de Collserola, que tiene en el Tibidabo (512 m) su punto más alto. El llano corresponde a una planicie de piedemonte, con una superficie aproximada de 65 km², y su pendiente es más alta al pie de Collserola (10-20°), disminuyendo gradualmente en dirección al mar (2-4°).

La continuidad de la plataforma, entre el Llobregat y el Besós, se ve alterada en dos grandes zonas. De un lado por la presencia de los relieves de los Serrats de La Rovira, que engloban una serie de colinas (turons) situados entre Horta y Sarrià: turó de la Peira (138 m), turó de la Rovira (261 m), el Carmel (267 m), la Creueta (249 m), el Puget (181 m) i Monterols (121 m).

Por otro lado, en el frente marítimo, al sur de la ciudad de Barcelona, se alza el bloque de Montjuïc (189 m), acompañado por una serie de elevaciones menores, como el Mont Taber, donde se fundó la antigua Bàrcino romana, y otras pequeñas elevaciones, hoy día casi desaparecidas por la progresión urbanística de la ciudad. Destacan por su implicación geológica, ya que en muchos casos corresponden a afloramientos pliocénicos: turó dels Ollers (C/ dels Escudellers i C/ Nou de Sant Francesc), puig de les Falzies (Llotja de Mar), la Vinyeta (plaza de España) i punta del Convent (Parc de la Ciutadella). Al oeste de Montjuïc, ya en el término municipal de l'Hospitalet de Llobregat, se pueden citar los turons de la Torrassa, les Planes, Can Serra i Sant Feliu, este último ya en Cornellà.

Al este del Besòs, también hay una alineación montañosa: Llefia, turó d'en Carig, etc., que se une después con los relieves de la Serralada Litoral en Montigalà y en la Conreria, enlazando finalmente con el turó de Montgat.

Las llanuras deltaicas del Llobregat y del Besòs, así como la franja litoral que se desarrolla entre ambos deltas, son sectores de morfología muy suave, con pendientes muy inferiores al 1%, y situados generalmente por debajo de 10-15 m sobre el nivel del mar. El delta del Besòs tiene una superficie aproximada de 15 km², mientras que el del Llobregat es bastante más grande, del orden de 92 km².

Separando el llano de Barcelona de las zonas deltaicas y litorales, existe un talud bastante inclinado, que se puede seguir a lo largo de muchos sitios, si bien el desarrollo urbano ha tendido a su desaparición en el centro de la ciudad. Este talud, que podría ser de origen tectónico, asociado a las fosas del Baix Llobregat y del Besòs, es todavía perfectamente observable entre Cornellà y L'Hospitalet. En este tramo tiene una altura de unos 25 m, y por su pie discurre la línea de Renfe y el Canal de la Infanta.

El talud queda desdibujado por la trama urbana a partir del barrio de La Bordeta, pero puede aún ser reconocido en lugares muy céntricos, como en C/ Gravina, en el sector alto de La Rambla, o en el desnivel que hace la Vía Laietana o C/ Jonqueres, por debajo de la Pl. Urquinaona.

El talud bordea por el oeste la Plaza de les Glòries Catalanes, y desde este punto se dirige hacia el norte, atarvesando Sant Andreu, donde su altura vuelve a ser de 15 m. También en este caso la línea de Renfe sigue su alienación.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO.

Barcelona se sitúa geológicamente en el marco extensivo que afecta desde tiempos neógenos el margen occidental del mar Catalanobaleár. Este proceso tectónico implica la presencia de una serie de fallas normales, aproximadamente paralelas a la línea de costa, que delimitan un conjunto de bloques hundidos (fosas o semifosas tectónicas), entre otros comparativamente elevados (horsts).

Así pues, la Serra de Collserola es un horst situado entre la fosa del Vallès y la fosa del llano de Barcelona. El bloque dels Serrats de la Rovira es un subbloque hundido respecto de Collserola. Debe haber importantes fallas en la vertiente marítima de estos bloques, si bien actualmente están recubiertas por sedimentos cuaternarios. Recientes estudios gravimétricos, indican la presencia de una importante cubeta rellena con sedimentos neógenos, al pie de los Serrats de la Rovira.

En el límite actual del área emergida se eleva otro bloque, el de Montjuïc, que en el Morrot queda cortado por otra falla normal, que da lugar al acantilado que domina el puerto. Bajo el mar, paralelamente a la costa, otra falla normal da paso a una importante fosa submarina, conocida como fosa de Barcelona.

En este contexto se comprende que los materiales del substrato paleozoico y mesozoico de la Serralada Litoral se hundan progresivamente hacia el mar, quedando recubiertos, bajo el Mediterráneo, por un importante espesor de sedimentos cenozoicos.

Por lo que refiere a las unidades litológicas, de manera muy esquemática y centrándonos en la zona que nos ocupa, los materiales más antiguos son los que afloran en Collserola, donde hay rocas metasedimentarias paleozoicas, principalmente pizarras y otras rocas (areniscas, calizas, liditas, conglomerados, etc.), más o menos afectadas por el metamorfismo de contacto asociado a los granitoides que afloran al pie de la montaña. Así mismo, al noreste del Besòs afloran rocas graníticas, que también constituyen el substrato no aflorante de gran parte de Horta y Sarrià.

Los turons de la Rovira también están formados por rocas paleozoicas, con presencia de casi todos los períodos de dicha era, y con litologías que abarcan desde pizarras a areniscas, calizas, dolomías y sus equivalentes metamórficos. Estas colinas están separadas de Collserola por una fractura de dirección NE-SW, que pasa por el Coll dels Penitents y discurre por el denominado corredor Horta-Sarrià. Probablemente debe existir otra fractura, subparalela a esta, en la vertiente marítima.

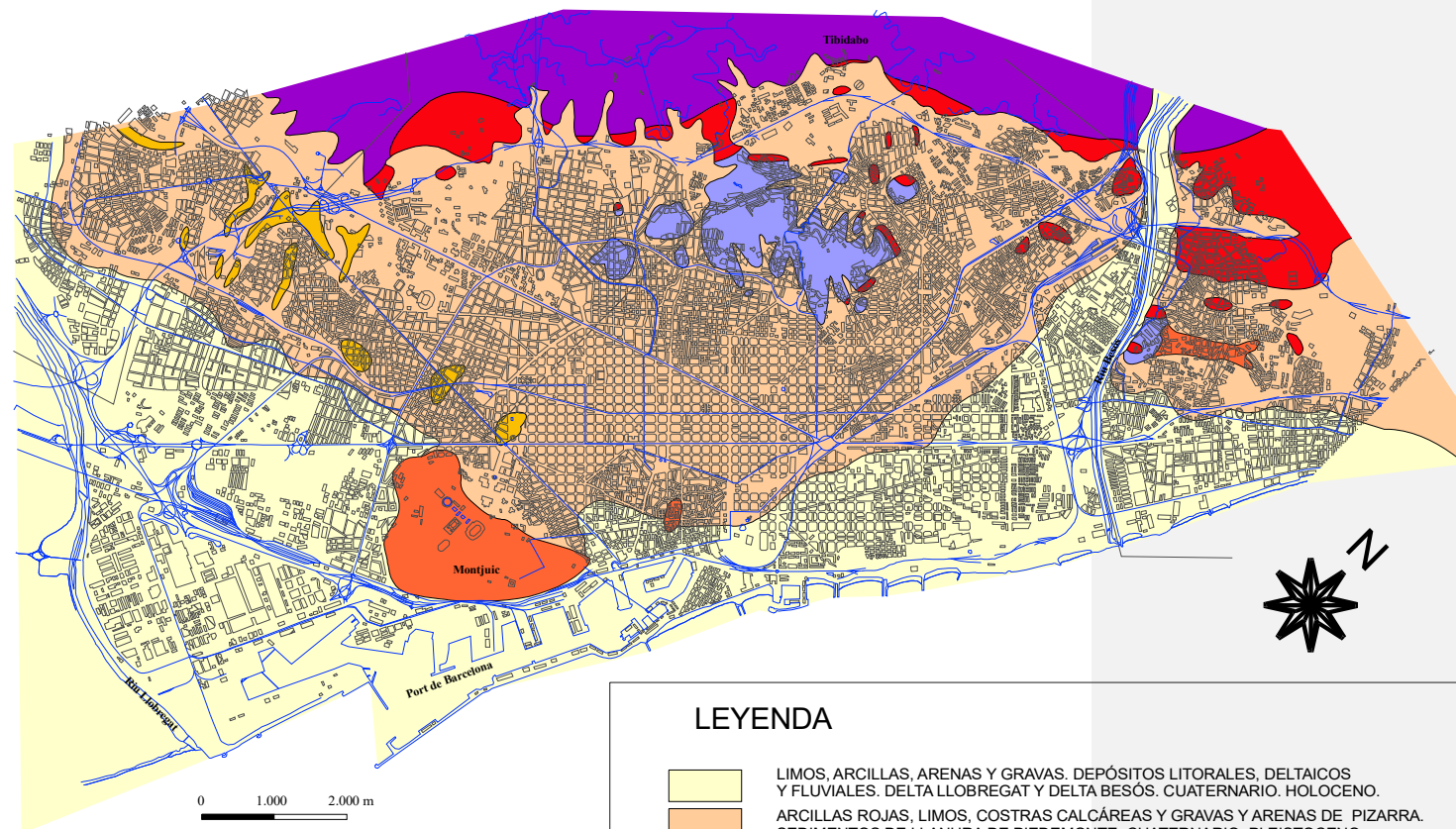
En dirección a la costa, a causa del hundimiento del substrato, las rocas paleozoicas quedan recubiertas por sedimentos terciarios, representados por las margas y areniscas marinas del bloque de Montjuïc, y por las margas y arenas marinas pliocenas.

En el llano de piedemonte de Barcelona, gran parte de los sedimentos mencionados, quedan discordantemente recubiertos por depósitos de origen coluvial y edad pleistocena (Cuaternario antiguo). Son esencialmente arcillas, limos, y costras calcáreas, que en ocasiones forman una secuencia de tres niveles que se repite tres veces, de manera que a esta unidad sedimentaria se la conoce con el nombre de "Tricicle".

Los deltas del Besòs y del Llobregat son de edad geológica muy joven, ya que se han formado durante el Holoceno (Cuaternario reciente), que representa el tiempo transcurrido después de la última gran glaciación, que finalizó hace unos 15.000 años. Entre los sedimentos deltaicos se encuentran limos y arcillas de las llanuras de inundación, arcillas depositadas en las marismas asociadas a los deltas, arenas y gravas fluviales, arcillas y limos sedimentadas en el frente deltaico, y también arenas litorales y de playa.

Así pues, el subsuelo de Barcelona está constituido por un substrato rocoso o semirocoso, que comprende los macizos de Collserola y los Serrats de la Rovira, los sedimentos miocenos de Montjuïc y de Badalona, y las margas y arenas pliocenas, recubierto por formaciones superficiales de edad cuaternaria, integradas por la planicie de piedemonte del Llano de Barcelona, y los deltas de los ríos.

MAPA GEOLÓGICO DEL LLANO DE BARCELONA.



LEYENDA

- LIMOS, ARCILLAS, ARENAS Y GRAVAS. DEPÓSITOS LITORALES, DELTAICOS Y FLUVIALES. DELTA LLOBREGAT Y DELTA BESÓS. CUATERNARIO. HOLOCENO.
- ARCILLAS ROJAS, LIMOS, COSTRAS CALCÁREAS Y GRAVAS Y ARENAS DE PIZARRA. SEDIMENTOS DE LLANURA DE PIEDEMONTE. CUATERNARIO. PLEISTOCENO.
- ARCILLITAS MARRÓN-VERDOSAS, ARENAS AMARILLENTAS Y ARCILLITAS AZULES. SEDIMENTOS LITORALES (BAHÍA PROFUNDA Y SOMERA). PLIOCENO.
- ARENISCAS, CONGLOMERADOS Y ARCILLITAS. SEDIMENTOS DELTAICOS Y LITORALES. MIOCENO.
- PIZARRAS Y ESQUISTOS. ROCAS PALEOZOICAS. SERRA DE COLLSEROLA.
- CALIZAS, PIZARRAS, ARENISCAS Y ESQUISTOS. ROCAS PALEOZOICAS. TURONS.
- GRANITO ALTERADO SUPERFICIALMENTE A SAULÓ. INTRUSIÓN TARDIHERCINIANA.

BOSCH & VENTAYOL
G E O S E R V E I S

SONDEOS - INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOLOGIA DEL MEDIO AMBIENTE - HIDROGEOLOGÍA - RECONOCIMIENTOS GEOLÓGICOS
 C/ Rocafort, 261, c/1c 2a. - 0829 BARCELONA - Tel. (93) 5408542 - Fax (93) 5408539
 Email: a.ventayol@readysoft.es

En la figura 1 se presenta de forma simplificada el mapa geológico básico de la ciudad de Barcelona.

3.1. Substrato rocoso.

3.1.1. Paleozoico sedimentario y metamórfico. La serra de Collserola y los turons de Barcelona.

Litología y estructura.

Los materiales paleozoicos están representados por casi todos los períodos de la era. La columna estratigráfica resumida es la siguiente, de más antiguo a más moderno:

- *Cambroordovícico*: formado por una alternancia de pizarras y areniscas, localmente con intercalaciones de calizas. En el macizo de Collserola, estos sedimentos van asociados a veces con sills de rocas volcánicas de composición intermedia y básica. Hacia la parte alta de la serie hay niveles de cuarcita.
- *Silúrico*: constituido por pizarras negras ampelíticas, que localmente contienen intercalaciones de cuarcita.
- *Devónico*: calizas nodulosas en la base, que se disponen en bancos masivos, y calizas y dolomías bien estratificadas, con niveles de pizarra, hacia el techo.
- *Carbonífero*: lilitas en la base, seguidas por areniscas verdes, con conglomerados con cantos de cuarzo y pizarra.

Comentario [B&V1]: N estratificadas

Comentario [B&V2]: n

En el área estudiada, todos estos sedimentos están afectados por un metamorfismo regional de grado bajo (facies de los esquistos verdes), con desarrollo de planos de foliación. Esta foliación enmascara a menudo la estratificación, salvo donde hay niveles de calizas o cuarcitas.

La estructura tectónica es bastante compleja, ya que durante la orogenia herciniana los sedimentos se plegaron, con un desarrollo polifásico de la deformación. En Collserola, las estructuras de primera fase corresponden a pliegues muy cerrados, de dirección general WNW-ESE y vergencia hacia el SSW. La foliación dominante tiene una inclinación muy constante entre 40-60° hacia el NNE. El macizo de pizarras está atravesado por abundantes filones de cuarzo, generados en esta fase.

En Collserola, la mayor parte de afloramientos corresponden a los niveles pizarrosos del ordovícico, y también, en parte, del silúrico. En los extremos del macizo se encuentran calizas devónicas, en el núcleo de sinclinales complejos: Santa Creu d'Olorda i turó de Montcada.

Al final de la orogenia herciniana se produce la intrusión de un batolito granítico (granodiorita) que, en la zona estudiada, aflora en Sarrià y Horta, al pie de Collserola

Esta intrusión provocó la aparición de un metamorfismo de contacto en los sedimentos paleozoicos, que se caracteriza por una intensa recristalización de las rocas situadas en las proximidades del contacto, que adquieren aspectos masivos (corneanas), y por la aparición de pizarras moteadas al alejarnos de la intrusión (las motas son debidas a la aparición de nuevos minerales metamórficos). En las zonas más próximas al granito el metamorfismo oblitera la esquistosidad anterior, generando corneanas masivas. Cuando el metamorfismo afecta materiales calizos, estos se transforman en esquistos calcosilicatados.

En la zona de los turons o Serrats de la Rovira, la complejidad tectónica es también muy importante. Son frecuentes las cobijaduras, que aprovechan como nivel de despegue las pizarras negras silúricas. La parte alta de los turons está a menudo formada por un relieve invertido, desarrollado en sinclinales fallados, en los que afloran las calizas devónicas, más duras que el resto de materiales (el Carmel, la Creueta del Coll, etc.). También afloran los conglomerados del Carbonífero. En general son materiales siempre muy fracturados.

Geotecnia.

El macizo rocoso de pizarras, filitas y esquistos es claramente anisótropo, a causa de la foliación penetrante que lo afecta, mientras que en las series calcáreas, la anisotropía viene impuesta por la estratificación. En Collserola la orientación de los planos de foliación es bastante constante, con una inclinación de 40-60° hacia el NNE.

Además de la foliación, en Collserola se desarrollan una serie de planos de discontinuidad adicional, constituidos por las diaclasas. Estas fisuras se agrupan básicamente según dos orientaciones preferentes,

conjugadas entre sí: 040/80SE y 005/85W. En la zona de turons, en cambio, ni la foliación ni los planos de diaclasa son tan homogéneos, y la dispersión de estos parámetros es mucho más grande.

Por otra parte, especialmente en las pizarras, se da un proceso de alteración superficial, que conduce a la génesis de minerales arcillosos, y en definitiva a una pérdida de resistencia del macizo. Expuestas a la intemperie, las pizarras (o llicorelles, como son conocidas localmente) se degradan rápidamente.

Si se realiza una clasificación geomecánica del macizo rocoso de pizarras y rocas afines, se obtienen índices RMR (*Rock Mass Ratio*) del orden de 25, valor relativamente de baja calidad geotécnica en comparación con otras rocas, condicionado básicamente por el grado de fisuración de los materiales. En las calizas el índice RMR es superior, situándose alrededor de 50-60.

El índice RQD de las pizarras es muy bajo, a menudo nulo, mientras que en las calizas es alto, del orden de 60-100. La resistencia a la compresión simple de las calizas suele estar comprendida entre 250 i 500 kg/cm².

El flujo de agua por el interior del macizo rocoso es pequeño, pero no por ello inexistente. En las pizarras pueden producirse flujos por las fracturas u otras discontinuidades que afectan la roca. Las calizas pueden estar carstificadas, como se observa en el turó del Carmel, y por lo tanto son susceptibles de flujos de agua más importantes.

Por otra parte, los materiales paleozoicos suelen situarse en zonas de pendientes acusadas, lo que obliga a efectuar desmontes y terraplenes de importancia.

Las consecuencia geotécnicas de estas características se sintetizan a continuación:

- La capacidad portante de las series paleozoicas es elevada, en lo concerniente a cimentaciones de edificios y estructuras convencionales. Sin embargo, las estructuras singulares pesadas requieren un estudio detallado. Los asientos no son habitualmente importantes, pero hay que poner cuidado –como en todos los casos de cimentaciones a media ladera- de no provocar asientos diferenciales entre las partes de la estructura cimentadas en la roca, y otras apoyadas en un terraplén formado para la nivelación del solar.
- En la construcción de túneles hay que prestar mucha atención a las pizarras negras silúricas, que además suelen estar involucradas en zonas fracturadas.
- Un aspecto importante de las rocas paleozoicas, en geotecnia, son los movimientos en masa, ya que los desmontes pueden ser inestables si las orientaciones de la foliación, o las diaclasas, resultan desfavorables respecto del frente del talud. También en frentes abandonados de antiguas canteras, se pueden producir desprendimientos rocosos de cierta consideración.
- La ripabilidad de estos terrenos es variable. Las pizarras se pueden excavar con medios convencionales en frentes abiertos, pero pueden precisar localmente del uso del martillo picador. En las calizas las dificultades de extracción son claramente superiores. En la excavación de pantallas en las pizarras se ha recurrido últimamente con éxito al uso de hidrofresas, como en el nuevo Hospital de Sant Pau.
- Como material de préstamo para la construcción de terraplenes, la llicorella o pizarra descompuesta es un material "adecuado" según la normativa vigente (PG-3).

3.1.2. Rocas ígneas paleozoicas. El granitoide de la Cordillera Litoral.

Petrología y estructura

Al pie de la vertiente marítima de Collserola aflora la granodiorita, que forma parte del extenso batolito del Maresme. Esta intrusión corta las estructuras hercínicas, y al mismo tiempo es responsable del metamorfismo de contacto que afecta los sedimentos paleozoicos encajantes.

Este mismo granitoide constituye el subsuelo de gran parte de Horta y de Sarrià, si bien a menudo está recubierto por sedimentos cuaternarios. También están formados por granodiorita los relieves del norte de Santa Coloma.

En una fase tardía de la intrusión se emplazaron diques de rocas graníticas ácidas: pórfidos granodioríticos y aplitas. Estos diques atraviesan también las series sedimentarias paleozoicas, en las zonas próximas a la intrusión. Su orientación es sensiblemente EN-SW, y su anchura alcanza la decena de metros.

Geotecnia

La granodiorita se presenta alterada superficialmente por efecto de una meteorización que tuvo lugar bajo unas condiciones climáticas distintas a las actuales. El macizo rocoso se transforma en "sauló", que es un material granular grueso, con algo de matriz limosa o arcillosa, de baja cohesión, producto de la alteración in situ de la granodiorita. En zonas concretas, el espesor del sauló puede superar varias decenas de metros.

El granito sano es casi impermeable, pero las formaciones de sauló pueden ser favorables al establecimiento de acuíferos dignos de ser tenidos en cuenta.

Lógicamente la clasificación geomecánica del macizo rocoso es muy variable, según el grado de meteorización. Así pues, se pasa de rocas duras, con índices RMR elevados, a terrenos de calidad mucho más baja, asimilables a un suelo granular denso.

Las cimentaciones en el granito no han de tener problemas significativos, e incluso las emplazadas sobre el sauló no han de experimentar asentamientos perjudiciales, excepto en el caso de grandes cargas.

La estabilidad de taludes es moderadamente favorable, excepto en zonas muy alteradas, o cuando haya planos de discontinuidad desfavorables.

La ripabilidad varía en función del grado de alteración. En la roca sana puede ser necesario el uso de explosivos. Como material de préstamo en terraplenes, el sauló es un material "seleccionado" según la normativa vigente.

3.1.3. Mesozoico. Los bloques triásicos del norte de Badalona.

Litología.

Excepto un pequeño afloramiento de conglomerados rojos del Buntsandstein, situado en Vallcarca, el resto de sedimentos triásicos se localizan en los relieves montañosos del noreste de Badalona, al oeste del túrd de Montgat.

La serie estratigráfica presente en el ámbito estudiado se puede resumir como sigue, de más antiguo a más moderno:

- *Buntsandstein*: Conglomerados de cuarzo y areniscas rojas.
- *Muschelkalk inferior*: Dolomías y calizas masivas, con algunos tramos brechificados.
- *Muschelkalk medio*: Arcillas y areniscas rojizas, con algunos niveles de yeso.
- *Muschelkalk superior*: Dolomías y calizas tabulares, con pequeñas intercalaciones de niveles margosos amarillentos.

Los afloramientos existentes permiten apreciar una estructura tectónica compleja.

Geotecnia

Las calizas triásicas han sido objeto de explotaciones en las canteras situadas junto al barrio de Pomar. Pueden presentarse desprendimientos rocosos en los frentes abandonados de dichas canteras.

Los niveles arcillosos del Muschelkalk medio pueden producir situaciones de inestabilidad de laderas, pero su extensión lateral es muy limitada.

3.1.4. Neógeno. El bloque mioceno de Montjuïc y los sedimentos pliocenos.

Litología y estructura

El bloque de Montjuïc, de edad miocena, al igual que los relieves de Llefia situados al oeste de Badalona, es un *horst* limitado por el lado marino por fallas normales, que progresivamente provocan que los sedimentos neógenos, bajo el mar, sean de potencia considerable.

Sedimentológicamente, los materiales de Montjuïc corresponden a depósitos terrígenos y transicionales de tipo deltaico. Se trata de una alternancia de areniscas silíceas y niveles de lutitas arenosas y margas grises, con algunos niveles de conglomerados. En Santa Coloma y Badalona, los sedimentos miocenos corresponden a conglomerados y areniscas rojas, con matriz lutítica.

Los bancos de areniscas de Montjuïc pueden llegar a tener alguna decena de metros de potencia, y han sido explotados, desde épocas prerromanas, como piedra de construcción: muchos de los antiguos edificios de la ciudad fueron construidos con dicha piedra. La disposición de los estratos de Montjuïc es subhorizontal, con pequeñas flexiones, y su continuidad queda interrumpida por la falla del Morrot.

Probablemente, los sedimentos miocenos forman también el núcleo interior del montículo del Mont Táber, si bien quedan recubiertos, al menos parcialmente, por sedimentos pliocenos.

Los sedimentos pliocenos se depositaron en contacto discordante sobre los sedimentos de edad miocena, y constituyen el substrato relativo de gran parte de la ciudad. El contacto entre el mioceno y el plioceno corresponde a una superficie de erosión formada a consecuencia de la regresión messiniana (que representa el momento en que el mar Mediterráneo llegó casi a secarse, hace unos cinco millones de años).

La parte inferior del plioceno está constituida por niveles conglomeráticos fluviales, poco presentes en Barcelona, sobre los que se inició una transgresión marina, con sedimentación de arcillas y margas gris azuladas. Estos sedimentos son propios de una bahía que penetraba en el llano de Barcelona y también por el valle del río Llobregat.

Por encima de las arcillas azules hay sedimentos de influencia más terrígena: margas arenosas de color verdoso, y arenas amarillentas de tipo playa, correspondientes a los episodios de relleno de la bahía.

Los niveles pliocenos afloran en numerosos puntos, especialmente en L'Hospitalet y en Esplugues. En el centro de la ciudad se encuentran en la plaza España, en el Mont Táber, y subafloran en las cercanías de la Sagrada Familia. Forman el substrato precuaternario a partir de una línea aproximada que seguiría la Diagonal, la Travessera de Gracia y la Meridiana.

La estructura de los sedimentos pliocenos es también subhorizontal. Sin embargo, en el fondo de algunos torrentes de Esplugues, ahora parcialmente sepultados por los terraplenes de la Ronda de Dalt, se pueden observar pequeñas flexiones, e incluso, en Sant Feliu de Llobregat, algunas fracturas normales que llegan a afectar los sedimentos cuaternarios que recubren el plioceno. Todo ello es indicio de una actividad neotectónica moderada, asociada a las últimas fases de la distensión neógena del mar Catalanobalear. También es significativo en este aspecto, que las facies de arcillas azules se sitúan a una altura de +100m en el Papiol y Molins de Rei, mientras que cerca del litoral se perforan a -100m.

Geotecnia

En general, las características geotectónicas de los sedimentos neógenos son favorables.

Las areniscas y los conglomerados de Montjuïc son una roca dura, muy poco meteorizada. El valor del índice RQD es cercano a 100, y la clasificación geomecánica del macizo rocoso llega a valores de índice RMR situados entre 70 y 80. Esta valoración disminuye cerca de las zonas de fallas, donde el macizo tiene un carácter mucho más fracturado.

Los niveles de arcillas y margas tienen una resistencia claramente inferior, pero igualmente admiten cimentaciones directas, con capacidades portante elevada, superior a los 4,0 kg/cm², y con asentamientos pequeños para cargas habituales.

La excavación de desmontes en las margas debe ser estudiada, ya que son frecuentes los casos de inestabilidad de masas de tierras. A menudo estos procesos van asociados a condiciones hídricas desfavorables, en el sentido en que los bancos de areniscas intercalados en las margas pueden ser sede de pequeños acuíferos, que tienen en éstas su base impermeable. Muchas de las fuentes de Montjuïc responden a este esquema hidrogeológico.

En la zona de la falla del Morrot son también frecuentes los deslizamientos y los desprendimientos, que en ocasiones forman pequeños aludes de derrubios.

Anteriormente ya se ha mencionado que la piedra de Montjuïc, la arenisca, ha sido utilizada como elemento de construcción de gran parte de la ciudad. Como hecho curioso cabe citar que las arcillas arenosas de Montjuïc, conocidas con el nombre de "terra d'escudella", han sido utilizadas para quehaceres domésticos de limpieza.

En relación a los niveles pliocenos, las arcillas azules y las margas arenosas verdosas tiene unas características geotécnicas similares a las descritas anteriormente. Los niveles arenosos superiores han de ser tratados como materiales granulares densos, sin cohesión.

Estas arenas, cuando están recubiertas por sedimentos cuaternarios del llano de Barcelona, son a menudo sede de un acuífero importante, que ha sido objeto de explotación en muchos puntos del Eixample de la ciudad.

Es tradicional el uso del substrato arenoso plioceno como nivel resistente para pilotajes perforados a través del cuaternario suprayacente; pero debe tenerse en cuenta que la superficie de contacto entre ambas formaciones es un paleorelieve, por lo que la profundidad a la que se encuentra el substrato puede variar considerablemente en distancias cortas.

El templo de la Sagrada Família esta cimentado, a través de pozos y pilotes, en estas arenas pliocenas.

3.2. Formaciones superficiales cuaternarias.

3.2.1. Pleistoceno. La llanura de piedemonte.

Litología y estructura.

Estos sedimentos forman el llano de Barcelona, aflorando entre la sierra de Collserola, los deltas y la franja litoral. Sin embargo, el contacto litológico con los depósitos de las zonas deltaicas no coincide exactamente con el talud morfológico anteriormente mencionado, ya que se extienden por debajo de una parte de la planicie deltaica actual. En efecto, las arcillas rojas del piedemonte aún son detectadas muy superficialmente en sondeos perforados en puntos cercanos al talud, pero que morfológicamente pertenecen ya a los deltas. Progresivamente, a las arcillas rojas se sobreponen limos y arenas deltaicas, cada vez con mayor potencia, hasta que todos los materiales son propiamente deltaicos.

Los sedimentos pleistocenos reposan discordantemente sobre un substrato que puede estar formado por el macizo paleozoico pizarroso o granodiorítico, o por los sedimentos neógenos del Mioceno y del Plioceno. La granodiorita alterada a sauló configura el basamento de la zona de Horta y de Sarriá. En gran parte de la zona central cercana a los Serrats de Rovira, el substrato está constituido por las rocas metasedimentarias paleozoicas, mientras que a partir de la línea aproximada Diagonal-Travessera-Meridiana, hacia el mar, el substrato está siempre formado por los sedimentos pliocenos. En general no hay sedimentos pliocenos por encima de la cota 70 o 80 m sobre el nivel del mar.

La superficie del substrato forma un claro paleorelieve. Debe mencionarse que sondeos efectuados en distancias muy cortas señalan paleopendientes a veces superiores a los 35°.

El paleorelieve que conforma el substrato es también evidente a gran escala. En la zona recubierta por el piedemonte, se aprecian claramente tres paleocuenca, que probablemente han condicionado la sedimentación desde el Pleistoceno hasta la actualidad.

La paleocuenca más occidental es la cubeta de Sarriá y coincide con la futura cuenca de la Riera Blanca. En la zona central de la ciudad hay una clara depresión entre Montjuïc y el Mont Táber, mientras que hacia el norte, otro valle recogía las aguas de la zona de Horta, como hasta hace poco lo ha hecho la riera del mismo nombre.

La potencia de los sedimentos pleistocenos es bastante variable. En la mayor parte de puntos es inferior a 20-25 m, y sólo supera los 35 m en contadas ocasiones, especialmente al este de Sarriá.

La base del Cuaternario antiguo está a menudo formada por un nivel gravas y arenas de pizarra, subangulosas, englobadas en una matriz arcillosa roja. Las gravas son monogénicas, constituidas casi exclusivamente por fragmentos de rocas pizarrosas, si bien también las hay de cuarzo. Generalmente no hay gravas de granodiorita, hecho que prueba la alteración en sauló anterior a la deposición de la formación cuaternaria.

La potencia de estos materiales detríticos gruesos, así como las dimensiones de las gravas, su heterometría y angulosidad, crecen al acercarse al pie de la montaña, lo que indica su procedencia. En estos sectores, las gravas están presentes en todos los niveles, mientras que en dirección al mar están confinadas en los niveles más profundos, o bien forman lentejones detríticos en el interior de otras capas.

Cuando las gravas no enmascaran su composición, puede observarse que la formación pleistocena está formada por la repetición cíclica de la siguiente serie, de muro a techo:

- Arcilla roja compacta; a veces incluye paleocanales detríticos con abundante matriz arcillosa rojiza. Es frecuente la presencia de gravas dispersas en este nivel, así como nódulos calcáreos.
- Limos amarillentos, que constituyen un *loess* de tipo mediterráneo, en el cual son también frecuentes los nódulos calcáreos, de forma irregular. Las gravas de pizarra son poco frecuentes. Hacia la parte alta del nivel, los nódulos son más numerosos y pueden soldarse, formando racimos (“cervell de gat”), que generalmente dan paso al siguiente nivel.
- Costra de caliza rosada, de estructura zonar, llamada localmente “*tortorà*”. La potencia de este nivel en general es de 20-30 cm, pudiendo llegar excepcionalmente a más de un metro.

Esta serie se repite generalmente unas tres veces, y de ahí el nombre de “Tricicle” con el que se conoce popularmente a esta formación. Cabe remarcar que la descripción anterior corresponde a una situación ideal, ya que en la realidad y fuera de lugares concretos se presentan las siguientes particularidades:

- Existencia de gravas de pizarra, presentes en uno o algunos niveles.
- Ausencia de alguno de los niveles descritos, ya sea por su no deposición, o por su erosión posterior.
- La costra de caliza no siempre se forma, y su extensión y su potencia son muy irregulares.

El buzamiento de los niveles sigue con bastante fidelidad la pendiente de la superficie topográfica, si bien se adapta a la morfología del substrato cuando este es cercano. Así pues, cabe prever buzamientos casi nulos en la parte baja de la ciudad, y relativamente elevados, hasta 20°, cerca de los afloramientos del substrato.

A grandes rasgos se pueden distinguir cuatro subunidades:

- La serie cíclica tal y como ha sido definida, y que se extiende por el sector central y bajo de la ciudad.
- La formación detrítica, ya mencionada, con mayor presencia de gravas y de niveles de gravas de pizarra. Se extiende al pie de los relieves montañosos, así como en los niveles basales cuaternarios.
- Sectores muy carbonatados, con costras calcáreas de más de un metro de potencia. Su distribución es irregular, pero son particularmente frecuentes al pie de los Serrats de la Rovira. En la zona del Turó de la Peira se han observado costras de 3-4 m de potencia.
- Finalmente una zona donde las arcillas rojas son poco abundantes, y está mayoritariamente formada por limos. Esta zona se sitúa entre Esplugues, Cornellà i L’Hospitalet.

El paso entre todas estas subunidades se efectúa de forma gradual, mediante cambios laterales de facies.

Sedimentológicamente, los sedimentos pleistocenos así descritos tienen su origen en conos de deyección coalescentes, procedentes de los relieves montañosos adyacentes al llano, Montjuïc incluido. Los conos se habrían originado bajo un régimen pluviométrico torrencial, en un clima cálido y húmedo. El sistema de conos se habría implantado sobre el paleorelieve descrito anteriormente. Las arcillas, procedentes de la alteración del substrato, corresponderían a coladas de barro y se intercalarían con los depósitos torrenciales más detríticos.

Es probable que los limos sean en parte eólicos, y tendrían su origen en un medio frío y seco. Se considera que provienen de la deflación del viento sobre una zona fangosa y reseca del litoral, en momentos en que por oscilaciones glacioeustáticas, el nivel del mar era más bajo.

Por otro lado, las costras calcáreas se habrían formado en períodos áridos en los que predominaba la evaporación.

Geotecnia.

Los sedimentos pleistocenos de Barcelona presentan una morfología en pendiente suave en dirección al mar. Este hecho, juntamente con las aceptables características geotécnicas de los materiales, como se verá a continuación, hacen que en general pueda clasificarse este sector como muy favorable para las intervenciones arquitectónicas y de ingeniería civil. De hecho, es en este terreno donde se ha desarrollado históricamente la ciudad.

Por su importancia, se detallan a continuación los valores aproximados de los parámetros geotécnicos de cada nivel.

Arcillas rojas

La granulometría de estos suelos indica que se trata de sedimentos de grano fino, en los cuales generalmente el porcentaje que pasa por el tamiz N° 200 es superior al 80%. Sin embargo, frecuentemente hay intercalaciones detríticas de gravas, o bien nódulos calcáreos, que provocan un aumento de los clastos hasta proporciones del 50%.

La humedad es relativamente baja, del orden de $w = 12-20$, y en general es inferior al límite plástico. Así pues, el índice de consistencia es ligeramente superior a la unidad, lo que indica un estado sólido. Son arcillas que no muestran un comportamiento expansivo. Generalmente, son suelos no saturados, con grados de saturación comprendidos entre 0,5-0,8. La densidad natural es del orden de $1,95-2,10 \text{ Tn/m}^3$.

La plasticidad es de tipo medio, con valores del límite líquido comprendidos entre $LL = 30-45$, límite plástico entre $LP = 15-20$, e índices de plasticidad entre $I_p = 15-25$. En consecuencia, el suelo se clasifica como CL según la tabla de Casagrande.

La resistencia a la compresión simple está generalmente comprendida entre $q_u = 2,5-5,0 \text{ kg/cm}^2$. En ensayos de corte directo, consolidado y drenado, con saturación de la muestra, se obtienen los siguientes parámetros de resistencia al corte:

- Cohesión, $c = 0,2-0,5 \text{ kg/cm}^2$
- Angulo de fricción, $\Phi = 28^\circ$

El módulo de deformación se puede valorar entre $300-500 \text{ kg/cm}^2$.

En los ensayos edométricos se obtienen índices de poro del orden de $e_0 = 0,6$, y coeficientes de compresibilidad de $C_c = 0,1$. De todas formas son suelos claramente preconsolidados, probablemente por desecación y por carbonatación, cosa que los hace poco deformables. La preconsolidación implica que hasta que el terreno no experimenta presiones superiores a la de preconsolidación, que puede ser diversas veces la litostática, no empieza a deformarse significativamente. En consecuencia los asentamientos son reducidos y tolerables, incluso con cargas relativamente importantes.

Como consecuencia de todo lo expuesto, las arcillas rojas son un material favorable para cimentaciones directas mediante zapatas. Las cargas admisibles oscilan entre $q_a = 2,5-4,0 \text{ kg/cm}^2$, factor de seguridad de $F = 3$ ya incluido, si bien con frecuencia hay que reducirlas por la presencia de niveles inferiores limosos, más débiles.

Las arcillas rojas no presentan dificultades de excavación por los métodos convencionales, y en ellas se pueden conseguir alturas de 8-10 m en taludes verticales temporales, si bien la presencia de edificaciones vecinas, viales, etc., hacen reducir notablemente estos valores.

Limos y costras

Los limos del llano de Barcelona son, en todas sus características, de calidad inferior a la de las arcillas. La granulometría indica que entre un 70-90% del material pasa por el tamiz N° 200. El límite líquido se sitúa entre $LL = 20-30$, con un límite plástico entre $LP = 10-20$. El índice de plasticidad es de $I_p = 7-15$. Se clasifica, por lo tanto, como CL-ML.

La densidad natural es aproximadamente de $1,9-2,0 \text{ Tn/m}^3$. La humedad es cercana, a veces incluso superior, al límite plástico, y en consecuencia el índice de consistencia puede ser inferior a la unidad. Son suelos también parcialmente saturados, con características edométricas parecidas o ligeramente inferiores a las de las arcillas, si bien también claramente preconsolidados.

En la compresión simple, se obtienen valores del orden de $q_u = 1,5-2,5 \text{ kg/cm}^2$, y en los ensayos de corte directo, consolidados y drenados, con saturación de muestra, se obtienen valores del orden de:

- Cohesión, $c = 0,1-0,3 \text{ kg/cm}^2$
- Angulo de fricción, $\phi = 23-26^\circ$

La capacidad portante para cimentaciones directas, coeficiente de seguridad de $F = 3$ ya incluido, es del orden de $q_a = 1,5-2,5 \text{ kg/cm}^2$.

Los limos del llano de Barcelona son ligeramente menos resistentes que las arcillas, y además son más sensibles al agua. Se ha detectado, en casos extremos, una cierta tendencia al colapso, en el sentido geotécnico de generación de asentamientos adicionales al saturarse el terreno.

En relación a las costras calcáreas, son niveles muy duros, pero su irregularidad y reducida potencia aconsejan no cimentar directamente en ellos, ya que es muy frecuente que los limos infrayacentes presenten un contenido elevado de humedad, precisamente a consecuencia del nivel de costra, que impide la evaporación, de manera que sus características serán bajas, y una cimentación apoyada en el *tortorá* estará sometida al peligro de la rotura de éste, y entrada en carga de las capas inferiores poco resistentes.

Las costras son poco ripables, si bien, al ser de poco espesor, pueden a menudo extraerse con maquinaria convencional, si bien las dificultades pueden aumentar en la excavación de pantallas.

En las partes altas del llano de Barcelona, los estratos pleistocenos no son horizontales, sino que están ligeramente inclinados siguiendo el pendiente topográfico general o el paleorelieve del substrato. Así pues, una vez efectuada la nivelación del solar, si se llevan todos los elementos de cimentación a una misma cota, podrá darse el caso que unos apoyen sobre las arcillas rojas, mientras zapatas próximas reposen sobre los limos, menos resistentes. En esta situación se pueden generar asentamientos diferenciales, en función de las cargas actuantes, si bien, como se ha dicho antes, todos estos suelos están preconsolidados, y en general los asentamientos serán reducidos. Si es necesario, se deberá llevar todas las cimentaciones a un mismo estrato, o bien disponer de juntas de dilatación que aislen los movimientos respectivos.

Los sedimentos pleistocenos son favorables a la excavación de túneles, como se ha podido experimentar en la red de metro de la ciudad. La excavación del terreno es fácil, y la baja deformabilidad permite, en general, utilizar medidas razonablemente simples de sostenimiento. En cualquier caso, siempre se debe realizar un estudio detallado, y preveer medidas de control de las deformaciones en la superficie.

3.2.2. Holoceno. Los deltas de los ríos Llobregat y Besós. La franja litoral

Litología y estructura

Los deltas del Llobregat y del Besós, como todos los del Mediterráneo, son formaciones geológicas muy recientes, ya que se han formado después de la última glaciación, que comportó la elevación del nivel del mar en unos 100 m, hace unos 15.000 años.

Como resultado de este ascenso, los ríos comenzaron a depositar sedimentos en la desembocadura, que poco a poco fue progradando hacia el mar.

El esquema litológico de los dos deltas es, de muro a techo, el siguiente:

- *Nivel aluvial inferior*, de 5-10 m de potencia, formado por gravas rodadas y arenas con gravas, de origen fluvial, y que representan los sedimentos aluviales anteriores al delta. Son la sede de un acuífero cautivo, el acuífero profundo.
- *Nivel intermedio* de sedimentos de prodelta (cuña semipermeable que confina el nivel precedente). Son los sedimentos depositados en la parte sumergida del frente deltaico, y están constituidos por materiales finos: arcillas y limos, limos arenosos y arenas finas o limosas, generalmente grises. Este cuerpo sedimentario se acuña aguas arriba, y también lateralmente, hasta desaparecer en las zonas marginales interiores de los deltas.
- *Nivel detrítico superior*. Formado por arenas medias y gruesas, bastante limpias, que representan la sedimentación fluviodeltaica y litoral progradantes sobre los sedimentos del prodelta. Son la sede del acuífero superior, que normalmente es de tipo libre cuando no queda confinado por la unidad siguiente.
- *Nivel superficial*, formado por arcillas y limos que corresponden a la llanura de inundación deltaica. Son sedimentos de coloración marrón, si bien también incluyen los sedimentos depositados en las marismas asociadas al desarrollo deltaico, y que conducen a la deposición de arcillas grises, que presentan frecuentemente restos orgánicos.

La potencia de estos depósitos aumenta en dirección al mar. En la línea de costa alcanza los 70 m en el Llobregat y los 55 m en el Besós. Estos espesores corresponden a la base de las gravas del acuífero

profundo, que no siempre coincide con el techo del substrato precuaternario. Así, en el Llobregat, en las zonas centrales cercanas al mar, por debajo de las gravas y antes de las arcillas azules pliocenas, se encuentra el llamado complejo detrítico inferior, formado por niveles detríticos amarillentos, con intercalaciones arcillosas.

El nivel intermedio, tiene repercusiones geotécnicas distintas, según prevalezcan los sedimentos arcillosos o las arenas finas. En el primer caso, cuando el espesor acumulado de arcillas supera los 15-20 m, pueden generarse asentamientos importantes, si la superficie cargada es grande, lo que implica un bulbo de presiones profundo. Esta zona es relativamente pequeña en el Besós y mayor en el Llobregat.

Las arenas medias y gruesas del acuífero superior se encuentran, principalmente, hasta los 10-15 m de profundidad, y a partir de aquí pueden ya encontrarse cambios a sedimentos finos, ya sean arenas de grano fino, ya sean sedimentos limosos o arcillosos.

Las arcillas superficiales, de la llanura de inundación deltaica, son generalmente de coloración marrón. Sin embargo, en esta unidad también se incluyen arcillas y limos generados en zonas de marisma, siendo entonces su coloración gris. Su potencia no es homogénea. En el Llobregat su espesor es mínimo cerca de la costa, generalmente inferior a 2,5 m, mientras que en zonas interiores del delta, puede llegar a superar los 10 m.

En el Besós estas arcillas tienen una extensión lateral menor, pero en determinados puntos centrales del lóbulo derecho (Via Trajana, la Pau...) pueden superar los 15 m de potencia.

La zona marítima desarrollada entre los dos deltas está formada por sedimentos predominantemente arenosos, de aportación litoral. En esta franja debe incluirse todo el barrio de la Barceloneta, generado a partir del siglo XVIII por la sedimentación litoral de deriva, que fue alterada por el crecimiento del puerto.

De hecho, la evolución de la línea de costa a lo largo de los últimos dos milenios puede reconstruirse a partir de datos arqueológicos, geomorfológicos y palinológicos. En la época romana, las aguas bañaban la vertiente marina del Mont Tàber, y después el litoral seguía por la parte alta del actual Parque de la Ciutadella, hacia la zona de la calle de Pere IV y la carretera antigua de Valencia, a más de 1 km de las playas actuales.

A medida que la costa avanzaba, se generaron zonas húmedas o pantanosas, muchas de las cuales aún quedan registradas en la toponimia de la ciudad: el Clot, la Llacuna, el Gorg, etc. Las zonas de Ca l'Arana, la Ricarda o el Remolar son otras marismas aún existentes en el delta del Llobregat. El estanque del Port, situado al pie de Montjuïc, ya hace tiempo que también desapareció.

Entre Montjuïc y el Mont Tàber, aprovechando una depresión existente durante todo el Cuaternario, se instaló un complejo lacustre conocido hasta la baja Edad Media con el nombre del Cagalell. Probablemente, el Cagalell se formó después de la última fase glacial, hará unos 15.000 años, con la consecuyente elevación del nivel del mar, cuando una barra de arena litoral (bajo el monumento de Colón) cerró la bahía que se había formado entre Montjuïc y el Mont Tàber.

En esta marisma se depositaron lodos arcillosos de color gris o negro, debido a la abundante materia orgánica vegetal. Estos sedimentos se sitúan actualmente entre los 7-15 m de profundidad. Al pantanal iban a morir varias de las rieras que cruzaban la llanura de la ciudad: rieras de Valdonzella, de Magòria y de la Creu d'en Malla. Probablemente también fue desviado al Cagalell la de Collserola, que es la de la Rambla. Con el tiempo, los mismos arroyos y la acción antrópica fueron rellenando la marisma, por lo que ya no figura en los primeros planos de la ciudad, del siglo XVI.

Geotecnia

Los sedimentos deltaicos son geológicamente muy recientes, frecuentemente saturados de agua, por lo que puede preverse un comportamiento geotécnico relativamente mediocre, especialmente en los cuerpos arcillosos.

A continuación se describen las características geotécnicas de cada unidad.

Arcillas y limos superficiales de llanura de inundación

Son sedimentos de grano fino, habitualmente bastante homogéneos, con porcentajes superiores al 80% de partículas que pasan por el tamiz N° 200.

La densidad natural es del orden de $1,90-2,00 \text{ Tm/m}^3$. La humedad es media, del orden de $w = 15-25$, y en general muy cercana o superior al límite plástico, especialmente en profundidad. Son suelos no saturados en superficie, si bien su base se sitúa generalmente bajo el nivel freático, siendo entonces el grado de saturación del 100%.

La plasticidad es de tipo medio, con valores del límite líquido comprendidos entre $LL = 25-35$, límite plástico entre $LP = 15-20$ e índice de plasticidad de $Ip = 5-15$. En consecuencia, el sedimento se clasifica como CL en la tabla de Casagrande, si bien en ocasiones también hay niveles claramente ML.

La resistencia a la compresión simple generalmente varía entre $q_u=0,5-2,0 \text{ kg/cm}^2$, correspondiendo los valores elevados a los niveles superiores, no saturados. Esto se debe a que en superficie son suelos preconsolidados, probablemente por descenso del nivel freático y carbonatación incipiente. Al penetrar bajo el nivel freático tienden a ser suelos normalmente consolidados.

En ensayos de corte directo, consolidado y drenado, con saturación de la muestra, se obtienen parámetros de resistencia al corte del orden de:

- Cohesión, $c = 0,05-0,15 \text{ kg/cm}^2$
- Angulo de fricción, $\phi = 23-27^\circ$

En los ensayos edométricos se obtienen índices de poro del orden de $e_0 = 0,5-0,7$, a veces superiores, y coeficientes de compresibilidad de $C_c/(1+e_0) = 0,1$. El índice en recarga suele ser unas 10 veces inferior.

Como consecuencia de todo lo expuesto, estas arcillas son un material poco favorable para cimentaciones directas mediante zapatas. Las cargas admisibles son del orden de $q_a = 1,0 \text{ kg/cm}^2$, factor de seguridad de $F = 3$ ya incluido, lo que conduce a cimentar con losa, por lo que será necesario estudiar los asentamientos posteriores. Cuando la losa tampoco es viable se debe recurrir a cimentaciones que lleguen a las arenas infrayacentes, típicamente por medio de pilotes.

Las arcillas grises originadas en las marismas asociadas a la evolución deltaica son de propiedades geotécnicas más bajas. Su plasticidad y humedad es más alta, y a veces el terreno es de tipo CH. La materia orgánica puede ser del 2-5%, pero en algunos niveles, generalmente de pocos centímetros de espesor, el terreno puede adquirir un aspecto similar a la turba.

Lógicamente la compresibilidad de estas arcillas es más elevada, lo que hace más difícil la solución de cimentación. No obstante, en general siempre hay una zona de terreno preconsolidado, lo cual permitirá, en ciertas ocasiones, la viabilidad de cimentaciones superficiales (por ejemplo los edificios antiguos del Raval situados sobre el Cagalell).

Arenas del nivel detrítico superior.

Son arenas de grano de medio a grueso en general, y que en ocasiones contienen gravas rodadas. Son bastante limpias, con mucho cuarzo y bioclastos, subredondeados, con porcentaje de finos inferior al 10%. Su clasificación es de arenas SP, es decir arenas poco gradadas.

Constituyen un material granular altamente permeable, casi siempre saturado, de cohesión nula y ángulos de fricción, deducidos de correlaciones, del orden de $\phi = 32-36^\circ$.

Son sedimentos medianamente densos, con valores SPT comprendidos entre $N = 10-30$. Cabe señalar que para obtener valores SPT fiables, se debe corregir el valor SPT obtenido con un determinado sistema de golpeo, al que se obtendría con una energía prefijada, generalmente el 60% de la energía de caída libre de la maza.

En ensayos con penetrómetro estático, tipo piezocono, se obtienen valores de resistencia en punta de $R_p = 100-150 \text{ kg/cm}^2$, con lo que se pueden deducir módulos de deformación del orden de $250-500 \text{ kg/cm}^2$. Generalmente son arenas que experimentan dilatación al ser sometidas a tensiones de corte, de manera que la presión intersticial generada durante la penetración del piezocono disminuye respecto la presión inicial.

Cuando estas arenas son superficiales, se pueden proponer cimentaciones directas mediante zapatas o losas. En otras ocasiones, las arenas se sitúan bajo las arcillas precedentes, por lo que se plantean soluciones mediante pilotes. Se debe estudiar siempre la potencia de las arenas, ya que por debajo pueden haber arcillas o arenas limosas de las cuñas intermedias deltaicas, por lo que se pueden generar asentamientos en grupos de pilotes.

Arcillas y limos de la cuña intermedia del prodelta

Son arcillas y limos arcillosos de color gris, que alternan con arenas limosas, y tal y como se ha dicho anteriormente, sólo se encuentran en la zona central de los deltas, básicamente en el del Llobregat, ya que lateralmente y aguas arriba, y en gran parte del Besòs, cambian a facies de arenas finas grises, que tienen un comportamiento geotécnico diferencial, más cercano al descrito en el capítulo anterior.

Son arcillas de plasticidad media, con límite líquido entre $LL = 35-45$ y índice de plasticidad $IP = 15-20$. La humedad natural se sitúa entre $w = 25-35$ y, por lo tanto, es superior al límite plástico. Son arcillas siempre saturadas, con densidad aparente del $1,85-1,95 \text{ Tn/m}^3$. Su clasificación es de suelo tipo CL.

La resistencia a la compresión simple está comprendida entre $q_u = 0,5-1,0 \text{ kg/cm}^2$ al inicio de la capa. En profundidad, la resistencia al corte no drenado (c_u) aumenta según una ley de tipo $c_u = 0,20-0,25\sigma'$, donde σ' es la tensión vertical efectiva a la cota considerada. Estos valores son propios de sedimentos normalmente consolidados, o muy ligeramente preconsolidados.

En los ensayos de penetración estática con piezocono se obtienen resistencias en punta de $7-10 \text{ kg/cm}^2$ al inicio, que aumentan en profundidad. A $30-40 \text{ m}$ bajo la superficie los valores son del orden de 25 kg/cm^2 .

En este tipo de ensayos, la presión intersticial que se genera al penetrar los niveles arcillosos es superior a la hidrostática, y se obtienen valores de índice de presión de poros diferencial (DPPR) del orden de $0,5$. Esta sobrepresión que tiene lugar en las arcillas, en contraste con el efecto provocado en las arenas, permite efectuar con los piezoconos una estratigrafía muy detallada, que facilita la identificación de niveles de pocos centímetros de grosor, importantes en el cálculo de asentamientos, y que frecuentemente pasarían inadvertidos en sondeos convencionales.

En ensayos de disipación de la presión intersticial, en piezoconos, se obtienen valores del coeficiente de consolidación horizontal de $C_h = 0,01-0,05 \text{ cm}^2/\text{s}$.

En edómetros cargados hasta las presiones habituales de $10-12 \text{ kg/cm}^2$, se obtienen valores de preconsolidación que pueden inducir a considerar el sedimento como infraconsolidado, mientras que si el ensayo se lleva hasta los 40 kg/cm^2 (o hasta obtener índices de poros de $0,45 * e_0$), se obtiene la rama realmente virgen de C_c , con valores del parámetro $C_c/(1+e_0) = 0,1$, y conclusiones de terreno normalmente consolidado, o de ligera preconsolidación.

Esta ligera preconsolidación, en las zonas más profundas, puede atribuirse al efecto de descenso del nivel piezométrico a que ha estado sujeto el acuífero cautivo profundo.

En los edómetros se obtienen coeficientes de consolidación, en general, más pequeños que en los ensayos de disipación de los piezoconos, entre otras cosas porque en los primeros el coeficiente es vertical y el terreno es anisótropo. En el conjunto de la unidad prodeltaica abundan las intercalaciones centimétricas de niveles de limos arenosos, con lo que los coeficientes de consolidación globales son más altos, y por lo tanto la velocidad de los asentamientos más elevada, y estos mismos más reducidos.

Esta unidad de arcillas de antiguos prodeltas no aflora nunca a la superficie en zona terrestre, ya que está siempre recubierta por las arenas de la unidad detrítica superior. En cambio, constituyen directamente el fondo marino del prodelta actual, hasta cotas de -70 m , en buena parte de la costa del delta del Llobregat, como han puesto de manifiesto en los sondeos de ampliación del puerto.

Geotécnicamente esta unidad es muy importante, ya que puede generar asentamientos significativos en estructuras cimentadas superiormente, especialmente si se trata de grandes superficies, donde el bulbo de tensiones es lógicamente profundo.

En algunos casos se ha recurrido a cimentaciones muy profundas, con pilotes de 45 m que han atravesado todas las arcillas de la cuña intermedia. De todas formas, hacia la costa el grosor de estas es aún superior, siendo este tipo de solución poco viable.

Con frecuencia se utilizan mejoras del terreno, por medio de precargas. Cuando esta solución se aplica, deben controlarse adecuadamente los asentamientos producidos, y su ritmo, así como también la evolución de las presiones intersticiales generadas. En consecuencia, este tipo de medidas han de ir acompañadas de un control con piezómetros y extensómetros.

En las obras portuarias que involucran estos sedimentos, debe tenerse en cuenta la posibilidad de roturas globales, ya que su resistencia es baja respecto las tensiones que pueden llegarse a generar.

3.3. Rellenos antrópicos recientes

En cualquier punto de la ciudad pueden encontrarse materiales de relleno artificial, producto de vertidos, con frecuencia incontrolados y por lo tanto no compactados, y que en consecuencia pueden ser origen de asentamientos importantes, cuando no de roturas globales de cimientos.

Un caso particular de relleno, lo forman los terraplenes construidos en autopistas y otras estructuras viarias. También constituyen un caso particular de relleno los muelles del puerto y los terrenos ganados al mar, rellenos hidráulicos incluidos.

Gran parte de los rellenos corresponden a la colmatación de excavaciones en antiguas labores extractivas, y también al terraplenado del lecho de antiguas rieras. De ahí el interés en cartografiar las antiguas zonas de extracción y los torrentes.

En relación a las zonas extractivas, se pueden clasificar en tres grandes tipos: canteras, graveras y bóvilas.

Canteras

Las canteras han sido numerosas en la área cartografiada, y de ellas se ha extraído roca que ha sido utilizada frecuentemente como material de construcción. La arenisca de Montjuïc ha suministrado gran parte del material pétreo de los edificios antiguos de la ciudad. Las canteras de Montjuïc han estado en actividad desde épocas preromanas hasta 1957, y el volumen global de roca extraída es de varias decenas de millones de metros cúbicos.

Los frentes de las canteras tenían a veces más de 30 m de altura. Algunas han quedado vacías, como la de la Fuxarda, por ejemplo, o han sido aprovechadas de diversas formas, como la de Maginet (Teatre Grec), o el monumento a Lluís Companys en la cantera de Moragues.

Muchas otras han sido usadas como a vertederos de basura de la ciudad, hasta que en el año 1971, una gran alud de residuos colapsó parte de las edificaciones de Can Clos. Poco después se abrió el vertedero del Garraf.

La antigua cantera de Safont fue utilizada como vertedero, y después se construyó encima el estadio Serrahima. Sus instalaciones sufrieron durante muchos años procesos de asentamientos y emanaciones de gases inflamables, que incluso provocaron dos accidentes mortales.

En la vecina cantera del Marbre, se vertieron más de 30 m basuras, la presencia de las cuales, con los problemas de generación de gases asociados, obligaron a un cambio de emplazamiento del Palau Sant Jordi hacia un sector con menos grosor de residuos, que fueron extraídos y substituidos por terraplenes de tierras compactadas.

El material de desecho de las canteras, una mezcla no compactada de fragmentos rocosos con matriz arenosa y limosa, era vertido a otros fosos, como el que corresponde al actual barrio del Polvorí, y que ha obligado a una cimentación especial de los nuevos bloques de viviendas.

Las de Montjuïc no han sido las únicas canteras de la ciudad. Así, las calizas devónicas de los Serrats de la Rovira también han sido objeto de explotación, al igual que numerosas canteras de extracción de pizarra, dispersas por estos cerros y por la serra de Collserola. También han sido explotados los afloramientos de granito existentes al pie de Collserola y al norte de Santa Coloma de Gramenet.

Citaremos finalmente las canteras de calizas que explotan las colinas triásicas de Badalona. También deben citarse las canteras de calizas devonianas de Santa Creu d'Olorda y la del turó de Montcada.

Graveras

En la franja litoral, y también en los deltas del Besós y del Llobregat, han sido frecuentes las extracciones de áridos para la construcción, básicamente arenas y gravas.

Estas graveras solían usar dragas para excavar por debajo del nivel freático, y los fosos resultantes han sido rellenados con materiales diversos, con frecuencia poco adecuados, y que casi nunca se han compactado.

Así, por ejemplo, en la zona litoral de Badalona son frecuentes los rellenos de extracciones de arena, de hasta 5-6 m de grosor. En el Llobregat estas actividades han sido más numerosas, y en muchos lugares el relleno se ha efectuado con basuras. Esta práctica ha conducido a situaciones contaminantes altamente perjudiciales, ya que hay un contacto directo entre los residuos y las aguas subterráneas.

Las consecuencias geotécnicas de esta situación también han sido muy desfavorables, ya que han provocado asentamientos en tramos de la autopista A-16 o en la Ronda Litoral, habiéndose recurrido a compactaciones dinámicas. (En esta zona las basuras se vertieron en un antiguo lecho del río, que fue desviado para impedir inundaciones en Cornellà).

Bóvilas.

Las arcillas pleistocenas del llano de Barcelona han suministrado durante muchos años la industria de la cerámica. Especialmente importantes han sido las de Hospitalet, y también las existentes en el barrio de las Corts, y otros lugares de la ciudad.

Las excavaciones generadas, como en los casos anteriores, también han sido rellenados con materiales no compactados.

El gran problema geotécnico de estos rellenos es que al tener una estructura muy abierta, tienden al colapso, es decir, que pueden generar asentamientos si se saturan, incluso con ausencia de cargas externas.

Relleno de rieras.

El último caso singular de generación de rellenos son los efectuados para nivelar el lecho de antiguos arroyos, eliminando los desniveles entre sus márgenes. Las rieras solían ser más profundas en la zona de cabecera, por lo que la mayor parte de estos tipos de relleno se sitúan en el curso alto de los torrentes.

Como puede intuirse por la realidad histórica, las tierras aportadas no han sido compactadas adecuadamente, con los problemas geotécnicos ya citados.

Algunos casos significativos son el torrente de la Font Santa, el torrente de Esplugues o el torrente de Canyelles en la Guineueta, entre otros. También se pueden citar las rieras de Can Gomis, el torrente de Agudells o la riera de Sant Genís.

4. HIDROLOGIA DE BARCELONA.

4.1. La red hidrográfica antigua. Las rieras.

Los cursos básicos de agua de la zona son el Llobregat y el Besós, con sus importantes llanuras deltaicas, que ya se han analizado anteriormente. Entre los dos ríos, la llanura de la ciudad está cruzada por una red hidrológica menor: los torrentes o rieras.

En el capítulo precedente se ha citado una de las repercusiones geotécnicas de estas rieras: la posible presencia de rellenos realizados para nivelar el terreno. Además, conocer la posición de antiguas rieras también es importante porque, a veces, pueden haber sedimentos fluviales poco consolidados asociados a su lecho, o bien niveles freáticos relacionados con estos sedimentos y la dinámica hidrogeológica antigua del torrente.

Sin embargo, la importancia geotécnica de las rieras se ha sobrevalorado frecuentemente y, de hecho, la experiencia indica que en muchos casos, sobretudo en los cursos bajos y medios de los torrentes, su presencia en términos geotécnicos es anecdótica.

La posición de las rieras en el pasado ha sido origen de controversia entre los estudiosos del tema, ya que la red hidrográfica no ha sido estable a lo largo de los tiempos históricos, y mucho menos durante los tiempos geológicos. Las conclusiones que aquí se exponen corresponden a situaciones de funcionalidad entre la época romana y mediados del siglo XIX.

En los primeros trabajos publicados sobre la materia, los lechos de los torrentes se situaban en todo momento, como parece lógico, en zonas topográficamente deprimidas del terreno. Pero, recientemente, los avances en el conocimiento de la dinámica de los cursos torrenciales asociados a conos de deyección, permite elaborar hipótesis en que el curso del torrente ha quedado, en parte a causa de la acción antrópica, sobreelevado respecto el terreno que lo rodea.

Un cono de deyección puede formarse en el momento en que un torrente que sale de una zona montañosa o que salva un talud, entra en una zona llana, como es el caso del talud entre la llanura de piemonte y las llanuras deltaicas. En estos conos, los cursos de agua, que circulan sobre sus propios sedimentos, presentan periódicamente divergencias y cambios de dirección. Estos pequeños desbordamientos suelen ser perjudiciales para la actividad humana, por lo que se intenta contener las aguas del torrente mediante diques. Con el tiempo, a base de encauzamientos, las aguas del arroyo acaban circulando por una especie de loma más elevada que los terrenos circundantes. Esta teoría, propuesta por O. Riba para la riera de Horta y la Rambla, ha sido también aplicada a otros cursos, como la riera de Sant Andreu.

A grandes rasgos, la red hidrológica del llano de Barcelona, a parte de los torrentes que cruzan Esplugas y Cornellá, o de los que cruzan Badalona, está formada por dos grandes cubetas, con una zona central jerárquicamente menos organizada.

La cubeta occidental corresponde a la cuenca de la Riera Blanca, que recoge las aguas de los torrentes de Sarriá, Sant Gervasi, las Corts y Sants. En el otro extremo de la ciudad, la riera de Horta drena los relieves de Vall d'Hebron, Horta, etc. Cabe decir que, estas dos grandes cuencas actuales han perdurado probablemente durante todo el Cuaternario, ya que el paleorelieve anterior a este período así lo indica.

La parte central de la ciudad está cruzada por una serie de rieras de dimensiones más reducidas, pero históricamente muy importantes, de las cuales se citan la de Valldonzella, la de Magòria, la de la Creu d'en Malla, la de Malla o de Collserola (es la de la Rambla, que procede de la unión de las rieras de Sant Gervasi y de Vallcarca), el torrent de l'Olla (que ya bajaba por el lado norte del Mont Tàber) y los de Mariner, del Notari y del Bogatell (que llevaban sus aguas hacia el actual Poble Nou).

Más allá de la de Horta, hay la riera de Parellada y la de de Sant Andreu, entre otras.

4.2. Las aguas subterráneas

El subsuelo de la ciudad es la sede de numerosos acuíferos, alguno de ellos muy importante, tanto desde el punto de vista del suministro histórico de agua a la ciudad, como también por los problemas hidrológicos y geotécnicos que plantea su presencia.

Se describen a continuación las diferentes unidades geológicas que constituyen acuíferos, y después se expone la piezometría de la ciudad, así como también un breve análisis de los problemas geotécnicos asociados.

Materiales acuíferos

Paleozoico

Las rocas sedimentarias y metamórficas paleozoicas pueden albergar algunos acuíferos, generalmente de extensión e importancia reducida.

Las pizarras, filitas, esquistos y otras rocas metamórficas son en general poco permeables, su permeabilidad es por fisuración, a través de los planos de diaclasas u otras discontinuidades. Sin embargo, es relativamente frecuente que en las zonas más superficiales, y por lo tanto más alteradas de la roca, puedan haber pequeños flujos de agua, a veces captados por las antiguas minas de agua que se adentraban en la roca y que en ocasiones llegaban a recorridos lineales de algunos kilómetros.

Las calizas devónicas también pueden tener pequeños acuíferos, con procesos cársticos asociados. De todas formas, los niveles de calizas están siempre fuertemente plegados, i afloran generalmente en

sinclinales, lo que provoca que su extensión lateral sea reducida. En el contacto entre las calizas y los niveles pizarrosos subyacentes, en general menos permeables, se pueden generar fuentes.

El granito duro es muy poco permeable, pero cuando se altera a sauló, puede contener pequeños acuíferos con permeabilidad por porosidad.

Terciario

En Montjuïc son frecuentes las fuentes situadas en el contacto entre las areniscas, más o menos fracturadas, o los niveles arenosos poco cementados, y las arcillas margosas subyacentes (font del Gat, font dels Tres Pins).

Por lo que se refiere al plioceno, aquí se encuentra ya el primer acuífero realmente importante de la ciudad. En efecto, las arenas amarillentas o verdosas de la parte superior de la serie pliocena constituyen un medio acuífero poroso, bastante permeable, y con una extensión lateral amplia en el subsuelo de la parte central de la ciudad.

En la zona del Eixample, bajo la cobertura de sedimentos arcillosos cuaternarios se encuentran estas arenas, que, a su vez, descansan sobre las margas azules que forman su base impermeable.

Cuaternario. Llanura de piemonte.

Las arcillas rojas, con gravas y niveles de gravas de pizarra, de la planicie de piedemonte pleistocena, no es un depósito impermeable, ya que la abundante fracción detrítica gruesa, que en ocasiones forma verdaderas capas, le otorga una permeabilidad no despreciable, como se ha puesto de manifiesto con las obras de excavación del Teatre del Liceu.

La mayor parte de la recarga de los acuíferos de la llanura central de la ciudad provienen de pérdidas en la red de abastecimiento. Otros factores como la infiltración de lluvia, pérdidas en la red de alcantarillado o infiltración de agua de riego en parques y jardines, son mucho más reducidos. Cabe destacar que la red de abastecimiento registra pérdidas por fugas de un 20% del agua distribuida, valor que, si bien puede parecer alto, es menor al de otras ciudades europeas de características comparables a Barcelona, en las que las pérdidas son hasta del 50%.

Cuaternario. Deltas

Las gravas profundas que forman la base de los deltas del Besós y del Llobregat, y también la capa de arenas superiores, constituyen dos acuíferos muy importantes, con un volumen de almacenamiento notable, y una permeabilidad y transmisividad también muy elevadas.

En general, se pueden diferenciar dos acuíferos, que, aguas arriba de los deltas, donde la cuña de arcillas y limos del prodelta desaparece, se unifican en uno solo.

El acuífero superior es en general de tipo libre, si bien a veces las arcillas superficiales pueden causar un efecto de confinamiento. Por otro lado, el acuífero profundo es de tipo cautivo, confinado por el acuitardo relativo de las arcillas ya citadas de la cuña intermedia.

Piezometría. Problemática geotécnica

Las isopiezas del nivel freático se elevan tierra adentro, indicando flujos del agua subterránea aproximadamente perpendiculares a la línea de costa y a los límites deltaicos laterales.

La posición del nivel freático no ha sido constante a lo largo del tiempo, ni tampoco lo será en el futuro. Sirva de ejemplo que los acuíferos deltaicos eran artesianos a principios de este siglo, es decir, que su línea piezométrica era superior a la cota topográfica del terreno, de manera que cuando un pozo perforaba el acuífero, el agua salía a superficie sin necesidad de bombeo.

A lo largo del siglo XX, la progresiva industrialización de los deltas, con la consiguiente construcción de pozos que implicaban volúmenes de extracción globales superiores a la recarga de los acuíferos, modificó artificialmente la posición del nivel freático, hasta situarlo en muchos puntos por debajo del nivel del mar. En determinados momentos, la dirección natural de flujo se invirtió, y el agua salina penetró en los deltas, con la consecuente salinización de las aguas subterráneas.

En los últimos años se ha producido un ascenso del nivel freático en algunos sectores de Barcelona, proceso que ha supuesto la inundación de sótanos que en su momento fueron excavados en terreno seco, o incluso ha causado filtraciones perjudiciales en diversos tramos del Metro.

Es este un proceso conocido desde principios de la década de los ochenta y sus causas son claras, ya que el ascenso del nivel freático obedece a la recuperación de unos niveles iniciales, que fueron artificialmente deprimidos, desde primeros de siglo hasta la década de los setenta. El descenso máximo se produjo hacia 1975, fecha en la que en algún punto del Llobregat, el nivel freático se situó a 10 m por debajo del nivel del mar. Debido a la intrusión salina ya citada, y también por otras causas, entre ellas la crisis económica, muchos bombeos se abandonaron, con lo que los niveles se empezaron a recuperar, iniciándose así los problemas geotécnicos ya citados.

Resulta complejo predecir la evolución de este ascenso en el futuro, ya que en definitiva hay muchos parámetros que intervienen y que son difíciles de conocer *a priori*: nuevas tasas de extracción o recarga, interacción con infraestructuras subterráneas, etc.

Dentro de los diversos escenarios de futuro estudiados, en un trabajo efectuado por el Ayuntamiento, la UPC y CLABSA, se prevé que de aquí al 2017, el nivel freático podría subir aún en los deltas una magnitud entre 0-2 m, y entre 2-3 m en la parte central de la ciudad.

Por ello se ha de ser muy prudente en la construcción, y se deben adoptar medidas preventivas en todas las obras que se sitúen a poca distancia del nivel freático.

Una problemática hidrogeológica diferente, la constituyen aquellas obras, cada vez más frecuentes, que al tener un número considerable de sótanos, suponen una excavación importante por debajo del nivel freático, como por ejemplo: el complejo de Diagonal Mar, el edificio inteligente del parking de la Rambla, el Liceu o el centro Hipercor a Cornellá, así como el complejo comercial Gran Vía, en el polígono Pedrosa

Cuando en el subsuelo, bajo el acuífero a excavar, hay un estrato arcilloso impermeable, se puede pensar en la realización de pantallas perimetrales profundas (a veces se han proyectado de más de 60 m). En estos casos debe recurrirse a un descenso del nivel freático mediante sistemas de bombeo, y en todo momento debe considerarse el efecto de las subpresiones sobre las estructuras, el posible sifonamiento del terreno y las consecuencias que la depresión del nivel freático puede causar en las edificaciones vecinas. Un caso peligroso es cuando por debajo del acuífero en bombeo, hay una capa impermeable de poco espesor, y a continuación otro nivel acuífero que conserva toda su presión.

5. APLICACIÓN DEL CD ROM EN LA PROGRAMACIÓN DE UNA CAMPAÑA DE SONDEOS.

Uno de los problemas a los que se enfrenta una empresa geotécnica o ente público en la confección de ofertas y pliegos de bases para grandes infraestructuras subterráneas, obra pública o de edificación, en el apartado de geotecnia, es el de hacer un buen dimensionamiento de las partidas unitarias por materiales (suelo, roca, grava etc.) que se van a atravesar durante la perforación.

El coste de perforación de cada material varía significativamente en función de las dificultades técnicas (por ejemplo necesidad de entubación), el tiempo de trabajo requerido y otros factores intrínsecos de cada una de ellos (profundidad del nivel freático, logística de perforación, etc.).

Así mismo el tipo y número de ensayos in situ y de laboratorio que se deben realizar depende en parte de los materiales geológicos, así como de la cantidad de metros lineales perforados de cada uno de ellos.

Debido a estos factores es de gran ayuda disponer de una buena herramienta para realizar estimaciones fiables previas de la geología del subsuelo, que permita aproximarse razonablemente a los costes finales de una campaña.

El Mapa Geotécnico de Barcelona se utilizó para realizar una previsión de los costes, metros lineales de materiales geológicos y número y cantidad de ensayos que se esperaban realizar durante la campaña de sondeos de la fase preliminar del proyecto de la línea 9 del Metro de Barcelona.

La línea 9 tiene una longitud de más de 45 Km se divide en cuatro tramos y atraviesa la mayoría de formaciones geológicas de Barcelona desde el aeropuerto del Prat de Llobregat a Santa Coloma de Gramanet y Badalona (fig. 2).

Durante los meses de agosto a diciembre del 2000 se realizó una campaña de 101 sondeos para el estudio geotécnico del anteproyecto de la línea 9, por encargo de ATM (Autoritat del Transport Metropolità). Posteriormente, durante los meses de enero a mayo del 2001, en la fase de proyecto constructivo del tramo cuarto, se realizó una nueva campaña de 39 sondeos por encargo de GISA (Gestió de Infraestructures S.A.) que se sumaron a los ya realizados.



Figura 2. Traza de la Línea 9 del Metro de Barcelona.

Con la ayuda de los mapas que se visualizan en el CD, la memoria descriptiva y las columnas litológicas del Mapa Geotécnico cercanas al trazado de la línea en estudio, se levantaron columnas estratigráficas virtuales y se hicieron cortes geológico-geotécnicos del trazado de la línea, a partir de los cuales se planteó y diseñó la campaña de investigación geotécnica.

Una vez finalizada la campaña se ha realizado el estudio comparativo para validar la bondad del Mapa Geotécnico.

La comparación de los costes de perforación estimados, con los realizados durante la campaña, se ha efectuado contabilizando los metros lineales de materiales previstos con el Mapa Geotécnico en cada uno de los puntos donde se iba a realizar un sondeo real.

Los materiales, en cada uno de los tramos, se han clasificado en cuatro grupos en función del coste de perforación: suelos, gravas y bolos, roca blanda y roca de alta dureza (fig. 3).

En el tramo 1, con 206 m de sondeo, la diferencia entre los materiales estimados y los reales, es solo de 3,1 m en suelos y en gravas. Esta diferencia tan pequeña es debida a que el tramo transcurre por la zona del delta del Llobregat, donde la potencia y la continuidad lateral de los depósitos es muy constante. En este tramo sólo se han contabilizado 5 sondeos debido a que la mayor parte del tramo está situado fuera de la influencia del Mapa Geotécnico.

En el tramo 2, situado entre las unidades del delta del Llobregat y el llano de Barcelona, se han perforado alrededor de 1000 m de sondeo. Las diferencias se encuentran en los suelos y la roca blanda con desviaciones inferiores a los 170 m entre los metros lineales estimados y los reales. Las gravas se ajustan bien.

En el tramo 3, que corta principalmente rocas metamórficas e ígneas de la Serra de Collserola, se han realizado casi 1.500 m de testigo. La previsión de perforación en roca es buena si se suma los metros de roca blanda y dura. No obstante, las diferencias se manifiestan si se distingue entre roca dura y roca blanda (217 m de desviación en roca blanda y 133 m en roca dura).

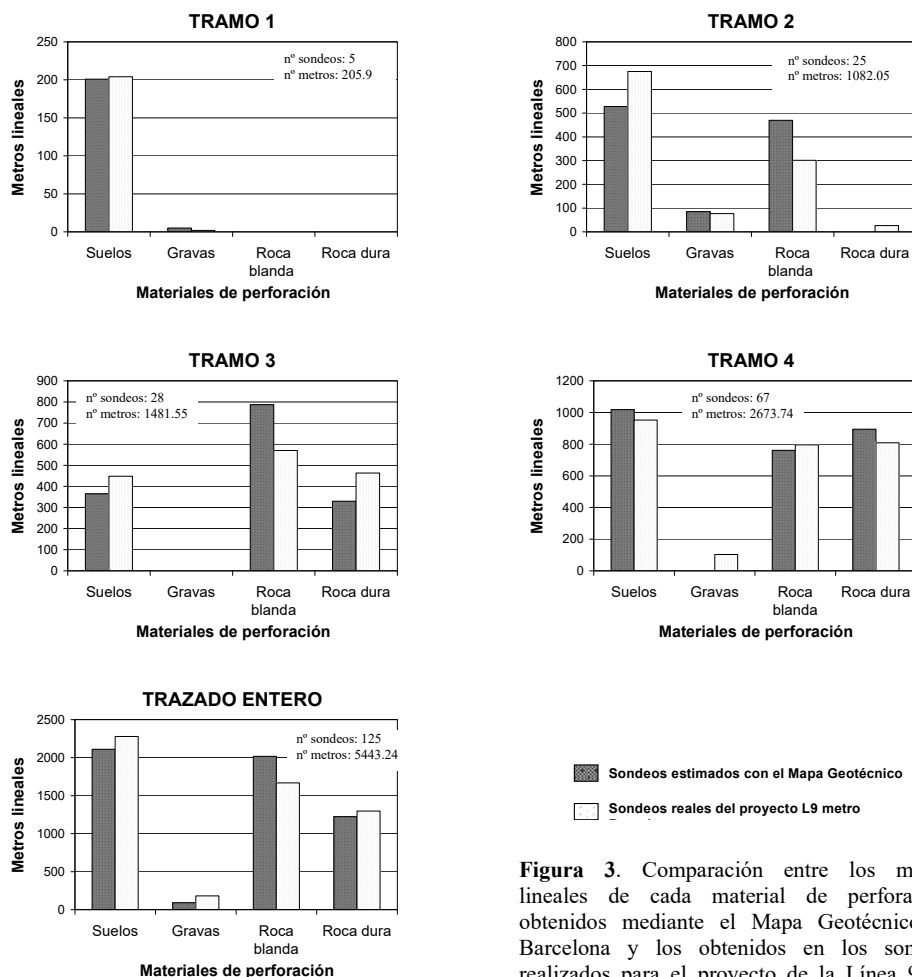


Figura 3. Comparación entre los metros lineales de cada material de perforación, obtenidos mediante el Mapa Geotécnico de Barcelona y los obtenidos en los sondeos realizados para el proyecto de la Línea 9 del Metro de Barcelona.

El tramo 4 es el más representativo y actualmente es el más estudiado ya que además de haberse contabilizado 2.674 m de sondeo, se perforaron todos los materiales característicos de la geología de Barcelona. En 952 m de perforación de suelo, 796 m de roca blanda y 808 m de roca dura, la desviación entre la previsión y la realidad es inferior a 80 m. La mayor diferencia radica en la existencia de 103 m de gravas que no se habían previsto.

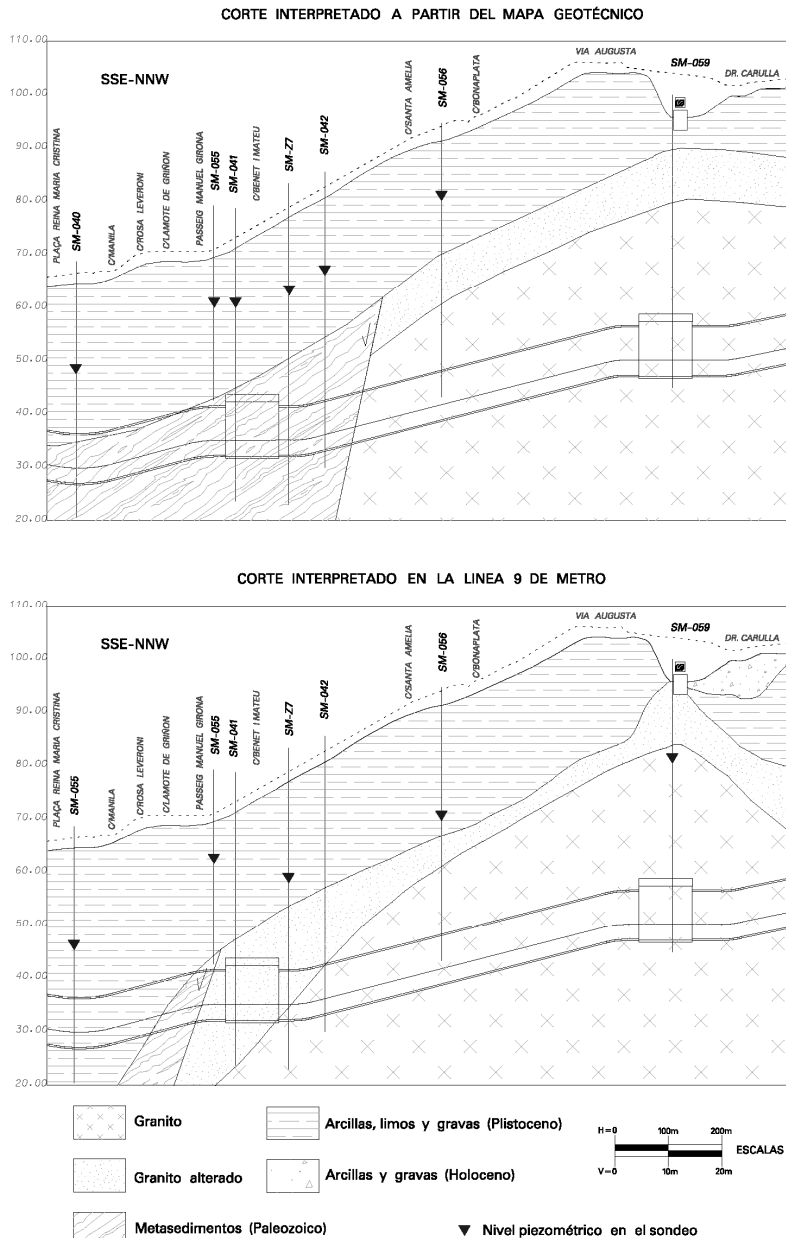


Figura 4. Perfiles Geotécnicos de la Línea 9 del Metro de Barcelona.

Contabilizando el total de los sondeos, con 5.544 m de testigo perforados, se concluye que hay una buena previsión en suelos y roca dura, con un error inferior al 8 %, en cambio aunque con solo 181 m de gravas el error aumenta hasta el 50 %.

Como ejemplo aplicado se compara el perfil geológico deducido de sondeos virtuales efectuados en el CD, con el perfil final realizado con sondeos reales (fig. 4). Para complementar la interpretación es importante consultar las columnas litológicas de los sondeos mecánicos representativos más cercanos al perfil, que nos muestra el Mapa Geotécnico. Gracias a estas columnas litológicas se puede interpretar, por ejemplo, la existencia de un perfil de alteración en el granito.

La coincidencia entre los dos cortes es bastante notable en sus líneas generales, excepto por el mayor recubrimiento cuaternario en el sector sur, y la variación en la posición del contacto entre los metasedimentos paleozoicos y el granito.

A partir de este caso práctico, se concluye que el Mapa Geológico ofrece una primera visión bastante fiable sobre la cual plantear una campaña de estudio del subsuelo de Barcelona. Permite hacer una buena valoración del tipo de terreno que nos podemos encontrar y planificar adecuadamente los estudios geotécnicos para obras públicas y de edificación.