

## Capítulo 1: Introducción y objetivos

### 1.1 Introducción

#### 1.1.1 Historia de los túneles

Por diversas razones los animales escarban y cavan en el interior de la tierra: para encontrar agua, para conseguir alimento, para fabricarse un hogar o para esconderse y ocultarse del peligro.

El hombre también excava con estos mismos propósitos y algunos de diferentes, propios de su naturaleza. La perforación de túneles fue el primer ejercicio de ingeniería llevada a cabo por el hombre. La ampliación de la cueva en la que vivía el hombre primitivo resultaba una operación inmediata para una criatura capaz de un pensamiento lógico. Así lo atestiguan los restos localizados de víctimas debido al colapso en la construcción de galerías en la Edad de Piedra.

El descubrimiento accidental de depósitos de agua y de minerales durante las operaciones de extensión del hogar, indujeron a los hombres a perforar con ese propósito y, así, de forma gradual la perforación de los túneles se fue desarrollando pasando desde una etapa en la que el instinto animal era predominante a otra más evolucionada, convirtiéndose en un Arte (Luís Medina Rodríguez, 1999).

Ahora bien, la historia de los túneles adquiere una dimensión y un ritmo especial con el nacimiento del Ferrocarril Metropolitano que se inicia en 1863 con la apertura del tramo Bishops Road-Farringdon Street (5,6 km de longitud, con 5,10 m de altura y 8,60 m de ancho) de lo que posteriormente sería el Metro de Londres (Figura 1).



Figura 1. Metro de Londres.

Al metro de Londres le siguió el de Glasgow en 1886, Budapest (1896), Boston (1898), París (1900), Berlín (1902), Madrid (1919), Atenas (1920) y así un gran número más.

No fue hasta el 1924 cuando se inauguró el primer tramo de la actual línea 3 del metro de Barcelona, entonces llamado Gran Metropolitano de Barcelona que unía *Plaça de Catalunya* con *Plaça Lesseps*.

Con la construcción del túnel de Seikan, entre las islas japonesas de Honshu y Hokkaido, se ha abierto una nueva etapa en la construcción de túneles. Fue inaugurado en 1983 y su longitud es de 53,8 km, de los cuales 23 km transcurren bajo el estrecho de Tsugaru. Para la construcción se emplearon 8 tuneladoras de 14 m de diámetro.

La nueva etapa a la que se ha hecho referencia se caracteriza por los grandes progresos técnicos acaecidos, especialmente en las máquinas tuneladoras (Tunneling Boring Machines, o abreviadamente TBM's), con una capacidad para soportar altas presiones en el frente de trabajo, lo que ha permitido acometer obras impensables en épocas no muy lejanas, como el túnel de La Mancha.

En la actualidad, las nuevas tecnologías abren inmensas posibilidades a la construcción de túneles y obras subterráneas; la robótica, por ejemplo, aplicada en todo el sistema de trabajo de perforación está abriendo ya una nueva y revolucionaria página en el Arte de la Ingeniería Subterránea. Las tendencias generales, de cara al futuro, son una mejora en los rendimientos, en la seguridad, en la precisión y en la organización del trabajo.

El futuro del túnel es inmenso; algunos de los últimos logros (o futuros logros) tienen una gran significación no solo técnica sino social y cultural; el túnel de Seikan, el Eurotúnel o el ya imaginado túnel del Estrecho de Gibraltar.

En el desarrollo del Urbanismo Subterráneo, en áreas cada vez más pobladas y con menos disponibilidad de espacio en superficie, su desarrollo será imprescindible. Proliferan las obras subterráneas transitables, los túneles para abastecimiento y evacuación de aguas, las conducciones en plantas hidroeléctricas subterráneas, etc.

Tampoco puede dejar de mencionarse, por su incipiente e indudable provenir, otras aplicaciones de la solución bajo tierra como son, por ejemplo, los depósitos subterráneos de agua potable, los recintos deportivos subterráneos y las piscinas bajo tierra, como las escandinavas, con una finalidad adicional de refugios en casos de emergencia.

Atrás han quedado los tiempos en que Dante, en un pasaje de su Divina Comedia, colocaba un cartel, en la entrada de una cueva, en la que decía: "¡Oh vosotros los que entráis, abandonad toda esperanza!" (Luís Medina Rodríguez, 1999).

### **1.1.2 Construcción de túneles mediante la utilización de escudos de presión de tierras (EPB)**

Es necesario indicar, por muy elemental que parezca, que los túneles o excavaciones subterráneas en terrenos o suelos blandos no tienen nada que ver con los túneles en roca, puesto que los problemas y la tecnología para resolver la ejecución de unos y otros es muy distinta.

Así mismo, tampoco es comparable la construcción de túneles en suelos, cuando éste se realiza en zonas urbanas o a campo abierto, puesto que en el segundo caso no es tan importante la subsidencia provocada, como en el primer caso, en el que la ejecución puede inducir asentamientos o movimientos horizontales que provoquen desperfectos en los edificios o instalaciones próximas.

Todo esto es más importante si se piensa que la mayoría de los túneles en terrenos blandos o sueltos son túneles urbanos y, a su vez, la mayoría de estos túneles es necesario ejecutarlos en suelos, debido a que la mayoría de las grandes ciudades se asientan en las orillas de los ríos, con las características geológicas y geotécnicas que esto supone.

Además, este tipo de túneles tiene el problema añadido de la rigidez del trazado en planta y alzado, por edificios en superficie, construcciones subterráneas existentes, lechos de ríos, además de la dificultad provocada por los niveles freáticos, susceptibles de ser rebajados por el efecto drenaje, que la construcción del túnel provoca.

Por estas causas y por la actual concienciación de la sociedad frente a los accidentes laborales, uno de los métodos más extendidos para realizar túneles urbanos en materiales blandos es la utilización de los Escudos de Presión de tierras, también conocidas como EPBS (*Earth Pressure Balance Shield*).

Un escudo normalmente consta de las siguientes partes (Figura 2): cabeza o elemento excavador, el cuerpo de mando y controles, los cilindros o gatos de empuje y el erector de dovelas y el *back-up*.

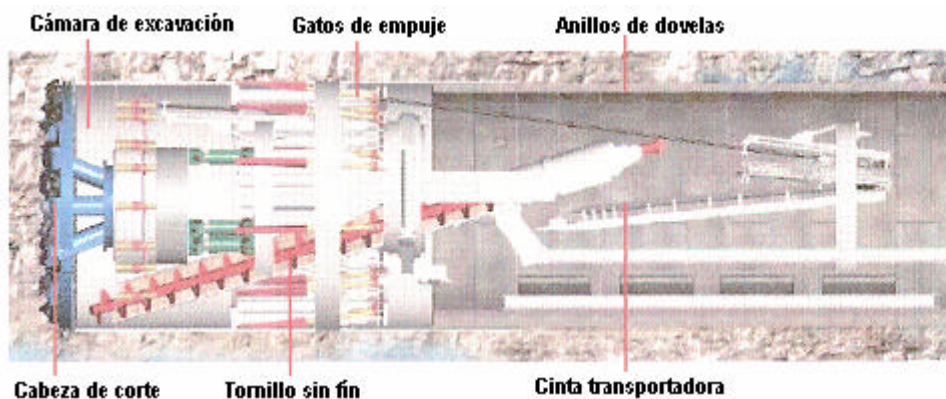


Figura 2. Esquema de una EPB.

Seguidamente se describen cada una de las partes.

- Cabeza o elemento excavador

Está incluido en un primer cuerpo de la coraza, e incorpora el elemento excavador, que en el caso de las EPB's se trata de una rueda o cabeza de corte circular (Figura 3).

Esta cabeza giratoria está accionada por motores hidráulicos o eléctricos que permiten una variación constante de la velocidad de giro, entre 0 y 9-10 rpm y la reversibilidad de la misma.

La cabeza normalmente monta picas o cinceles, y en ocasiones puede incluso incorporar discos. En terrenos muy variables se puede colocar discos y picas a la vez, aunque siempre los primeros adelantados 2 ó 3 cm. sobre las picas. Los discos trabajan en terrenos duros, sin la intervención de las picas y, en terrenos blandos, se embotan y dejan la responsabilidad de excavar a las picas.

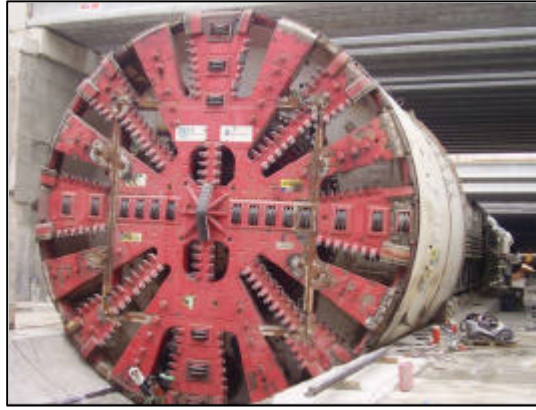


Figura 3. Cabeza de corte.

La cabeza dispone de una serie de aberturas, frecuentemente regulables, por las que el escombros arrancado pasa a la cámara de presión del escudo.

Una vez el material se encuentra dentro de la cámara, se extrae mediante un tornillo sin fin, que es uno de los mecanismos encargados de controlar la presión de la cámara a la vez de llevar el material de la cámara a la cinta transportadora.

- Cuerpo de mando y controles

Están alojados, al igual que los motores en un segundo cuerpo de la coraza.

- Cilindros de empuje y erector de dovelas

Están situados en un tercer cuerpo de la coraza, también llamada cola del escudo.

Los cilindros de empuje (Figura 4) están distribuidos en toda la periferia de la máquina, y están equipados con zapatas articuladas que permiten un apoyo uniforme sobre las dovelas del revestimiento. Su recorrido marca el ciclo de avance, estando normalmente comprendido entre 1,20 y 1,50 m.

Cuando ha finalizado cada ciclo de excavación, se retraen estos cilindros y, al amparo del tramo de escudo que queda libre, se procede a colocar un nuevo anillo de revestimiento.

Para ello, las dovelas que han llegado hasta el *back-up* de la máquina en mesillas espaciales, se transfieren mediante dispositivos adecuados hasta el erector (Figura 5), el cual las colocara una a una hasta completar el anillo.



Figura 4. Cilindros de empuje.



Figura 5. Erector de dovelas.

Cuando éste está totalmente cerrado, se puede iniciar un nuevo ciclo de excavación, apoyando los cilindros contra el nuevo anillo colocado.

El accionamiento del erector suele ser hidráulico, de velocidad variable, muy sensible y preciso para poder aproximar correctamente cada dovela a su situación definitiva.

La coraza del escudo, en la zona en la que se coloca el anillo de dovelas, lleva en toda su periferia unos sellos (cepillos de cola) que impiden la entrada de la inyección de mortero que rellena el hueco existente en el trasdós de la dovela y el contorno de la excavación.

Este hueco, en general tiene un espesor entre 7 y 9 cm y su inyección se puede hacer de forma discontinua, es decir, anillo por anillo cada vez que éste queda liberado de la coraza de la máquina o bien, en el caso de gran responsabilidad en cuanto asentamientos del terreno, de forma continua, a medida que la máquina avanza y el anillo va saliendo de la coraza.

- *Back-up*

Está constituido por una serie de plataformas que, deslizándose sobre el propio revestimiento de hormigón, se mueven arrastradas por la máquina simultáneamente a su avance.

El *Back-up* (Figura 6) incorpora los transformadores, casete de cables, casete de ventilación, depósitos para el mortero de inyección, etc., y el sistema de evacuación de escombros.

En el caso del escudo hay que tener en cuenta que después de cada ciclo de avance, ineludiblemente viene la colocación de un anillo de dovelas. El tiempo empleado en ello, normalmente es entre 20 y 35 min, en función de la pericia del erectorista.



Figura 6. Back-up.

Para tener una idea más detallada sobre las partes y componentes de una EPB, ver el Manual de túneles y obras subterráneas de Carlos López Jimeno, del cual se ha extraído gran parte de lo que se ha presentado en este apartado.

### 1.1.3 Problemas inducidos por la excavación de un túnel

El progresivo incremento de la construcción de túneles, a poca profundidad y en áreas urbanas, generalmente inducen a un serio problema a resolver durante la realización de sus correspondientes planes de viabilidad y su construcción: la influencia de la excavación de estas obras sobre las estructuras situadas en las proximidades del trazado.

Los movimientos superficiales originados por la construcción de un túnel tiene, en estos casos, una importancia decisiva y son en muchas ocasiones uno de los factores más limitativos a la hora de elegir el tipo de túnel, su trazado y el método constructivo del mismo. O, al menos, origina una serie de inversiones para evitar daños, o indemnizaciones, que pueden tener una importancia relativamente apreciable.

La excavación subterránea introduce una alteración del estado tensional del terreno, lo cual lleva asociada una generación de movimientos en zonas relativamente próximas a fin de restablecer el equilibrio tensional del suelo. Este hecho ha sido comprobado en numerosas ocasiones, con motivo de la construcción de túneles urbanos, midiendo los movimientos superficiales originados por la excavación. En estos casos se han medido asientos que van desde pocos milímetros hasta varios decímetros. Además, el fenómeno se extiende a una distancia del eje del túnel que puede llegar hasta 10 veces el diámetro del mismo (Tinajero y Vieitez, 1972).

Estas deformaciones que se producen en la superficie, originadas por alteraciones en el equilibrio interno del terreno y no por sobrecargas directamente aplicadas en ella, constituye el fenómeno denominado subsidencia.

Los mencionados desplazamientos tienen, simplificado, un carácter casi radial hacia el centro del túnel y pueden afectar a los edificios próximos si sus magnitudes son suficientemente para ello, al experimentarlas las cimentaciones, se originan deformaciones peligrosas en la estructura. Aunque generalmente se presta mayor atención a los movimientos en superficie, por su gran repercusión en cimentaciones superficiales, no debe olvidarse que en el interior del terreno se inducen movimientos considerables que pueden afectar también a cimentaciones profundas. Además de los asientos, que son los movimientos que más habitualmente se evalúan, deben ser considerados los movimientos horizontales, cuya influencia suele ser más dañina.

En general, el movimiento de un punto de la superficie se inicia varios días antes de que el frente de la excavación llegue a su vertical.

Este movimiento continúa de forma que, cuando el frente alcanza al punto de observación, el asiento puede ser de un 10 a un 50% del valor máxima, el cual será alcanzado al cabo de un tiempo que varía desde varios días hasta varios meses.

Los movimientos finales son función de un gran número de variables, como la geometría del problema, heterogeneidad del terreno, presencia de agua, proceso constructivo, deformación relativa entibación-terreno y su evolución en el tiempo, los huecos entre el terreno y sostenimiento, el tiempo que transcurre hasta que se realizan las inyecciones de contacto, etc.

La estimación teórica de estos asientos resulta extremadamente difícil por la gran cantidad de variables que intervienen en el fenómeno. Sin embargo, existen métodos teórico-empíricos y numéricos que permiten estimar, de forma aproximada, la ley de movimientos verticales de la superficie del terreno, de forma que pueda analizarse su influencia sobre las estructuras.

Para profundizar en el tema de los movimientos inducidos por la excavación de un túnel, ver la tesis doctoral de Luís Medina Rodríguez (1999), Estudio de los movimientos originados por la excavación de túneles con escudos de presión de tierras en los suelos tosquizados de Madrid, de donde se ha extraído gran parte de este apartado.

## **1.1.4 Descripción geológica y geotécnica de Barcelona**

### **1.1.4.1 Descripción general de la geología y la geotecnia de Barcelona**

La evolución histórica, a escala regional, comienza con el intenso plegamiento y deformación de los sedimentos paleozoicos durante la orogénesis hercínica. En una fase tardía de esta misma se intruso un batolito granítico que ocupa la mayor parte de la Cordillera Litoral Catalana. La intrusión granítica provocó en las rocas adyacentes una zona de metamorfismo de contacto. En ésta, y debido al flujo térmico producido por la intrusión, los minerales recrystalizaron, variando la estructura de la roca, convirtiéndose ésta en metamórfica de contacto. La intensidad de esta transformación disminuye a medida que nos alejamos del foco térmico, pasándose gradualmente a los sedimentos metamórficos regionales del Paleozoico (pizarras y calizas).

Durante la Orogenia Alpina, y debido a su anterior deformación, los materiales no pueden comportarse de un modo plástico o de pliegues, haciéndolo de una forma rígida, fracturándose en bloques y creando importantes fallas como la que hunde, al pie del Tibidabo, el bloque de Vallcarca.

Durante el Terciario superior, se produce una trasgresión marina, depositándose los sedimentos marinos del Mioceno y del Plioceno desde la actual *Travessera de Gracia* hacia el mar. Finalizada la trasgresión, las tierras emergen definitivamente.

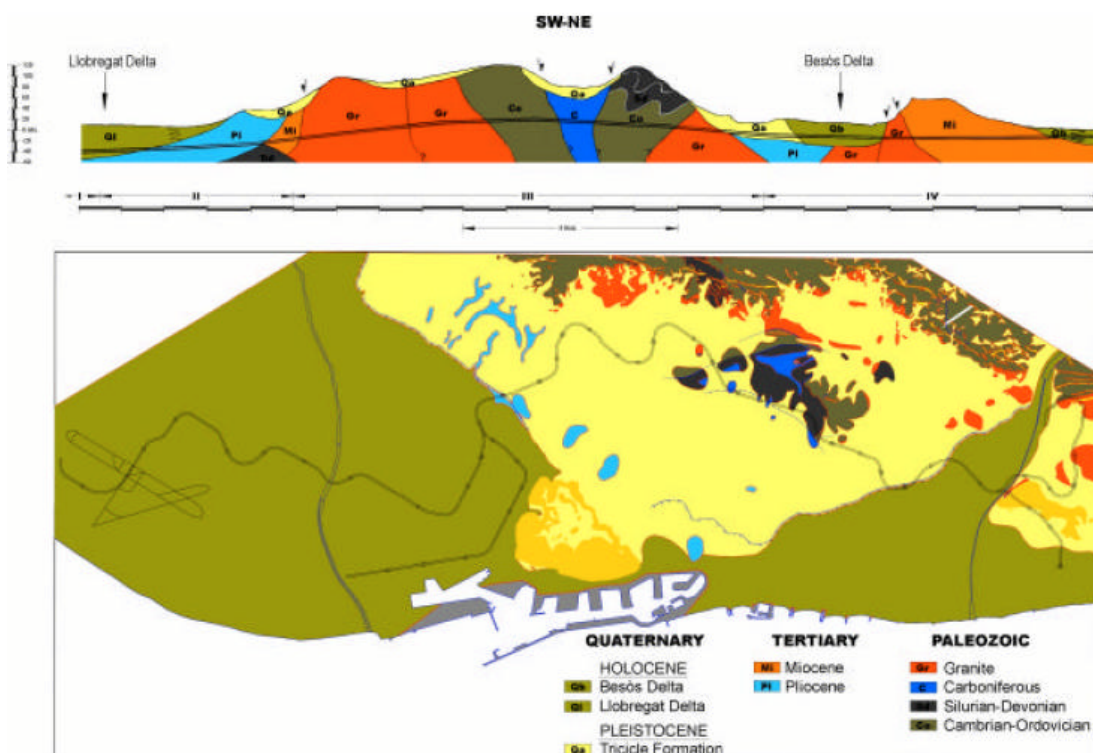
Después del Plioceno y antes de la formación de los depósitos del piedemonte se produce una intensa fase de erosión, como lo demuestra el relieve excavado en el substrato margoso, abarrancado este y relativamente enérgico, que queda fosilizado y sepultado bajo el manto cuaternario. Se trata, sin lugar a dudas, de un verdadero paleorrelieve.

Posteriormente se formó el denominado *Pla de Barcelona*, que es una plataforma morfológica suavemente inclinada hacia el mar y que corresponde a una llanura de piedemonte.

Después de la formación de la llanura de piedemonte, a causa de una oscilación climática, los cursos de agua se encajaron en los materiales cuaternarios hasta cortar en algunos puntos el substrato plioceno.

El establecimiento del nivel actual del mar permitió la formación de los deltas del Llobregat y Besòs. La edad de estos deltas es muy reciente, estimándose en unos 4.000 años aproximadamente. Las llanuras deltaicas de ambos ríos son sectores de morfología muy suave, con pendientes inferiores al 1%. El Delta del Besòs tiene una superficie aproximada de 15 km<sup>2</sup> mientras que la del Llobregat es mayor, con unos 92 km<sup>2</sup>.

Para visualizar toda la información descrita, se presenta un perfil y un mapa geológico de la zona de Barcelona (Figura 7), extraído del estudio de *geología-geotècnia L9 Metro Barcelona* de Marta Filbà.





### 1.1.4.2 Descripción detallada de la geología y la geotecnia de la zona de estudio (Delta del Llobregat)

En primera instancia, en este apartado, se describirán las características del delta del Llobregat y a continuación se hará una descripción detallada de los distintos materiales que se encuentran en la traza del túnel de estudio. Este último punto también tiene la finalidad de etiquetar los materiales y así evitar posteriores confusiones.

La llanura deltaica del Llobregat (Figura 8 y Figura 9) se sitúa al suroeste de la ciudad de Barcelona. Su morfología es muy suave, con pendientes claramente inferiores al 1%, situándose casi siempre por debajo de los 12 m sobre el nivel del mar.

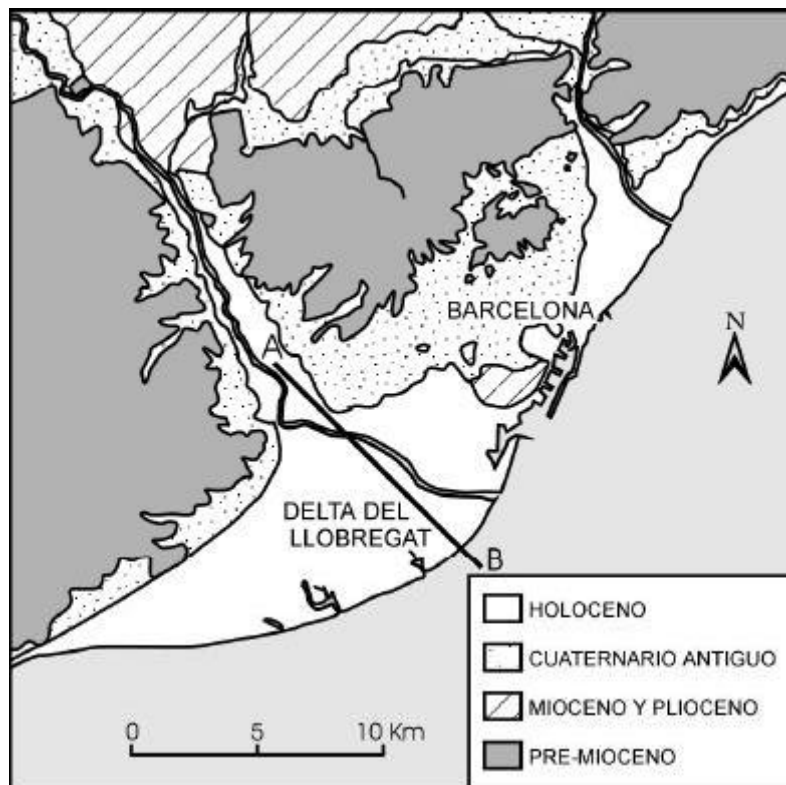


Figura 8. Delta del Llobregat (Bayó, A. 1985 / Albert Ventayol. Bosch & Ventayol, GeoServeis, S.L).

La superficie deltaica tiene una extensión total de unos 92 km<sup>2</sup>, siendo mucho mayor el lóbulo derecho que el izquierdo.

El delta avanzó sobre el mar hasta principios del siglo XX, pero en la actualidad prevalecen los procesos de erosión marina en algunos sectores. Ello es debido a un menor aporte de sedimentos, ya que gran parte de ellos quedan retenidos en presas, y también por el menor caudal de agua que llega al mar.

Es una formación geológica relativamente reciente (Holoceno), ya que se ha formado después de la última glaciación, que comportó la elevación del nivel del mar en unos 100 m hace unos 15.000 años.

El cuerpo deltaico se depositó sobre antiguos deltas preholocenos, que actualmente se sitúan más allá de la línea de costa.

Como resultado del ascenso del nivel del mar, el río comenzó a depositar sedimentos sobre los antiguos aluviones, de manera que los depósitos deltaicos fueron poco a poco progradando hacia el mar.

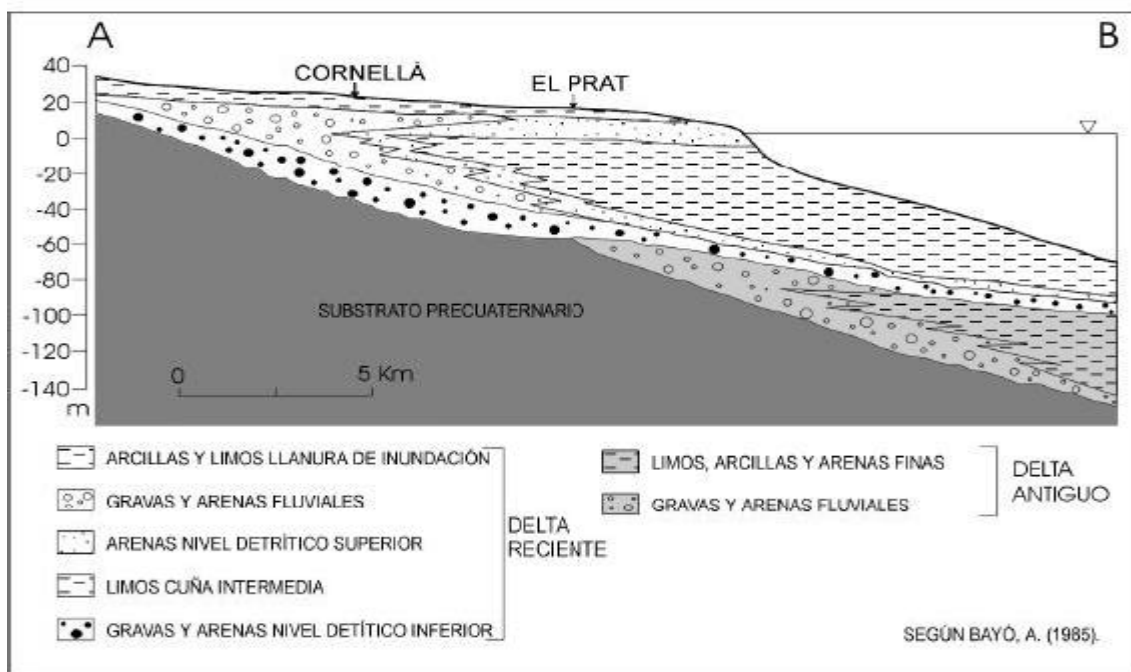


Figura 9. Perfil del delta de Llobregat (Bayó, A. 1985 / Albert Ventayol, Bosch & Ventayol, GeoServeis, S.L.).

- Nivel aluvial inferior, de 5-10 m de potencia, formados por gravas y arenas con gravas, y que representan los sedimentos aluviales anteriores al delta. Son la sede de un acuífero cautivo, el acuífero profundo, que ha sido objeto de una intensa explotación hídrica, en algunos casos excesiva, que ha favorecido procesos de intrusión salina.
- 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 de sedimentos se acuña aguas arriba, y también lateralmente, para llegar a desaparecer en las zonas marginales interiores del delta.
- Nivel detrítico superior. Formado por arenas medias y gruesas, bastante limpias, de color marrón, que representan la sedimentación fluvideltaica y litoral que progresa sobre los sedimentos del prodelta. Son los materiales que forman el acuífero superior, que normalmente es de tipo libre, cuando no queda confinado por la siguiente unidad.
- 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 frecuentemente presentan restos de materia orgánica. Sobre estos sedimentos naturales, existen rellenos antrópicos de variada precedencia y espesor.

La potencia de los sedimentos deltaicos del Llobregat aumenta en dirección al mar. En la parte central de la línea de costa alcanzan los 70 m. Este espesor corresponde a la base de las gravas del acuífero profundo, que no siempre coincide con el techo del sustrato precuaternario. Así por ejemplo, en la zona deltaica central, cerca del mar, por debajo de las gravas y antes de las arcillas azules pliocenas, se encuentra el llamado complejo detrítico inferior, constituido por niveles detríticos amarillentos, con intercalaciones arcillosas, que de alguna manera representan el techo de nuevas secuencias deltaicas preholocenas, situadas bajo el mar actual.

A continuación se describen los materiales que se encuentran en la traza del túnel de estudio y definidos anteriormente, además de caracterizar sus propiedades geológicas y geotécnicas más relevantes, así como: peso específico aparente ( $\gamma_{ap}$ ), peso específico seco ( $\gamma_d$ ), compresión simple (CS), cohesión (c), número de golpes del SPT, granulometría (G), ángulo de rozamiento (F), módulo elástico (Ep), módulo de Poisson y permeabilidad (K).

Los valores han sido extraídos del estudio geológico de la L9, realizado por Marta Filbà.

- Relleno antrópico (R).

Unidad	$\gamma_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	CS (kg/cm <sup>2</sup> )	c (kg/cm <sup>2</sup> )	F (°)	Ep (kg/cm <sup>2</sup> )	Poisson
R	1,7	0,25	0,05	27	75	0,33

Tabla 1. Propiedades geotécnicas del relleno antrópico (R).

- Nivel superficial (QI1).

Unidad	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	SPT	G (%0,08)	c (kg/cm <sup>2</sup> )	F (°)	Ep (kg/cm <sup>2</sup> )	Poisson	K (m/s)
QI1	1,6	2,01	9	65	0,25	25	95	0,33	E-07

Tabla 2. Propiedades geotécnicas del nivel superficial (QI1).

- Nivel detrítico superior (QI2).

Unidad	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	SPT	G (%0,08)	CS (kg/cm <sup>2</sup> )	c (kg/cm <sup>2</sup> )	F (°)	Ep (kg/cm <sup>2</sup> )	Poisson	K (m/s)
QI2	1,7	2,02	16	18	0,25	0,2	34	250	0,32	E-04

Tabla 3. Propiedades geotécnicas del nivel detrítico superior (QI2).

- Nivel intermedio de sedimentos de prodelta (QI3s y QI3).

Unidad	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	SPT	G (%0,08)	CS (kg/cm <sup>2</sup> )	c (kg/cm <sup>2</sup> )	F (°)	Ep (kg/cm <sup>2</sup> )	Poisson	K (m/s)
QI3s	1,55	2	12	55	0,4	0,2	32	170	0,3	E-06

Tabla 4. Propiedades geotécnicas del nivel intermedio de sedimentos de prodelta (QI3s).

Unidad	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	SPT	G (%0,08)	CS (kg/cm <sup>2</sup> )	c (kg/cm <sup>2</sup> )	F (°)	Ep (kg/cm <sup>2</sup> )	Poisson	K (m/s)
Q13	1,6	2,05	12	85	0,6	0,3	27	150	0,3	E-07

Tabla 5. Propiedades geotécnicas del nivel intermedio de sedimentos de prodelta (Q13).

- Substrato precuaternalio (M1).

Unidad	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	SPT	G (%0,08)	CS (kg/cm <sup>2</sup> )	c (kg/cm <sup>2</sup> )	F (°)	Ep (kg/cm <sup>2</sup> )	Poisson	K (m/s)
M1	1,79	2,12	R	35	0,85	0,23	27	260	0,3	E-06

Tabla 6. Propiedades geotécnicas del substrato precuaternalio (M1).

Para visualizar con mayor claridad la geología, ir al anexo de geología y ver el perfil geológico de la zona de estudio.

### 1.1.5 Las obras de construcción de la línea 9 del metro de Barcelona

#### 1.1.5.1 Generalidades

La nueva línea 9 del metro de Barcelona (Figura 10), conjuntamente con los dos ramales de la también nueva línea 10, que actualmente están en construcción, serán la línea de metro de mayor longitud de Europa, con sus casi 43 km de recorrido y sus 51 estaciones (conjuntamente L9 y L10). Es la inversión más grande que el gobierno catalán ha realizado hasta la fecha. Al mismo tiempo, es la infraestructura más importante incluida en el Plan Director de Infraestructuras 2001-2010 (PDI), aprobado por la Autoridad del Transporte Metropolitano el 25 de abril del 2002. La nueva línea cruzará Barcelona con la finalidad de conectar barrios de la ciudad con una gran demanda de transporte público, como el eje *Carles III - Ronda del Mig - Travessera de Dalt - Sagrera*, y unirá *Badalona* y *Santa Coloma de Gramenet* con la Zona de Actividades Logísticas del puerto (ZAL), la *Zona Franca* y el Aeropuerto del *Prat*.



Figura 10. Esquema de la línea 9.

La principal característica de esta obra es la profundidad a la que se construye, con la finalidad de evitar otras líneas ya existentes de metro y/o ferrocarril, sistemas de alcantarillado y otros servicios. Esto facilita enormemente la construcción pero aumenta el tiempo de acceso de los pasajeros de la calle a la andana. En consecuencia se ha previsto dotar las instalaciones de unos grandes ascensores para realizar el acceso con un menor tiempo. Esta característica de profundidad no la posee íntegramente toda la línea, ya que la zona que transcurre por los materiales del delta del Llobregat es de poca profundidad. Incluso hay un ramal de la *Zona Franca* que se construye en viaducto.

La construcción se desarrolla prácticamente en su totalidad mediante tuneladoras que permite una construcción más segura y más rápida. Las tuneladoras utilizadas para esta obra son dos máquinas de 12 m de diámetro, una de presión de tierras y otra de mixta y una tercera máquina EPB con un diámetro inferior a las dos anteriores (diámetro = 9,4 m).

#### **1.1.5.2 Tramo 2A: *Fira – Parc logístic***

El tramo 2A tiene una longitud total de 1.323 m y se trata del tramo que une la estación de *Fira* con la de *Parc logístic*, todo este segmento transcurre sobre materiales deltaicos del Llobregat en donde el nivel freático se encuentra en todo momento por encima del eje del túnel.

Por las características del terreno de la zona, en este caso, se ha utilizado la EPB de 9,4 m de diámetro para realizar la excavación.

También hay que destacar que el recubrimiento del tramo 2A es muy inferior a la del resto de la línea, en donde la gran profundidad del túnel era una característica significativa de la obra. En este caso el recubrimiento es de un diámetro y medio a lo largo del tramo.

Para realizar la totalidad del tramo se han instalado un total de 875 anillos de dovelas. Estos anillos de dovelas son del tipo universal, es decir, todos los anillos son idénticos. En consecuencia, para realizar la curvatura necesaria únicamente hay que cambiar la posición de la clave del anillo. Además, por razones de estabilidad i estanquedad durante tres anillos consecutivos no se puede colocar la clave en una misma posición.

El tiempo empleado para realizar la totalidad de la excavación ha sido de aproximadamente unos seis meses, los cuales han transcurrido desde el mes de Mayo de 2006, hasta el mes de Noviembre del mismo año. Cabe recalcar que la llegada de la propia máquina a la estación de *Parc logístic* se retrasó unos meses, ya que todavía no se había finalizado la excavación de la propia estación. En consecuencia, el tiempo real en llegar la máquina de una estación a otra ha sido superior a estos seis meses, quedando patente el 25 de Abril de 2007 como día del cale de la máquina.

## 1.2 Objetivos de la tesina

Esta tesina tiene tres objetivos principales:

El primero es el de entender y medir *in situ* el comportamiento del revestimiento del túnel una vez sale del amparo del escudo, es decir, ver como se deforma el anillo de dovelas una vez el terreno aplica sus cargas sobre él.

El siguiente objetivo es el de realizar un modelo predictivo del comportamiento del suelo frente la construcción de un túnel mediante EPB. Para la realización de este modelo se va a utilizar un programa de elementos finitos (Plaxis), en el cual se va a intentar simular las diferentes etapas constructivas que se dan en la construcción de un túnel con EPB, así como la inyección de bentonita y mortero. Además, de la introducción de datos provenientes del estudio de la deformación del revestimiento, que también influye en los asientos que se producen.

Finalmente, como tercer y último objetivo, está discutir la validez del modelo numérico frente al gran número de medidas *in situ* (en la traza del tramo de estudio) que hay sobre los movimientos inducidos en el terreno y así proporcionar pautas de trabajo que puedan ayudar en la realización de futuras actuaciones similares.