



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

*Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica,
Cartográfica y Topográfica.*



TRABAJO FINAL DE GRADO

**Trabajos Topográficos en la Ejecución de Túneles para
Carreteras y Ferrocarriles.**

TITULACIÓN: *Grado en Ingeniería en Geomática y Topografía*

AUTOR: *D. Daniel Salinas González*

TUTOR: *Prof. D. Jesús Olivares Belinchón*

Valencia, septiembre de 2017



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA GEODÉSICA
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

*Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica,
Cartográfica y Topográfica.*

TRABAJO FINAL DE GRADO

Trabajos Topográficos en la Ejecución de Túneles para Carreteras y Ferrocarriles.

Estudio de los diferentes Trabajos, Metodologías e Instrumentación, a utilizar por el Ingeniero en Geomática y Topografía en la Ejecución de Túneles para Carreteras y Ferrocarriles.

TITULACIÓN: *Grado en Ingeniería en Geomática y Topografía*

AUTOR: *D. Daniel Salinas González*

TUTOR: *Prof. D. Jesús Olivares Belinchón*

Valencia, septiembre de 2017

ÍNDICE.



ÍNDICE DE CONTENIDO.

1. OBJETO DEL PROYECTO.....	8
2. ANTECEDENTES.....	10
2.1. CONCEPTO DE TÚNEL.....	10
2.2. HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LOS TÚNELES.....	11
2.3. LOS TÚNELES EN ESPAÑA.....	26
2.4. LOS GRANDES TÚNELES DE ESPAÑA.....	34
3. NORMATIVA EN SEGURIDAD DE TÚNELES.....	41
3.1. RESPONSABLE DE SEGURIDAD DEL TÚNEL.....	42
3.2. INSPECCIÓN DEL TÚNEL.....	43
3.3. MEDIDAS DE SEGURIDAD EN EL TÚNEL.....	44
3.4. REQUISITOS MÍNIMOS DE SEGURIDAD.....	45
3.5. SEÑALIZACIÓN DE LOS TÚNELES.....	50
4. CLASIFICACIÓN, GEOMETRIA Y ELEMENTOS DE UN TÚNEL.....	54
4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS TÚNELES.....	54
4.2. GEOMETRÍA Y ELEMENTOS DE UN TÚNEL.....	57
5. MÉTODOS TRADICIONALES DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES	62
5.1. MÉTODO “CUT AND COVER”, EJECUCIÓN A CIELO ABIERTO.....	62
5.2. EJECUCIÓN SUBTERRANEA O EN MINA.....	65
5.2.1. Método inglés.....	65
5.2.2. Método alemán.....	65
5.2.3. Método austríaco.....	66
5.2.4. Nuevo método austriaco de túneles (NATM)	66
5.2.5. Método italiano.....	67
5.2.6. Método belga.....	68
5.2.7. Método clásico de Madrid.....	68



5.3. MÉTODO DE PRECORTE DEL TERRENO.....	70
6. LA GEOMÁTICA APLICADA A LA EJECUCIÓN DE TÚNELES.....	73
6.1. FASE DE DISEÑO DEL TÚNEL.....	73
6.2. FASE DE EJECUCIÓN O CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL.....	76
6.3. INSTRUMENTACIÓN TOPOGRÁFICA EN LA EJECUCIÓN DE TÚNELES.....	78
6.3.1. Estación total.....	79
6.3.2. Nivel de precisión.....	81
6.3.3. Nivel digital.....	82
6.3.4. Plomada óptica.....	83
6.3.5. Receptores GNS.....	84
6.3.6. Laser escáner.....	84
6.4. TRABAJOS TOPOGRÁFICOS EN EL INTERIOR Y EN EL EXTERIOR DEL TÚNEL.....	87
6.4.1. Red exterior.....	87
6.4.2. Red interior.....	90
6.4.3. Fases del replanteo planimétrico.....	93
6.4.4. Fases del replanteo altimétrico.....	98
6.5. GUIADO DE TUNELADORAS.....	99
6.6. CONTROL DE DEFORMACIONES.....	101
7. CONCLUSIONES.....	107
8. BIBLIOGRAFÍA.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA 1. Recreación del túnel bajo el río Éufrates (Babilonia).....	11
FIGURA 2. Sección de una tumba del Valle de los Reyes.....	12
FIGURA 3. Túnel de Eupalinos 530 a.C.	13
FIGURA 4. Túnel de Monte-Furado (Vista en planta)	14
FIGURA 5. Conjunto minero las medulas.....	14
FIGURA 6. Mina de Daroca.....	15
FIGURA 7. Túnel de Malpas canal du Midi.....	16
FIGURA 8. Túnel de Terre Noir.....	16
FIGURA 9. Perforadora de Germain Sommeiller.....	17
FIGURA 10. Perforadora de Germain Sommeiller.....	18
FIGURA 11. Túnel del Támesis.....	19
FIGURA 12. Metro subterráneo de Buenos Aires.....	20
FIGURA 13. Metro de Madrid 1919.....	21
FIGURA 14. Metro de Barcelona 1924.....	21
FIGURA 15. Línea 3 metro de Guangzhou.....	22
FIGURA 16. Línea 10 metro de Beijing.....	23
FIGURA 17. Túnel bajo de San Gotardo.....	24
FIGURA 18. Entrada túnel de Seikan(Japón)	25
FIGURA 19. Túnel de Hakkoda.....	25
FIGURA 20. Acueducto romano de Peña Cortada.....	26
FIGURA 21. Bomba hidráulica de Ctsibio.....	27
FIGURA 22. Captación de agua subterránea “qanat”	28
FIGURA 23. Túnel de Reinosa.....	29
FIGURA 24. Trabajos de reforma del Túnel de Vielha.....	32

FIGURA 25. Construcción túnel del Negrón.....	33
FIGURA 26. Tuneladora TBM.....	34
FIGURA 27. Esquema de dovelas utilizadas túnel de Guadarrama.....	35
FIGURA 28. Túnel de Guadarrama.....	35
FIGURA 29. Túnel de Pajares.....	36
FIGURA 30. Tuneladoras TBM (túnel de Pajares)	37
FIGURA 31. Descripción de los diferentes lotes del túnel de Pajares.....	39
FIGURA 32. Señal E11A (entrada del túnel)	50
FIGURA 33. Cartel autopista 1A.....	51
FIGURA 34. Cartel autopista 2A.....	51
FIGURA 35. Carretera convencional 1A.....	51
FIGURA 36. Carretera convencional 2A.....	51
FIGURA 37. Señalización de teléfono de emergencia y extintor.....	52
FIGURA 38. Señalización de apartaderos y salidas de emergencia.....	52
FIGURA 39. Señalización de las salidas de emergencia.....	52
FIGURA 40. Señalización del estado de los carriles.....	52
FIGURA 41. Elementos estructurales y dimensionales de un túnel.....	58
FIGURA 42. Ejemplo sección tipo túnel carretero.....	58
FIGURA 43. Ejemplo sección tipo túnel ferroviario.....	59
FIGURA 44. Ejemplo sección tipo túnel ferroviario alta velocidad.....	60
FIGURA 45. Ejemplo método “Cut and Cover” (falso túnel)	63
FIGURA 46. Esquema método “Cut and Cover” (falso túnel)	64
FIGURA 47. Esquema método ingles.....	65
FIGURA 48. Esquema método alemán.....	66
FIGURA 49. Esquema nuevo método austriaco.....	67
FIGURA 50. Esquema método italiano.....	67
FIGURA 51. Esquema método belga.....	68
FIGURA 52. Esquema método clásico de Madrid.....	70

FIGURA 53. Máquina de precorte mecánico.....	71
FIGURA 54. Ejemplo plano sección tipo y perfil longitudinal.....	75
FIGURA 55. Frente ataque de un túnel.....	76
FIGURA 56. Esquema de estacionamiento dentro del túnel.....	78
FIGURA 57. Estación Total Leica TS50.....	80
FIGURA 58. Nivel de precisión	82
FIGURA 59. Nivel digital.....	83
FIGURA 60. Plomada óptica con giroscopio.....	83
FIGURA 61. Receptor GNSS.....	84
FIGURA 62. Láser escáner.....	85
FIGURA 63. Resultado escaneado de un túnel (láser escáner)	86
FIGURA 64. Red exterior bases de bocas y enlace con geodesia túneles ferroviarios de Pajares.....	88
FIGURA 65. Red REGENTE (España)	90
FIGURA 66. Replanteo Red interior de un túnel.....	91
FIGURA 67. Poligonal por el eje (Red interior)	92
FIGURA 68. Poligonal en zig-zag (Red interior)	92
FIGURA 69. Triangulación (Red interior)	92
FIGURA 70. Replanteo bocas de entrada del túnel.....	95
FIGURA 71. Método de replanteo por cuerdas o poligonal inscrita.....	94
FIGURA 72. Método de replanteo por polares.....	95
FIGURA 73. Método de replanteo por abscisas y ordenadas sobre la tangente.....	96
FIGURA 74. Método de replanteo por abscisas y ordenadas sobre la cuerda.....	96
FIGURA 75. Método de abscisas y ordenadas sobre la prolongación de la cuerda.....	96
FIGURA 76. Referencias en bocas de túnel.....	98
FIGURA 77. Sistema de guiado de tuneladoras.....	100

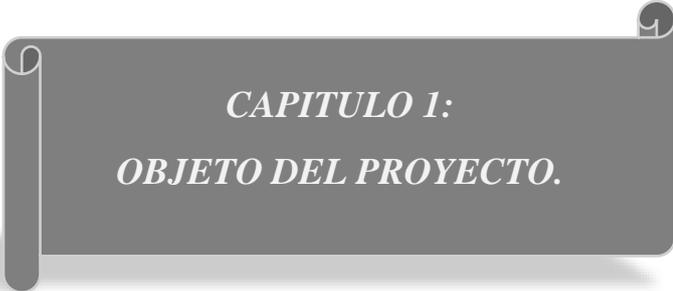


FIGURA 78. Equipos topográficos para el control de deformaciones (estación total, nivel)103

FIGURA 79. Equipo para medidas de inclinación o movimientos angulares.....103

FIGURA 80. Medición de desplazamientos verticales.....104

FIGURA 81. Puntos de control de convergencia por sección del túnel.....106



*CAPITULO 1:
OBJETO DEL PROYECTO.*



1. OBJETO DEL PROYECTO.

El presente proyecto se redacta como Proyecto Profesional de Fin de Grado, con el fin de que el redactor obtenga el Título de Ingeniero en Geomática y Topografía, para esto vamos a profundizar en los diferentes Trabajos, Metodologías e Instrumentación, a utilizar por el Ingeniero en Geomática y Topografía en la Ejecución de Túneles para Carreteras y Ferrocarriles.

El objeto del presente proyecto es realizar un profundo estudio, para ampliar los conocimientos y dar a conocer los diferentes trabajos, metodologías e instrumentación, a utilizar en la ejecución de obras subterráneas o túneles.

Para esto en primer lugar, se hace un recorrido histórico para conocer la importancia de los túneles a lo largo de la historia y la evolución que han tenido estos hasta la actualidad, también se dará a conocer las grandes obras de la ingeniería del siglo XXI, como los distintos procesos constructivos, y se detallaran los pasos a seguir por el Ingeniero en Geomática y Topografía en la ejecución de túneles, como la influencia que este tiene en los diferentes procesos constructivos.



CAPITULO 2:
ANTECEDENTES: CONCEPTO
HISTORIA Y EVOLUCIÓN.



2. ANTECEDENTES.

2.1 CONCEPTO DE TÚNEL.

Para empezar, vamos a conocer el concepto de túnel desde varios puntos de vista, en primer lugar, según el Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua define túnel como Vía subterránea abierta artificialmente para el paso de personas y vehículos.

En segundo lugar, desde el punto de vista de la ingeniería utilizamos el concepto de túnel, para referirnos a una obra lineal subterránea o lo que es lo mismo, una perforación horizontal abierta artificialmente sobre el terreno, cuyo objetivo funcional es el de establecer la comunicación más directa posible entre dos lugares.

2.2 HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LOS TÚNELES.

El túnel nace de la necesidad de superar un obstáculo, ya en la antigüedad esta necesidad se convierte en realidad a través de la materialización de dicha idea, con la construcción de un túnel, el ejemplo más antiguo del primer túnel de la historia del que se tiene constancia, según los relatos del historiador Diodoro de Sicilia, es el que mando construir la reina Semiramis en Babilonia (2200 a.C.), para comunicar por debajo del río Éufrates, el Palacio Monárquico con el templo de Belos. Según la leyenda, puesto que no hay evidencias arqueológicas, se trató de una excavación realizada a modo de trinchera de 900 metros de longitud.

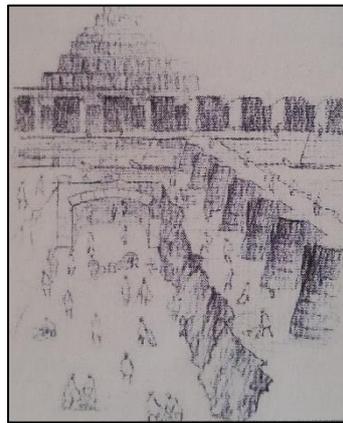


Fig. 1. Recreación del túnel bajo el río Éufrates (Babilonia). Fuente: (E. P. de los Santos).

Desde la construcción de esta obra, no se vuelve a construir un túnel por debajo de un río hasta 4000 años más tarde cuando Sir Marc Isambard Brunel (padre) y Isambard Kingdom Brunel (hijo) construyeron un túnel en el río Támesis entre Rotherhithe y Wapping, pero este se hizo sin desviar ningún cauce.

Una de las civilizaciones más antiguas es la egipcia, los restos más antiguos referentes a esta civilización datan del año 1500 a.C., esta es una de las civilizaciones que más uso hizo de este recurso de la ingeniería, debido a que la construcción de los túneles era llevada a cabo por esclavos lo que conlleva una mano de obra barata.

En el antiguo Egipto el concepto túnel estaba muy relacionado con la muerte y con la vida después de la muerte, como se puede comprobar en

las galerías subterráneas excavadas en la roca en el Valle de los Reyes (figura 2), donde faraones, reinas, príncipes y nobles eran alojados tras su muerte, año 1500 a.C., o incluso las pirámides, enormes edificaciones que ocultan complicadas redes de pasadizos.

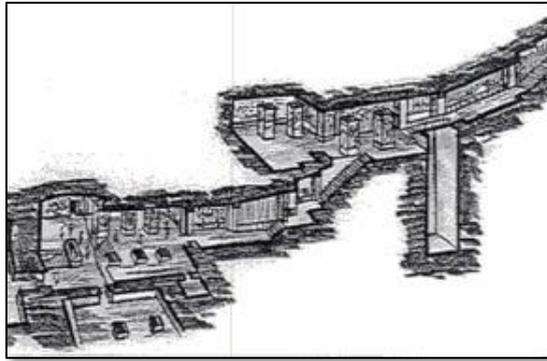


Fig. 2. Sección de una tumba del Valle de los Reyes. Fuente: (J. A. Juncá).

El túnel más antiguo conocido, es el túnel de **Ezequías en Jerusalén**, calado sobre el año 700 a.C.; lo curioso es que se trata de un túnel de 450 metros para cubrir una distancia de 300 metros, en el que dos equipos avanzaron simultáneamente desde sus dos extremos, pero realizando numerosos intentos fallidos en direcciones equivocadas, ya que el trabajo fue hecho sin un enfoque metódico.

Siguiendo con la historia, el **túnel de Eupalinos** tiene un kilómetro de longitud, cuya construcción data del año 530 a.C., cuya finalidad era abastecer agua a la antigua capital de Samos (isla griega del mar Egeo). Dicho túnel es el segundo que se conoce en la historia que fue excavado desde ambas bocas (el primero es el ya comentado túnel de Ezequías en Jerusalén en el año 700 a.C.), y el primero con un enfoque metódico en hacerlo. Existe un documento que indica el método que usó el ingeniero Eupalinos de Megara, en tiempo del tirano Polícrates de Samos, para hacer que los dos grupos se encontraran en la mitad de la excavación. Con una longitud de 1036 metros, el subterráneo del acueducto de Eupalinos es famoso hoy como una de las obras maestras de la ingeniería de la antigüedad.



Fig. 3. Túnel de Eupalinos 530 a.C. Fuente: (Wikipedia.com).

Posteriormente en muchas ciudades del Imperio Romano, se efectuaron obras subterráneas para diversos proyectos: túneles para abastecimiento de agua que encadenaban con acueductos, alcantarillado como la famosa **Cloaca Máxima** construida para drenar las marismas locales y eliminar los desperdicios de las grandes ciudades su construcción data aproximadamente del año 600 a.C. por órdenes del rey de Roma, Lucio Tarquinio Prisco; otro ejemplo son el trazado de calzadas romanas (el túnel de Pausilippo, de 1,5 kilómetros cerca de Nápoles), túneles para abastecimiento de agua (como, por ejemplo, el túnel de Fucino, de 5 kilómetros en la ciudad de Salvino), alcantarillado, emisarios, etc., o la realización de galerías para explotaciones mineras, así como las catacumbas.

La Península Ibérica también formaba parte del Imperio Romano en aquella época, en esta se localizaban túneles como el de **Montefurado**, en la provincia de Lugo, realizado para desviar el río Sil y poder extraer oro, sus dimensiones eran de 400 metros de largo por 19 metros de ancho con una altura media de 17 metros de alto.

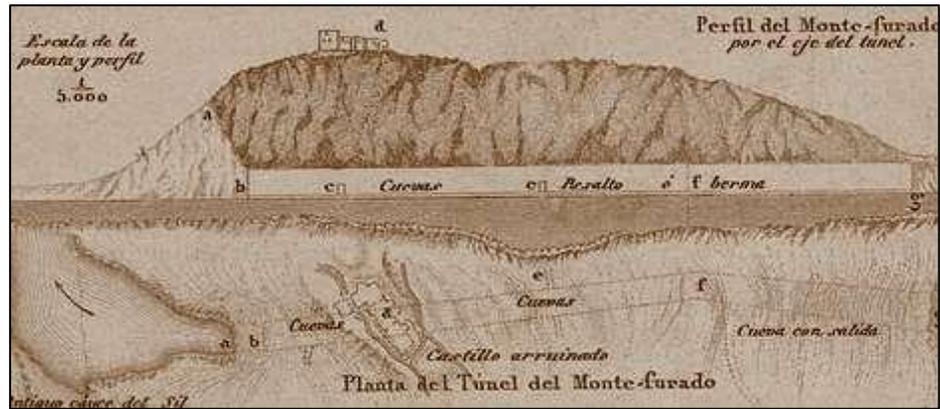


Fig. 4. Túnel de Monte-Furado (Vista en planta). Fuente: (foros.xenealoxia.org).

Otra de las grandes excavaciones son el conjunto minero de **Las Médulas**



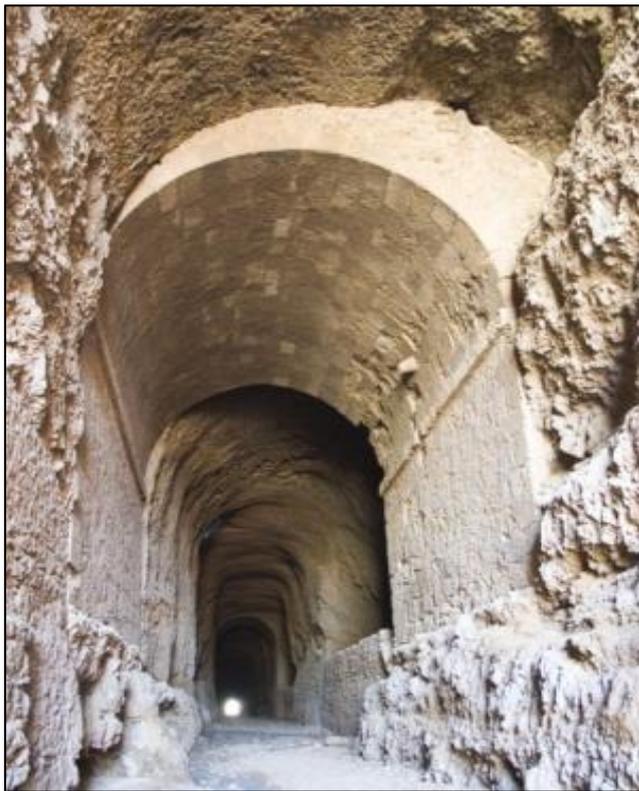
Fig. 5. Conjunto minero las medulas.
Fuente: memoriamagica.com.

en la provincia de León, las cuales eran minas de oro que se explotaron hasta finales del siglo II y principios del siglo III, este conjunto minero tiene 325 kilómetros de canalizaciones excavadas sobre la roca. En resumen, en esta época los romanos dominaban la ingeniería subterránea.

En la Edad Media, la construcción de túneles disminuye, quedando en obras menores, como galerías y pasadizos en castillos y fortalezas, no obstante la minería cobra especial importancia durante la época del Medievo, donde se consolida sobre todo en la parte central de Europa, incluso se llega a publicar en el siglo XVI una obra muy importante llamada **De Re Metallica de Georgius Agrícola**, en esta obra se recogen las prácticas y técnicas mineras convirtiéndose también en un libro básico en los dos siglos siguientes, durante este periodo los **qanats** (infraestructuras hidrogeológicas para la captación de una capa de agua subterránea) se extienden al norte de África y a la península Ibérica.

En la época del Renacimiento, la construcción de túneles que estaba dormitando, comienza a despertarse. En esta época Leonardo Da Vinci hace diseños de niveles inferiores en sus diseños de ciudades, pero estos no llegaron a plasmarse en realidad.

Un ejemplo de túnel renacentista es la **Mina de Daroca**, fue una de las



obras hidráulicas más importantes de Europa del siglo XVI y fue realizada por el arquitecto francés Pierres Bedel, el objetivo de esta obra fue desviar las aguas para que desembocasen en el Río Juloca, esta obra se realizó entre 1555-1570 con unas dimensiones de 600 metros de longitud, por 6 metros de anchura y una altura de 7 metros.

Fig. 6. Mina de Daroca. Fuente: xiloca.org.

En el siglo XVII surge la Era de los canales, el primer túnel navegable de Europa fue el **túnel de Malpas**, cerca de Beziers en el canal du Midi. Este túnel de 155 metros de longitud; 6,5 metros de anchura y 8 metros de altura fue el primero en el que se utilizó pólvora, se considera el primer túnel navegable de canal de Europa y un monumento a la determinación de Pierre-Paul, este túnel fue el impulsor de la construcción de los túneles de canal continuando con la construcción de estos en las siguientes décadas.



Fig. 7. Túnel de Malpas canal du Midi. Fuente: (en.wikipedia.org).

Pero es en el siglo XIX, con la aparición del ferrocarril cuando los túneles tienen un gran apogeo, se incorporó de manera progresiva el uso de maquinaria y procedimientos constructivos, como consecuencia de esto la mecanización toma mayor importancia en detrimento del trabajo manual, estos avances se dan gracias a la revolución industrial.

El **túnel de Terre-Noir** en Francia, se considera como el primer túnel ferroviario con 1.476 metros de longitud, 5 metros de altura y unos 3 metros de anchura, terminado en el año 1826. Era un camino de carriles que cubría la línea Roanne – Andrezieux, cuyos vagones fueron inicialmente arrastrados por caballos y posteriormente por locomotoras de vapor.

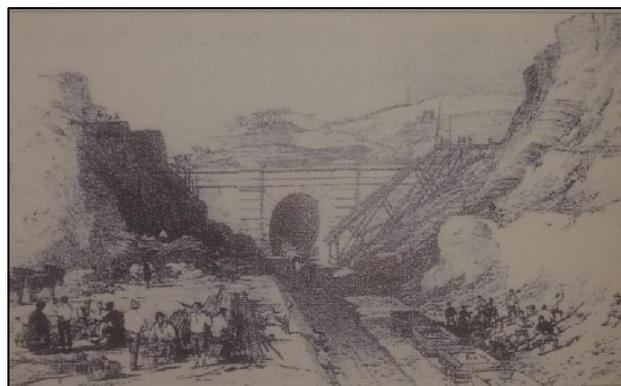


Fig.8. Túnel de Terre Noir. Fuente: (E. P. de los Santos).

A partir de la segunda mitad del siglo XIX se produce un gran avance en la construcción de túneles ferroviarios en los Alpes, el **túnel de Mont Cenis** es un ejemplo de esto, con una longitud de 12,6 kilómetros que conecta Francia con Italia, su construcción tardó 14 años desde 1856-1871, bastante tiempo antes de lo previsto gracias a las nuevas técnicas del Ingeniero francés Germain Sommeiller, desarrollando la primera máquina perforadora de roca por aire comprimido, la cual consiguió una velocidad de avance de 2 metros diarios frente a los 60 cm que se obtenían con las técnicas tradicionales.

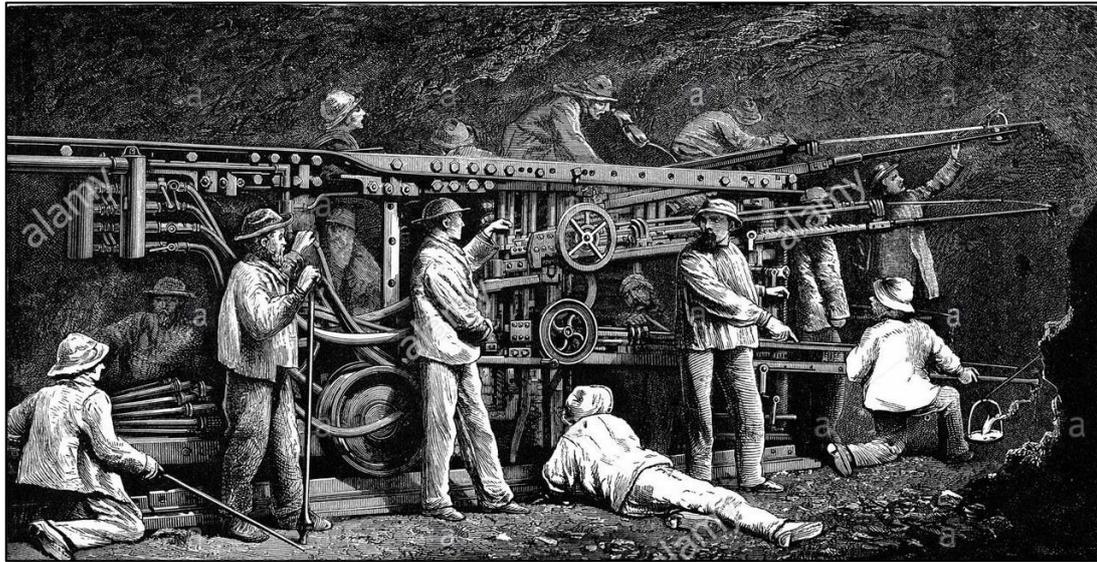


Fig.9. Perforadora de Germain Sommeiller. Fuente: Alamy.com.

Unos años más tarde, en 1882, se abre el **túnel ferroviario de Sant Gotthard** en Suiza construido por el ingeniero Luis Favre y se llevó a cabo en tan sólo ocho años (la excavación comenzó por ambas bocas en el año 1872 y terminó en 1880). Este túnel cuenta con casi 15 kilómetros de longitud, tratándose de un único tubo con doble vía, lo que mejoró una de las rutas más importantes para atravesar los Alpes en el eje norte-sur de Europa a través del macizo de San Gotardo.

El **túnel de Sant Gotthard**, entre Göschenen (en el cantón de Uri) y Airolo (en Tesino) en los Alpes Lepontinos, permitió establecer la ruta ferroviaria entre Suiza e Italia.

El tercer túnel ferroviario que completa la triada en la colosal lucha de perforar los Alpes, es el **túnel Simplon I**, entre Suiza e Italia. La longitud de este túnel es de 19,8 kilómetros, y su apertura se produjo en el año 1906.

Una de las grandes obras de la época es el **túnel del Támesis** (Londres), fue construido entre 1825 y 1843, por el ingeniero Marc Isambard Brunel y su hijo Isambard Kingdom Brunel, fue el primer túnel construido bajo un río navegable y pionero en la técnica tuneladora, donde se aplica por primera vez la técnica de sostenimiento de terreno y protección de los trabajadores con un escudo. Se trata de dos tubos de 396 metros (11 metros de luz y 6 de gálibo), a una profundidad media de 23 metros por debajo de la superficie del río Támesis (tan sólo a 5 metros en su parte central).

Se inauguró en 1843, al principio su uso fue peatonal, cuyo acceso se realizaba a través de dos solemnes pozos de 15 metros de diámetro, a cuyas paredes bajaban pegadas unas escalinatas. En 1869 se utilizó como paso ferroviario, formando parte de la red metropolitana londinense, donde los originales pozos de acceso al túnel se reconvierten a las estaciones de Wapping y Rotherhithe.

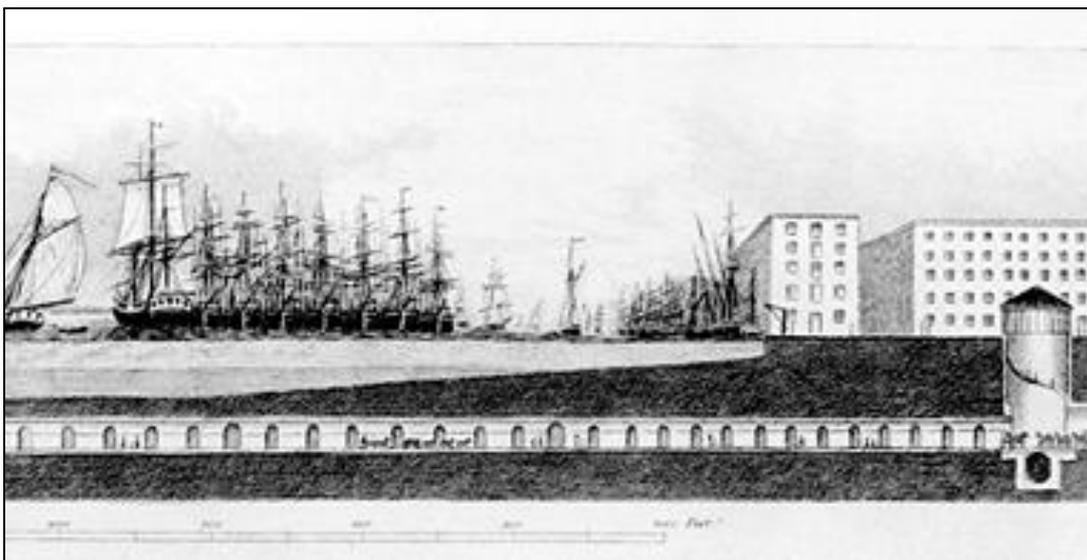


Fig.10. Túnel del Támesis. Fuente: engineering-timelines.com.

También en esta época en Estados Unidos se ejecuta una compleja red de **túneles bajo la ciudad de Chicago**, abiertos en 1869 y 1871 siendo estos los primeros túneles por donde se circuló con vehículos transitados mediante cables, para transportar correo, paquetes, madera y carbón, utilizados como vías subterráneas de comunicación entre los comercios, edificios, tiendas y edificios de correo.

Ahora bien, la construcción de túneles logra un ritmo espectacular con la aparición del primer **ferrocarril metropolitano de Londres**. El metro londinense se inauguró el 10 de enero de 1863 con 6 kilómetros de longitud, conectando las tres estaciones del norte (Paddington, Easton, y King 's Cross) con el centro (en Farringdon). Los primeros trenes consistían en locomotoras de vapor, que pasaron a ser eléctricas en 1890.

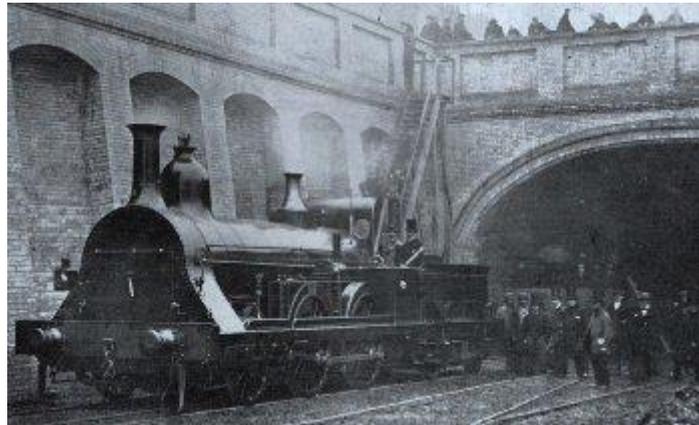


Fig.11. Túnel de Londres 1863. Fuente: elmercuriodigital.net.

La red se extendió en años sucesivos de forma que, en 1884, formaba un anillo de aproximadamente 20 kilómetros, operando por la compañía London Underground Limited (LUL). Hoy en día, la red supera los 400 kilómetros y las 270 estaciones.

El continuo aumento de la población supuso la construcción de los **primeros metros** en las ciudades más prosperas de Europa y América. A esta nueva andadura se sumaron los ferrocarriles metropolitanos de ciudades como Chicago (Chicago Transit Authority, CTA), operativo desde mayo de 1895, Glasgow(Strathclyde Passsenger Transport, SPT) y

Budapest (Rt.Metro Uemigagatosag, BKV) abiertos en 1896, Boston (Massachusetts Bay Transportation Authority, MBTA) en 1897, Viena (Wiener Linien) en 1898, París (Regie Autonome des Transports Parisiens, RATP) en 1900, Berlín (Berliner Verkehrsbetriebe GmbH, BVG) en 1902, Atenas (Ilektriki Sidirodromi Athinon Pirineos AE, ISAP) y Nueva York (MTA New York City Transit, NYCTA) en 1904, Filadelfia (Southeastern Pennsylvania Transportation Authority, SEPTA) en 1907, Newark (The Port Authority Trans- Hudson Corporation, PATH) en 1908, y Hamburgo (Hamburguer Hochbalhn, HHA) operativo desde 1912; todas ellas, redes de metro que actualmente superan los cien años de antigüedad.

El primer país de América del Sur que construyó una red de metro fue Argentina en 1913, en Buenos Aires (Metrovías S.A.), y varios años más tarde, en 1969, México lo construye en la Ciudad de México (Sistema de Transporte Colectivo STC Metro), actualmente la red más extensa. Asimismo, Brasil en las ciudades de Sao Paulo (Companhia do Metropolitano do Sao Paulo) en 1974, y Río de Janeiro (Companhia do Metropolitano do Río de Janeiro) 1979, construye sus primeras redes de



*Fig. 12. Subte de Buenos Aires.
Fuente: es.wikipedia.org*

ferrocarril metropolitano, ejecutando posteriormente los metros de las ciudades de Brasilia, Recife, Porto Alegre y Belo Horizonte. También Chile en 1975, en Santiago de Chile (Metro de Santiago), Colombia en Medellín (Metro de Medellín Ltda.) y Venezuela en Caracas

(Compañía Anónima Metro de Caracas), construyen sus líneas de metro.

En España, el primer ferrocarril metropolitano que se construyó fue el de Madrid (**Metro de Madrid**), cuyo primer tramo comprendido entre las estaciones de Sol y Cuatro Caminos, se inauguró en octubre de 1919, formando una línea de 3,5 kilómetros y ocho estaciones.



Fig. 13. Metro de Madrid 1919. Fuente: treneando.com.

Estaciones de Sol y Cuatro Caminos, se inauguró en octubre de 1919, formando una línea de 3,5 kilómetros y ocho estaciones.

Años más tarde, el 30 de diciembre en 1924, se inauguró el **metro de Barcelona** (Transports Metropolitans de Barcelona),

entre las estaciones de Plaza de Cataluña y Fontana.



Fig.14. Metro de Barcelona 1924. Fuente: anotherbcn.com.

Otros países como Japón, en Tokyo (Teito Rapid Transit Authority, TRTA) en 1927 y en Osaka (Osaka Municipal Transportation Bureau) en 1933, o Rusia en Moscú (Moskovski Metropoliten) en 1953, también construyen sus propias líneas de metro.

Tras el auge de los túneles ferroviarios y pasada la Segunda Guerra Mundial es el turno del automóvil y obviamente, de la construcción de túneles carreteros. Como ejemplos más relevantes el **túnel de Vielha** en España (1948) con 5,2 kilómetros; los **túneles de Mont Blanc** (1965) con 11,6 kilómetros y el **túnel de Fréjus** (1980) con 12,9 kilómetros, que

unen Francia con Italia; el **túnel de Arlberg** en Australia (1978) con 14 kilómetros; o el **túnel de San Gotthard** en Suiza (1980), que con casi 17 kilómetros de longitud ha sido durante veinte años el túnel carretero más largo del mundo.

Los túneles han seguido su evolución, y toda esta evolución nos lleva hasta los actuales túneles del siglo XXI, uno de los grandes países que destacan, por la longitud de sus tuneles como por el número de túneles operativos y la tecnología usada en su construcción es China.

Actualmente China cuenta con el túnel más largo del mundo, esta sería la **línea 3 del metro de Guangzhou**(o línea expreso sur-norte) inaugurado el 26 de diciembre de 2005, este túnel es la unión de varias ramas subterráneas teniendo la rama principal una longitud de 60,4 kilómetros que conecta la plaza Panyu con la terminal de autobuses de Tianhe y la siguiente rama en forma de Y que conecta la línea entre Tianhe Coach Terminal y Tiyu Xilu con una longitud de 6,9 km, la unión de estas ramas convierten a este túnel, en el más largo del mundo con una longitud de toda la línea de 67,3 kilómetros.



Fig.15. Línea 3 metro de Guangzhou. Fuente: en.wikipedia.com.

El segundo túnel más largo del mundo también lo encontramos en china y al igual que el anterior es una línea de metro, y se trata de la **línea 10 del metro de Beijing**, esta línea subterránea atraviesa los distritos de Haidian, Chaoyang y Fengtai, esta línea subterránea tiene forma de bucle

con unas 45 estaciones en total, la línea se construyó por fases, la fase I de la línea 10 comenzó a construirse el 27 de diciembre de 2003 y estuvo operativa antes de los juegos olímpicos de Beijing de 2008, tenía 24,68 kilómetros y 22 estaciones. La construcción de la segunda fase comenzó el 28 de diciembre de 2007 y el 30 de diciembre de 2012, se abrió la primera sección de la Fase II, consistente en los lados sur y oeste del bucle. Con la apertura de la Fase I y la Fase II, la Línea 10 se convirtió en una forma de "C".



Fig.16. Línea 10 metro de Beijing. Fuente: en.wikipedia.com.

El lazo fue concluido totalmente el 5 de mayo de 2013 con la apertura de las estaciones de ferrocarril de Niwa, de Jiaomen del este, y de Fengtai. El servicio en la línea 10 ahora contiene los trenes del "lazo lleno" que hacen el viaje con todas las 45 estaciones en 104 minutos, y los trenes del "lazo parcial" que funcionan de Chedaogou en el noroeste de Songjiazhuang, las uniones de las dos fases hacen que este túnel sea el segundo más grande del mundo con una longitud de 57,1 kilómetros.

Los dos túneles anteriores se consideran los dos más grandes del mundo pero aunque estrictamente no son túneles que superan o atraviesan un obstáculo, más bien son túneles subterráneos formados por la unión de varios ramales o la unión de varias líneas que conforman dichos túneles y que por la unión de esos ramales y líneas hacen que sean los dos más grandes del mundo por su longitud, a continuación vamos a ver túneles del siglo XXI estrictamente ferroviarios y carreteros los cuales cuentan con entradas y salidas.

Un ejemplo de túnel ferroviario y considerado el más grande del mundo, aunque por su longitud y por atravesar un obstáculo vamos a clasificarlo como túnel más grande del mundo es **el túnel bajo de San Gotardo**, este túnel tiene una longitud de 57,09 kilómetros para el tubo este y de 56,97 kilómetros para el tubo oeste separados 41 metros entre si separados 40 metros entre si y conectados por galerías de conexión cada 325 metros, atraviesa el sur y el norte de Europa por debajo de los Alpes en Suiza.



Fig.17. Túnel bajo de San Gotardo. Fuente: commons.wikipedia.com.

La construcción de este túnel nace porque desde siglos la ruta a través del paso de Gotardo es una de las más importantes para atravesar los Alpes en el eje norte-sur de Europa, dado que el tránsito por esta ruta ha aumentado de manera exponencial desde los años 80 y por votación de los ciudadanos suizos se decidió la construcción de este túnel, de manera exponencial comenzó la construcción de este túnel desde los primeros sondeos que empezaron en 1993, los trabajos de perforación y excavación que se realizaron con 4 tuneladoras de una longitud de 440 metros y un diámetro de 9,58 metros desde 2003 hasta 2010 y su posterior inauguración en 2016.

Japón es otro de los grandes impulsores de túneles del siglo XXI y sus dos grandes túneles son una muestra de esa innovación y gran longitud es sus túneles, a continuación, describimos dos de sus grandes obras de la ingeniería.

El **túnel ferroviario de Seikan** en Japón abierto en 1988, por su longitud es el cuarto túnel más grande del mundo con una longitud de 53,8 kilómetros, se desarrolla durante 23,3 kilómetros bajo el fondo marino, a 100 metros por debajo del fondo del mar, con una profundidad máxima de 240 metros respecto al nivel de mar.



Fig.18. Entrada túnel de Seikan(Japón). Fuente: structuralia.com.

El **túnel de Hakkoda**, este túnel abierto en 2010 y con sus 26.445 metros, es el séptimo túnel más largo del mundo, se encuentra situado en la prefectura de Aomori en el norte de Japón, pasa a través de la cordillera



Fig. 19. Túnel de Hakkoda. Fuente: en.wikipedia.org.

de Hakkoda y une la aldea de Tenmabayashi con la ciudad de Aomori. Junto a este Japón tiene 5 de los túneles más largos del mundo, el túnel de Iwate-Ichinohe que se inauguró en 2002 cuenta con 25.810 metros de longitud es el octavo túnel más largo del mundo.

2.3 LOS TÚNELES EN ESPAÑA.

Debido a la complicada orografía española, la construcción de túneles es algo necesario para atravesar los sistemas montañosos, en España la construcción de estos sistemas viene de la mano de los **romanos** y de los **árabes** estos fueron los primeros constructores de obras subterráneas, el tipo de construcciones que realizaban eran sistemas de abastecimiento de agua, esto lo realizaban para transportar el agua de cabeceras fluviales a núcleos urbanos, una característica de los romanos es que seleccionaban agua de buena calidad para llevarla hasta las poblaciones sin importarles lo lejano que estuviera, ni lo grande que serían las infraestructuras a construir para transportarla, un ejemplo de estas construcciones.

Es **el túnel de Cella**(Teruel) cuenta con 5 kilómetros de longitud es el más grande descubierto para conducción de agua, se trata de una galería subterránea excavada en roca caliza de 1,25 metros de anchura y 2 metros de altura, con una profundidad de 60 metros, realizada a través de pozos de excavación, se trató de un trabajo de precisión topográfica se utilizaron para su construcción "libella" y el "chorobates"(primero instrumentos topográficos, esta obra se completó con el acueducto de Albarracin-Gea-Cella.

Se une a esta la infraestructura hidráulica romana de **Peña Cortada**(Valencia), esta se encuentra formada por acueductos, acequias y túneles, su labor era abastecer los campos de las cercanías.



Fig.20. Acueducto romano de Peña Cortada. Fuente: es.wikipedia.org.

Además, los romanos explotaron de forma sistemática las riquezas mineras de España, los yacimientos más importantes se encuentran en las **minas de Riotinto**(Huelva), **Linares**(Jaén), **Sierra Morena**, la **zona cantábrica**, **Almadén** (Ciudad Real) o en el **Noroeste peninsular**, toda esta actividad repercutió en el avance de la topografía y la hidráulica, así como el conocimiento de la geología, la unión de estos campos permitió la construcción de grandes infraestructuras.

Las técnicas utilizadas por los romanos consistían, en la excavación de pozos y galerías rectangulares de pequeña sección y con profundidades de hasta 200 metros, para la perforación se utilizaba cerchas de madera o revestimiento de piedras en las zonas blandas, se realizaban pequeñas cavidades en los hastiales para colocar lamparas de aceite, en esta época fue novedoso la utilización de herramientas de hierro frente a las de piedra y hueso que se habían empleado en épocas pasadas.

Al avance de la excavación se usaba el fuego y cuñas de madera que se mojaban y al hincharse provocaban el derrumbe, un gran avance fue la incorporación de desagües para solucionar la presencia de aguas, mediante galerías de varios kilómetros como en **Coto Fortuna**(Mazaron, Murcia), donde se hacía circular el agua por una galería de 2 kilómetros a 70 metros de profundidad o mediante sistemas mecánicos como la **noria o rueda de cangilones**, el **tornillo de Arquímedes** o más complejos como la **bomba de Ctsibio**. La mayor evolución tecnológica de la ingeniería romana fue la utilización de la fuerza hidráulica aplicada en los yacimientos auríferos del noreste peninsular, tanto en el proceso de extracción como en el de lavado de materiales y la evacuación de estériles.

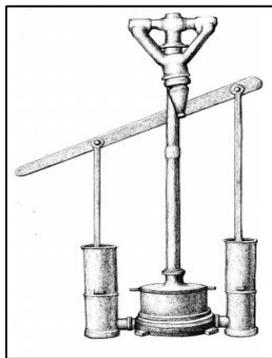


Fig.21. Bomba hidráulica de Ctsibio. Fuente: man.es.

Los Árabes dejaron en España un legado basado en los “**qanat**” como sistemas de abastecimiento de agua a las ciudades basados en redes de galerías subterráneas que captan las aguas pluviales por filtraciones del terreno y conducen el agua para la población por gravedad, aún quedan numerosos restos de estas construcciones en España, los más destacables son los “**qanat**” de la ciudad de Madrid, siendo este el único sistema de abastecimiento de agua potable desde su fundación en época musulmana siglo IX hasta el siglo XIX(cuando se creó el canal de Isabel II).

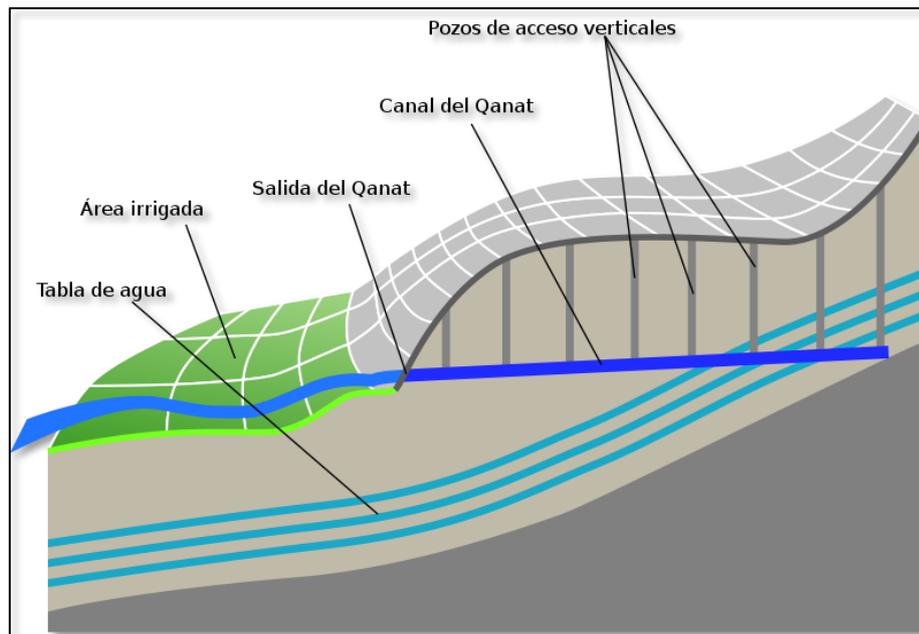


Fig.22. Captación de agua subterránea “qanat”. Fuente: es.wikipedia.org.

Continuando con la evolución histórica de los túneles en España, llegamos a época medieval y renacentista muestran un cierto retroceso técnico, algunos ejemplos de la época serían las **galerías del castillo de Burgos** (siglos XII Y XIII), o la **mina de Daroca** (Zaragoza), construida en el siglo XV para evitar la inundación de la ciudad.

La gran evolución en la construcción de túneles en España, no se dio hasta el siglo XIX y el XX donde se generaliza la construcción de estos por toda la orografía española, pero esta orografía supuso un reto para el trazado del ferrocarril debido a las grandes pendientes y a los radios de curvatura, esto hizo que el túnel sea el elemento fundamental para sortear los obstáculos montañosos del segundo país más abrupto de Europa, después de Suiza.

La red ferroviaria española discurre a lo largo de catorce corredores y existen más de 1700 túneles para su conexión, uno de los primeros túneles fue el de Madariaga finalizado en 1859, cuenta con 1.51 kilómetros de longitud bajo la meseta por el este hacia la costa mediterránea, también en 1859 se construye otra gran obra, la **línea Madrid-Barcelona** proyectada en dos tramos, en el tramo Madrid-Zaragoza se ejecutan 26 túneles destacando el túnel de Torralba en Medinaceli (Soria), de 3,23 kilómetros de longitud y construido en 1863, en el tramo Zaragoza-Barcelona entre 1890 y 1894 se construye inicialmente 33 túneles y para completar la línea se abrieron 56 túneles más.

Otros túneles que destacar de la época son, **el túnel de Sol de Horta** en Nopaste (Zaragoza) con una longitud de 1202 metros, **el túnel de Tasconeras** para bordear el río Matarraña de 1409 metros, la **línea ferroviaria Madrid-Irún**, que recorre 650 kilómetros se construyó entre los años 1862 y 1864, 58 túneles de los cuales cinco superan el kilómetro de longitud.

La **línea Castellón-Bilbao** 1863 de 250 kilómetros de longitud, cuenta con 19 túneles agrupados la mayoría en la sierra de Gibijo (Álava), otra de las líneas de la época es la **línea Chinchilla**(Albacete)-Cartagena(Murcia), construyeron 6 túneles en el año 1865.

Otro paso emblemático del siglo XIX es **el túnel de Reinosa** 1866 en



Fig. 23. Túnel de Reinosa. Fuente: vacarizu.es.

la línea Palencia-Santander superando un desnivel de 20 metros en sus 1.276 metros de longitud para bajar la meseta por el norte hacia el cantábrico. Desde finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX se produce una gran

mejora en los rendimientos de excavación gracias a la utilización de perforadoras de aire comprimido, esta es la época que se construyen grandes obras para superar la orografía española.



En 1920 el ferrocarril que ya tiene unos 12.000 kilómetros de tendido, sigue siendo el transporte por excelencia de la época y la construcción de túneles en España tiene un nuevo impulso debido a la dictadura de Primo de Rivera 1923-1930, con el **plan Guadalhorce** del ministro de fomento Rafael Benjumea, en estos años aparecen nuevas perforadoras mejorando las Ferroux, como las Ingersoll de martillos perforadores, igualmente accionados por aire comprimido, en julio de 1928 el presidente de la república francesa inaugura la línea Zaragoza-Pau, una gran cantidad de proyectos para el nuevo paso por los pirineos, pero solo dos de estos se llevaron a cabo, **el paso por franc** (Huesca) y el de **Puigcerdà** (Gerona) que se inauguraría al año siguiente.

En 1928 se completa la línea con el tramo más complicado entre Jaca y Canfranc, mediante una serie de 20 túneles siendo el más importante el que discurría por debajo del **macizo de Somport** en el pirineo oscense, con un total de 7.847 metros, 3796 de los cuales discurrían por suelo español, dicho proyecto fue aprobado por el Ingeniero Joaquín Bellido y se empleó para la excavación perforadoras Ingersoll-Rand y dinamita, mediante el sistema austriaco en su mayor parte, y también el método belga, este paso se interrumpe en 1970 hasta nuestros días por un grave accidente en el lado francés.

En 1933 se une Francia con Valencia pasando por Zaragoza, por la compañía del ferrocarril de Aragón, con la circulación del primer tren de mercancía cargado con naranjas y las esperanzas depositadas por los valencianos en la exportación de sus cítricos al país vecino, una vez construidas las líneas radiales y transversales españolas y pasada la Guerra Civil española surge la necesidad de completar líneas paralizadas, arreglar las deterioradas por la guerra y evitar que pasen por las ciudades, lo que da lugar a la creación de nuevos túneles en los años 40 y 50, con los planes de reconstrucción franquistas y la creación de Renfe.

En los años 70 se introduce la técnica del "**escudo**" de frente abierta, para roca blanda, también mencionar que en 1985 se empiezan a emplear las galerías piloto como sistema para mejorar el conocimiento del terreno, un ejemplo es la línea entre Zamora y La Coruña que se paralizó en 1864,

retoma sus obras en 1927 aunque se vuelve a paralizar debido a la Guerra Civil, retomándose nuevamente al término de la misma, su construcción finaliza y se inaugura en 1957, además constituye un gran acontecimiento social, con 453 kilómetros y 185 túneles que miden 77 kilómetros, mantiene el récord de ser la línea convencional con mayor porcentaje de túneles, todas estas construcciones iban ligadas a la construcción de redes ferroviarias provinciales y locales un ejemplo destacable es el túnel urbano de la línea asturiana Tudela-Veguín a Lugo de llanera, la línea de 11 kilómetros tiene dos túneles, en la actualidad con la incorporación del AVE a nuestras redes de transporte y debido a cambios en los requerimientos técnicos se han realizado nuevos túneles y se han modificado los ya construidos para adaptarse a los nuevos requerimientos.

Ya hemos visto la evolución de los túneles ferroviarios en España, ahora vamos a dar un breve recorrido por los túneles carreteros de del siglo XX en España, esta red de túneles carreteros se construye para salvar los principales obstáculos montañosos del país, en la red de carreteras del Estado existen unos 405 túneles, con una longitud aproximada de 214 kilómetros.

Una de las principales obras de la Ingeniería española es el **túnel de Vielha**, este túnel se encuentra situado en la carretera N-230(Tortosa-Francia), en la provincia de Lleida, entre las poblaciones de Vilaller (al sur) y Vielha (al norte), empezó a construirse en 1926 aunque la idea fue planteada en el siglo XIX, es una de las vías de comunicación entre España y Francia por el Pirineo Central, este túnel tiene una longitud de 5240 metros de longitud compuesto por dos carriles de 3 metros de ancho cada uno y dos aceras de medio metro de ancho, con una pendiente del 5%, el diseño de su trazado es recto, ya que inicialmente fue proyectado para línea de ferrocarril, en su construcción los escombros eran retirados por burros en pequeñas carretas a modo de mina, en los primeros años de servicio el túnel se cerraba con portones pero la fuerza de la ventiscas en muchas ocasiones no permitía abrirlos de nuevo, en 1926 se inicia la carretera de acceso así como las primeras perforaciones y también los

primeros problemas ya que en un principio se había proyectado para una línea de ferrocarril pero finalmente en 1928 por orden del General Martínez Anido, ministro de gobernación, después de decidir que se emplearía el ancho a 7 metros la cual permitía el paso de vehículos en ambos sentidos, las obras quedan paralizadas en 1933, aunque se vuelven a reanudar después de la guerra civil en 1939, se consigue el cale del túnel dos años más tarde y finalmente entra en servicio en 1948, desde entonces se han realizado mejoras en el túnel como túneles artificiales en curva para hacer que reduzca la velocidad y evitar el deslumbramiento, además de galerías de ventilación, detectores de fuegos, puestos de socorro, etc.



Fig.24. Trabajos de reforma del Túnel de Vielha. Fuente: valdaran.com.

Continuando con la evolución histórica de los grandes túneles en España tenemos, los **túneles de Huerna** que los encontramos siguiendo la ruta de la plata, esta serie de túneles se proyectaron para suavizar el trayecto, estos túneles están compuestos por los **túneles de El Padrún** que constan con un doble tubo con tráfico unidireccional y dos carriles por sentido de circulación con 1.784 metros de longitud dirección Mieres y de 1.723 metros sentido Oviedo con orientación norte-sur y prácticamente recto salvo en sus entradas, se puso en marcha 1993 y ha sufrido modificaciones estructurales que finalizaron en 2001, los **túneles de Pando** cuentan con una longitud de 1.220 metros para la primera calzada y de 1.453 metros para la segunda calzada, con una separación entre ejes que oscila entre los 20 y 55 metros, poniéndose en funcionamiento en

1991 la sección de los túneles es circular empleándose el nuevo método austriaco al igual que los túneles de El Padrún, consta de dos carriles de 3,5 metros por sentido, también está dotado de equipo de seguridad y señalización de última generación ,los **túneles de Barrios** se abren en 1993 formado por dos tubos, el primero de los cuales por una longitud de 1.600 metros y el segundo con una longitud de 1.614 metros, de sección circular los túneles cuentan con dos aceras de 0,8 metros a cada lado y dos carriles de 3,5 metros de ancho cada uno de ellos, y los **túneles de El Negrón** los cuales se ponen en funcionamiento en 1997 con una longitud de 1.600 metros para la primera calzada y de 4.144 metros para la segunda calzada, estos túneles atraviesan el macizo de El Negrón, separados en planta entre 32 y 65 metros y con recubrimiento sobre clave de 651 metros están intercomunicados por tres galerías de aproximadamente 60 metros cada una, la sección circular es idéntica a la de otros túneles destacando los edificios de ventilación del túnel de la primera calzada donde se ubican los ventiladores y proporcionan una atmosfera libre de contaminación, los radios del trazado son muy amplios superando el radio 17.000 con pendientes ascendentes y descendentes que no supera el 1,7 % con un acuerdo vertical, estos son una serie de túneles carreteros más relevantes en la historia del país.



Fig.25. Construcción túnel del Negrón. Fuente: Ine.es.

2.4 LOS GRANDES TÚNELES DE ESPAÑA.

Dos de las grandes obras de la Ingeniería española son los túneles ferroviarios de **Guadarrama** y **Pajares**, estos túneles estuvieron durante varios años entre los 10 túneles más largos del mundo, vamos a conocer la gran importancia desde el punto de vista de la Ingeniería como las diversas características y dificultades en la construcción de estos túneles.

Los **túneles de Guadarrama** cuentan con una longitud de 28.377 metros, esta serie de túneles representa un hito sin precedentes en las obras subterráneas, además es el primer túnel en construirse sin accesos de ataque intermedios, atravesando la sierra de Guadarrama cuyo trazado discurre entre los términos municipales de Miraflores de la Sierra(Madrid) y Segovia, en este proyecto se construyeron dos túneles paralelos de vía única, con cuatro tuneladoras mixtas de doble escudo para roca dura diseñadas en Alemania y Suiza de más de 1500 toneladas de peso y diámetro de 9,5 metros, la excavación de los tubos se realizó en menos de tres años cuyo cale se realizó en 2005 y su apertura en 2007, el avance de las tuneladoras fue de 15,8 metros/día, la construcción de estos túneles ha permitido un nuevo trazado a través del sistema central, superando un obstáculo geográfico históricamente insalvable para las comunicaciones ferroviarias entre el centro y el norte-noreste peninsular.

El terreno por perforar estaba formado por rocas duras y abrasivas



Fig. 26. Tuneladoras (TBM).
Fuente: adifaltavelocidad.es.

(granito y gneises) y con dos fallas, las tuneladoras mixtas de doble escudo fueron transportadas y montadas en España por piezas, de manera simultánea se crean plantas de fabricación de dovelas de hormigón para el revestimiento, en la perforación con tuneladoras el objetivo era encontrarse tras avanzar los 14 kilómetros, en su avance las tuneladoras que excavaban a una sección de 9,45 metros no solo perforaban

sino que revestían el terreno con anillas de dovelas de hormigón, con espesor de 34 centímetros y una anchura de 1,60 metros.

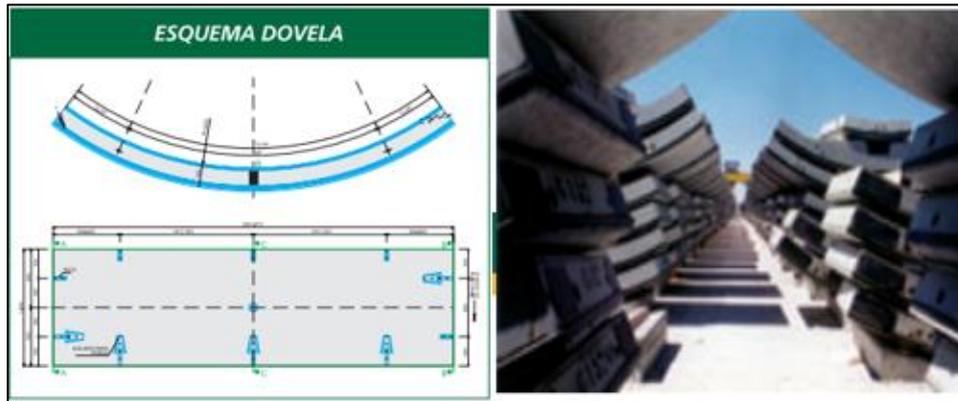


Fig.27. Esquema de dovelas utilizadas en el túnel de Guadarrama. Fuente: adifaltavelocidad.es.

Como medida de precaución cada 250 metros se efectuaron las galerías de conexión entre los tubos por métodos convencionales, para que pudieran servir como vía de escape ante un posible derrumbe, en el exterior se prolongaron las bocas artificialmente unos 500 metros, en total se extrajeron 4 millones de metros cúbicos de roca he instalaron 248.304 doveles de hormigón, una vez terminado este proceso se inicia la fase de equipamiento de señalizaciones, seguridad y ventilación de las instalaciones, así como el montaje de las instalaciones ferroviarias y demás equipamiento, dicha fase duro aproximadamente un año, hasta que el 11 de septiembre de 2007 un tren laboratorio atravesó por primera vez los túneles.

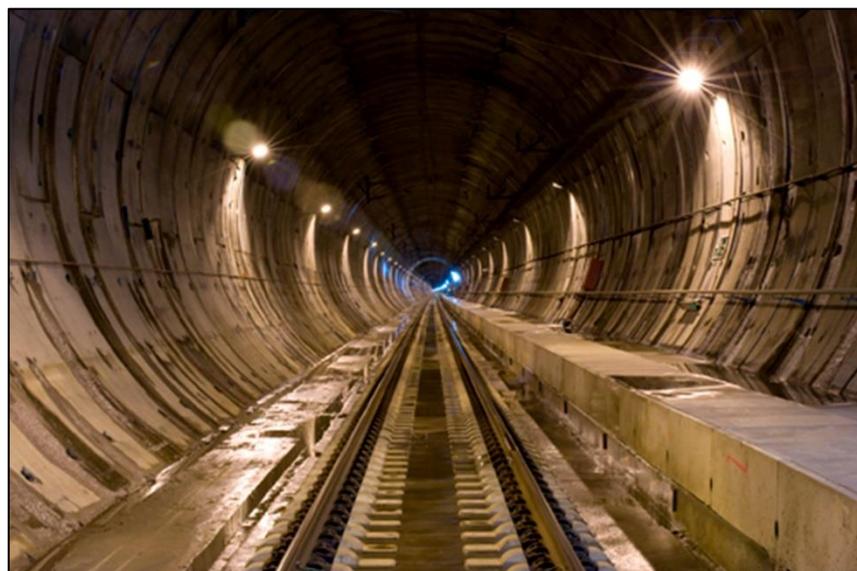


Fig.28. Túnel de Guadarrama. Fuente: adifaltavelocidad.es.

Otro de los grandes túneles de España, es **el túnel de Pajares**, dado que el puerto de Pajares ha supuesto una barrera natural en la cordillera cantábrica lastrando las comunicaciones entre la meseta central y Asturias, pero esta situación con la construcción de la variante de Pajares que incluye los segundos túneles, dicha variante forma parte de la línea de alta velocidad entre León y Asturias y se dividió en tres tramos siendo su tramo central el correspondiente a los túneles de Pajares abarcando este cuatro de los siete lotes en los que se subdivide.



Fig.29. Túnel de Pajares. Fuente: adifaltavelocidad.es.

El proceso constructivo de base establecía la constitución de dos tubos de vía única, con una sección circular de 8,5 metros de diámetro libre, y una separación entre ejes de 50 metros, para su construcción dada la longitud y sus características geológicas, compuesta por rocas duras principalmente formaciones de pizarras, areniscas, cuarzo y rocas carbonatadas, se empleó al igual que en el túnel de Guadarrama, tuneladoras que en número de cinco unidades abarcarían el macizo desde cinco puntos, con la ejecución de ataques intermedios.



Fig.30. Tuneladoras TBM (Túnel de Pajares). Fuente: adifaltavelocidad.es.

Las tuneladoras iniciaron la excavación en fases diferentes desde el 13 de julio de 2005 que comenzó la correspondiente al tubo oeste de la vertiente leonesa hasta la última en julio de 2006, con los tubos de la vertiente asturiana, por lotes de evolución son los siguientes:

Lote 1: Ejecución de los tubos este-oeste entre Pola de Gordón y Folledo, bajo la Sierra del Rozo durante 10,7 kilómetros, se ejecutaron 29 galerías transversales cada 400 metros, así como otras galerías destinadas a equipamiento.

Lote 2: Esta comprendido entre Folledo y Viadangos (León) constituyendo el tramo central de los túneles, y corresponde a la construcción de dos tubos de 3,9 kilómetros que conectan con el lote 1 por el sur y con los lotes 3 y 4 por el norte, contempla también la ejecución de 9 galerías transversales y un puesto de parada preferente.

Lote 3: Comprende la excavación del tubo este durante 10,4 kilómetros entre Telledo y Viadangos, también le corresponde a este lote construir las plataformas para el montaje de las tuneladoras de la parte asturiana, la cinta de extracción de escombros y dos viaductos sobre el río Huerna. En esta parte la tuneladora se encontró con rocas con un índice de fracturación mayor de lo esperado, por lo que el avance fue lento, éste finalizó en 2008 con el contacto con el tubo este del lote 2.

Lote 4: Comprende la excavación del tubo oeste durante 10,4 kilómetros entre Telledo y Viadangos, también le corresponde la ejecución de las galerías transversales, así como otras galerías para equipos, la tuneladora se encontró con un terreno muy degradado, incluso llegó a quedarse atascada, pero finalmente pudo ser liberada y finalizar su trabajo. Finalmente, el material excavado ascendió a 5,5 millones de metros cúbicos empleando 229.047 dovelas de hormigón.

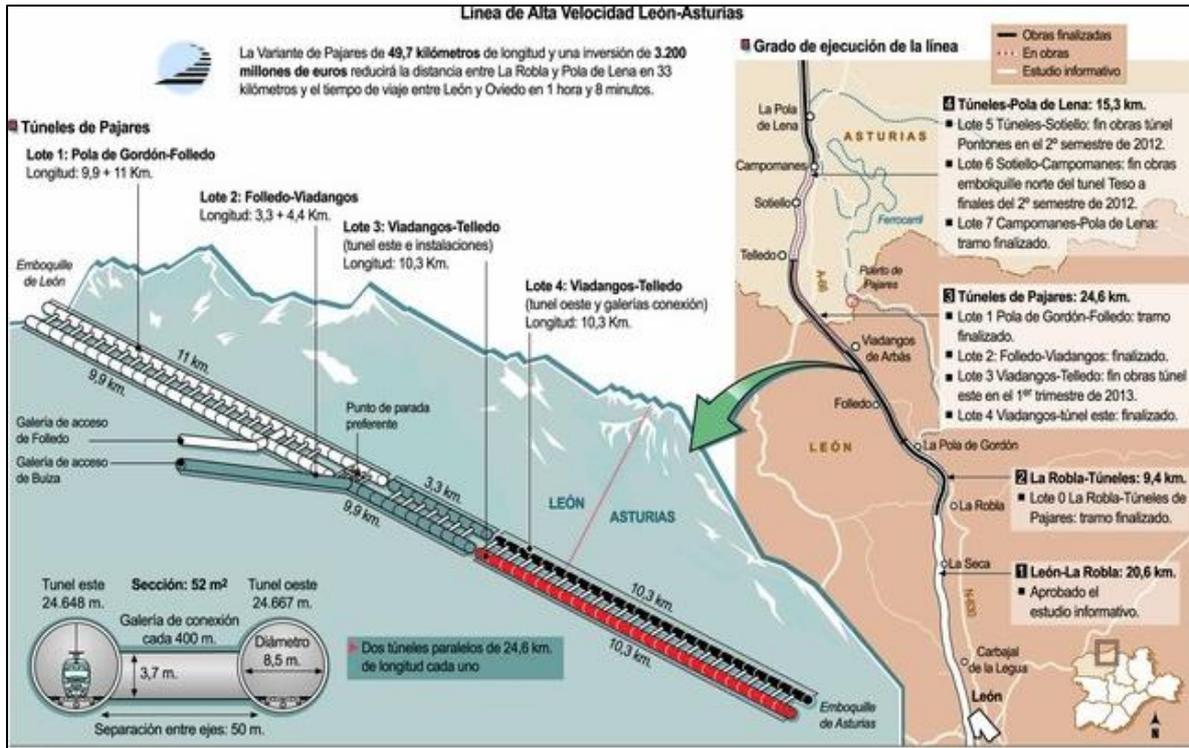


Fig.31. Descripción de los diferentes lotes del Túnel de Pajares. Fuente: adifaltavelocidad.es.



*CAPITULO 3:
NORMATIVA EN SEGURIDAD
DE TÚNELES.*

3. NORMATIVA EN SEGURIDAD DE TÚNELES.

El desarrollo de las infraestructuras y el crecimiento de estas no puede verse limitado solamente por incremento en la extensión de la red de carreteras, sino que también ha de fomentar la mejora de sus características de diseño y construcción que permita una explotación más eficiente de aquéllas, todo la normativa referente a los requisitos mínimos de seguridad en los túneles del estado viene detallado en el Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, a fin de dar a conocer en el presente trabajo la normativa vigente referente a seguridad mínima en túneles, vamos a resumir esta para dar una breve descripción de todos los aspectos a tener en la ejecución de túneles.

La seguridad constituye uno de los objetivos más importantes hacia los que debe enfocarse prioritariamente la acción de gobierno en materia de infraestructuras y transportes, por lo que reducir los riesgos de que se produzcan accidentes es una tarea fundamental, utilizando todos los medios posibles, uno de los cuales es precisamente la mejora de las características de diseño y construcción de las infraestructuras.

Los túneles de carretera son elementos que por sus singulares características dentro de la red viaria merecen una atención especial.

Dado que cualquier incidencia grave que les afecte puede provocar alarma social, dadas las circunstancias concurrentes y específicas del lugar en que se produce, las dificultades de rescate o evacuación, el dramatismo provocado por el confinamiento o el trastorno que para el sistema de transportes puede suponer el cierre temporal de un tramo viario, en ocasiones con alternativas difíciles o inexistentes.

Es por ello por lo que el Gobierno de la Nación viene prestando especial interés a la seguridad en los túneles de carreteras, que son importantes en número y longitud, dadas las condiciones orográficas de nuestro país.

Fruto de ese interés son las numerosas actuaciones que se han venido desarrollando en los últimos años en orden al acondicionamiento de túneles existentes, reforzando sus equipamientos de seguridad, así como

al de los nuevos túneles, extremando sus condiciones de diseño para hacerlos más seguros para el usuario.

La puesta en servicio de túneles o su reapertura se someten a un procedimiento reglado, en el que la intervención del responsable de seguridad garantiza en todo momento una atención prioritaria al cumplimiento de los requisitos mínimos establecidos en la normativa.

La inspección periódica de los túneles se establece obligatoriamente, con objeto de asegurar en todo momento el mantenimiento de las condiciones de seguridad, así como la adopción en su caso de las medidas que permitan mejorar dicha seguridad.

Se define asimismo el sistema de información sobre incidentes que habrá de establecerse para ampliar el conocimiento sobre el funcionamiento de este tipo de estructuras singulares y hacer posible la adopción de medidas que mejoren sus condiciones de seguridad.

Cada túnel tendrá un responsable de seguridad designado por la Dirección General de Carreteras, que podrá ser diferente para cada una de las fases de proyecto, construcción y explotación del túnel y que coordinará, durante la fase correspondiente.

3.1 RESPONSABLE DE SEGURIDAD DEL TÚNEL.

El responsable de seguridad podrá tener una relación funcional o contractual con el gestor del túnel, pero no recibirá instrucciones de aquél en relación con el ejercicio de sus funciones.

El responsable de seguridad tendrá durante la **fase de proyecto**, entre otras, las siguientes funciones:

- Colaborar con el redactor del proyecto en todos aquellos aspectos relacionados con la seguridad del túnel.
- Informar al gestor del túnel y a la autoridad administrativa sobre la documentación de seguridad del túnel, con carácter previo a la aprobación del proyecto.

El responsable de seguridad tendrá durante la **fase de construcción**, entre otras, las siguientes funciones:

- Colaborar con la dirección de las obras y con el responsable de seguridad y salud de aquéllas.
- Verificar la adecuación de las instalaciones de seguridad del túnel, tanto de los equipamientos como de su ejecución o montaje, a lo establecido en el proyecto.
- Informar a la autoridad administrativa y al gestor del túnel sobre posibles modificaciones de las instalaciones en relación con las previstas en el proyecto.
- Asesorar, previamente a la resolución de autorización de puesta en servicio de la estructura, sobre el equipamiento y el manual de explotación.

El responsable de seguridad tendrá durante la **fase de explotación**, entre otras, las siguientes funciones:

- Asegurar la coordinación con los servicios de emergencia y participar en la preparación de los planes de actuación;
- Participar en la planificación, puesta en práctica y evaluación de las operaciones de emergencia.
- Participar en la definición de los planes de seguridad y en la especificación de la estructura, equipamiento y funcionamiento.
- Verificar la formación del personal del túnel y de los servicios de emergencia.
- Asesorar, previamente a la resolución de autorización de apertura o de reapertura al tráfico, sobre las actuaciones de acondicionamiento, el equipamiento y el manual de explotación.
- Verificar el mantenimiento y las reparaciones de estructura y equipamiento de los túneles relacionadas con la seguridad.
- Participar en la evaluación de cualquier incidente o accidente importante.
- Proponer el cierre o restricción del tráfico si no se cumplen todas las medidas de seguridad.

3.2 INSPECCIÓN DEL TÚNEL.

Los organismos de inspección llevarán a cabo inspecciones, evaluaciones y pruebas, y le corresponde a la autoridad administrativa ejercer las tareas de inspección sobre los túneles en los aspectos regulados en el Real Decreto 635/2006, el período comprendido entre dos inspecciones consecutivas de un determinado túnel no será superior a cinco años, en caso de obtener tras la inspección un informe desfavorable se le comunicara al gestor del túnel y al responsable de seguridad que deberán adoptar las medidas para subsanar dichas irregularidades por el gestor del túnel en un plazo de máximo de tres meses. Si las medidas correctoras incluyesen algún tipo de modificación sustancial de la construcción o de la explotación, una vez tomadas estas medidas, deberá contarse con una nueva autorización para que el túnel reanude su funcionamiento.

La norma también nos dice que se debe realizar el análisis de riesgo de un túnel el cual deberá tener en cuenta todos los factores que afectan a la seguridad, en particular, la geometría del túnel, el entorno, el equipamiento, las características del pavimento y el tráfico y el tiempo de llegada de los servicios de emergencia, dichos análisis de riesgo serán realizados, cuando resulten necesarios, por un organismo funcionalmente independiente del gestor del túnel, el contenido y los resultados de los análisis de riesgo se incluirán en el manual de explotación que se remita a la autoridad administrativa, para recabar las autorizaciones pertinentes.

Las tareas de inspección podrán ser desempeñadas para los túneles de la red de carreteras del Estado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, organismo al que preferentemente se encomendará dicha función por la Secretaría de Estado de Infraestructuras y Planificación del Ministerio de Fomento.

3.3 MEDIDAS DE SEGURIDAD EN EL TÚNEL.

Las medidas de seguridad a aplicar en cada túnel se basarán en un estudio sistemático de todos los aspectos del sistema compuesto por la infraestructura, los usuarios y los vehículos.

Se tendrán en cuenta los parámetros siguientes:

- Longitud del túnel.
- Número de tubos.
- Número de carriles.
- Geometría de la sección transversal.
- Planta y alzado (especialmente la pendiente).
- Tipo de construcción.
- Tráfico unidireccional o bidireccional.
- Volumen de tráfico por tubo (incluida su distribución temporal).
- Riesgo de congestión (diaria o de temporada).
- Tiempo de acceso de los servicios de emergencia.
- Presencia y porcentaje de vehículos pesados.
- Presencia, porcentaje y tipo de tráfico de mercancías peligrosas.
- características de las vías de acceso.
- Velocidad máxima autorizada.
- Medio geográfico y climatología.

Cuando un túnel tenga características especiales con relación a los parámetros antedichos, deberá llevarse a cabo un análisis de riesgo para establecer si son necesarias medidas adicionales de seguridad o equipamiento complementario para garantizar un adecuado nivel de seguridad del túnel. Dicho análisis de riesgo tomará en consideración los posibles accidentes que puedan afectar claramente a la seguridad de los usuarios del túnel, así como la naturaleza y magnitud de sus posibles consecuencias.

3.4 REQUISITOS MÍNIMOS DE SEGURIDAD.

A continuación, vamos a describir los requisitos mínimos de seguridad, en función de los distintos parámetros, para garantizar un nivel mínimo de seguridad en los túneles. Podrán permitirse excepciones de estos requisitos siempre que se lleve a cabo con éxito el análisis de riesgo antes mencionado.

A fin de proporcionar una interacción usuario túnel homogénea en todos los túneles, no se permitirá excepción alguna en relación con los requisitos establecidos, instalaciones de seguridad del túnel que están a disposición directa de los usuarios (emisoras de emergencia, señales, apartaderos, salidas de emergencia y comunicación por radio cuando resulte necesario).

- **Volumen de tráfico.**

Cuando el número de vehículos pesados supere el 15 % de la IMD, o cuando existan valores de IMD estacionales que sean significativamente superiores se evaluará el riesgo adicional y se tendrá en cuenta incrementando proporcionalmente la cifra de volumen de tráfico en el túnel para la aplicación de los puntos siguientes.

- **Número de tubos y carriles.**

Los principales criterios para decidir si se construye un túnel de un tubo o de dos serán el volumen de tráfico previsto y la seguridad, teniendo en cuenta aspectos como el porcentaje de vehículos pesados, la pendiente longitudinal y la longitud.

- **Geometría del túnel.**

Se tendrá especialmente en cuenta la seguridad al proyectar la geometría de la sección transversal y la alineación horizontal y vertical del túnel y sus vías de acceso, ya que sus parámetros tienen una gran

influencia en la probabilidad y gravedad de los accidentes. Se cumplirán los criterios y especificaciones recogidas en la Norma de trazado 3.1-IC de la Instrucción de Carreteras.

- **Pavimento y revestimientos de hormigón proyectado.**

Pavimento: La resistencia al deslizamiento medida por el coeficiente de rozamiento transversal (CRT) del firme en el interior del túnel no será inferior a 60

Revestimiento de hormigón proyectado: si el túnel no dispusiese de un revestimiento rígido, deberán instalarse secciones de auscultación permanente en algunas zonas del túnel para tomar las medidas que en cada caso se indiquen en el manual de explotación.

- **Aceras.**

En los túneles nuevos sin carril de emergencia, se habilitarán aceras, preferentemente elevadas, para que los usuarios del túnel las empleen en caso de avería o accidente.

- **Salidas de emergencia y vías de evacuación.**

Las salidas de emergencia permitirán a los usuarios del túnel utilizarlas para abandonar el túnel sin sus vehículos y llegar a un lugar seguro en caso de accidente o incendio y también proporcionarán acceso a pie a los servicios de emergencia del túnel.

- **Acceso de los servicios de emergencia.**

En aquellos túneles de más de un tubo que se encuentran a similar cota a lo largo de la rasante y en los que sea obligatorio este equipamiento, las conexiones transversales deberán poder permitir el acceso de los vehículos de emergencia al menos cada 1.200 metros.

- **Apartaderos.**

En los túneles bidireccionales en fase de proyecto o construcción de longitud mayor de 1.500 metros, con un volumen de tráfico superior a 2.000 vehículos por carril, deberán habilitarse apartaderos a distancias no superiores a los 1.000 metros, caso de que no estén previstos carriles de

- **Drenaje.**

En túneles de longitud superior a 500 metros, si se permite la circulación por el túnel de vehículos de transportes de mercancías peligrosas, deberán disponerse caces con ranuras, u otros dispositivos, situadas dentro de las secciones transversales de los túneles, que permitan el drenaje de líquidos tóxicos e inflamables

- **Resistencia de la estructura a los incendios y al agua.**

La estructura principal de todos los túneles en los que el derrumbamiento local de la estructura pueda tener consecuencias catastróficas (por ejemplo, túneles subacuáticos o túneles que puedan causar el colapso de estructuras próximas de importancia) garantizará un nivel suficiente de resistencia al fuego.

- **Iluminación.**

La iluminación normal se proporcionará de modo que asegure a los conductores una visibilidad adecuada de día y de noche en la entrada del túnel, en las zonas de transición y en la parte central.

- **Ventilación.**

Todos los túneles que requieran sistema de ventilación artificial deberán contar con su correspondiente sistema de automatismo.

- **Puestos de emergencia.**

El objeto de los puestos de emergencia es proporcionar diversos equipos de seguridad, en particular teléfonos de emergencia y extintores, pero no tienen la finalidad de proteger a los usuarios de la carretera de los efectos de un incendio.

- **Red de hidrantes.**

Habrán hidrantes cerca de la entrada y en el interior, a intervalos no superiores a 250 metros. Si no se dispusiese de red de suministro de agua, será obligatorio disponer de otro tipo de abastecimiento propio.

- **Señalización.**

La señalización de todos los túneles se regirá por el Catálogo de Señales del Código de la Circulación.

Se utilizarán señales específicas para identificar todos los equipos de seguridad que están a disposición de los usuarios del túnel.

- **Centro de control.**

Todos los túneles deberán estar dotados de un centro de control que recogerá toda la información procedente de las instalaciones fijas.

- **Sistemas de vigilancia.**

En todos los túneles dotados de un centro de control se instalarán sistemas de vigilancia por vídeo, con orientación y zoom para las cámaras externas, y un sistema capaz de detectar de forma automática incidentes e incendios, todo ello de conformidad con los requisitos establecidos en la normativa vigente para este tipo de instalaciones.

- **Equipos para el cierre del túnel.**

En todos los túneles que lo requieran, se instalarán semáforos y barreras antes de las entradas, con los pertinentes preavisos, a suficiente distancia para que la detención se efectúe sin riesgo para la seguridad y sin obstaculizar el acceso de los vehículos de emergencia y de forma que el túnel pueda cerrarse al tráfico en caso de emergencia.

- **Sistemas de comunicaciones.**

En todos los túneles, se instalarán equipos de transmisión por radio para su utilización por los servicios de emergencia.

- **Suministro de electricidad y circuitos eléctricos.**

Todos los túneles que lo requieran deberán disponer de doble fuente de suministro de energía y de grupos electrógenos, así como de un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI).

- **Medidas relacionadas con la explotación.**

La explotación debe estar organizada y disponer de los medios adecuados de forma que se garanticen la continuidad y seguridad del tráfico a través del túnel.

- **Campañas de información.**

Se organizarán campañas de información sobre la seguridad en los túneles. Dichas campañas de información abordarán el correcto comportamiento de los usuarios de las carreteras al aproximarse a los túneles y al circular por su interior, especialmente por lo que respecta a las averías de los vehículos, la congestión, los accidentes y los incendios. La información sobre los equipos de seguridad disponibles y sobre la

conducta correcta del usuario de la carretera en los túneles se facilitará en lugares cómodos para los usuarios de los túneles.

3.5 SEÑALIZACIÓN DE LOS TÚNELES.

A continuación, se repasa las señales y símbolos que han de utilizarse en los túneles. Su descripción figura en el Convenio de Viena sobre señalización vial de 1968 y demás normativa vigente en materia de señalización de carreteras y circulación, salvo que se indique lo contrario.

Se utilizarán señales viales para identificar los siguientes equipos de seguridad de los túneles:

- **Apartaderos.**
- **Salidas de emergencia:** se utilizará la misma señal para todos los tipos de salidas de emergencia.
- **Vías de evacuación:** las dos salidas de emergencia más próximas estarán señalizadas en las paredes a distancias no superiores a 25 m, y a una altura de entre 1,0 y 1,5 metros por encima del nivel de la vía de evacuación, con indicación de las distancias que hay hasta las salidas.
- **Puestos de emergencia:** señales que indiquen la presencia de teléfonos de emergencia y extintores.

Las señales e indicaciones se diseñarán y situarán de modo que sean claramente visibles.

Se utilizarán las señales adecuadas en la zona de advertencia anterior al túnel, dentro de éste y después del final del mismo.

Señal de túnel. Se situará la siguiente señal en cada entrada del túnel:



Fig.32. Señal E11A (entrada de túnel). Fuente: Convenio de Viena 1968.



Fig.33. Cartel Autopista 1A. Fuente: Convenio de Viena 1968.



Fig.34. Cartel Autopista 2A. Fuente: Convenio de Viena 1968.



Fig.35. Carretera convencional 1A. Fuente: Convenio de Viena 1968.



Fig.36. Carretera convencional 2A. Fuente: Convenio de Viena 1968.



Fig.37. Señalización de teléfono de emergencia y extintor. Fuente: Convenio de Viena 1968.



Fig.38. Señalización de apartaderos y salidas de emergencia. Fuente: Convenio de Viena 1968.



Fig.39. Señalización de las salidas de emergencia. Fuente: Convenio de Viena 1968.

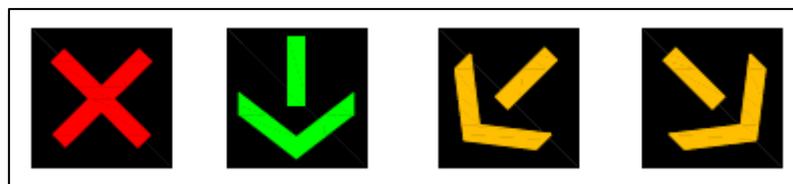


Fig.40. Señalización del estado de los carriles. Fuente: Convenio de Viena 1968.



*CAPITULO 4:
CLASIFICACIÓN, GEOMETRIA Y
ELEMENTOS DE UN TÚNEL.*

4. CLASIFICACIÓN, GEOMETRIA Y ELEMENTOS DE UN TÚNEL.

4.1 CLASIFICACIÓN DE LOS TÚNELES

Como expone el libro "Manual de túneles y obras subterráneas", se establece una clasificación de los diferentes tipos de túneles, según una serie de parámetros que vemos a continuación.

- **Según su objetivo:**

Túneles viales: Son aquellos que se construyen con el objetivo de ser destinados a carreteras, ferrocarriles, accesos vehiculares o sistemas de trenes metropolitanos, estos últimos componen una clase aparte.

Túneles hidráulicos: Estos son construidos con el objetivo de transportar agua, para centrales hidroeléctricas, abastecimientos, sistemas de riego, canalizaciones, navegación, etc. Pueden ser de flujo libre o de presión.

Túneles comunales: Son túneles que se construyen en las ciudades, cuyo objetivo principal es el paso de peatones, cableado, tuberías, etc. Estos túneles normalmente se construyen por debajo de edificaciones y vías por lo que se requiere una metodología específica para evitar daños en las construcciones ya existentes.

Túneles mineros: Estas obras están construidas para el acceso al interior de un macizo, con el objetivo de su explotación minera y transporte de las materias primas.

Túneles especiales: Son túneles con una destinación específica. El modo de construirlo, así como su diseño se acomoda al objetivo del túnel.

- **Según su ubicación respecto la geología física del lugar:**

En montaña: Cuando el túnel se construye para atravesar un obstáculo montañoso del terreno.

En plano: Cuando el túnel se construye en terrenos planos, normalmente ubicados en las ciudades, el paso de peatones por zonas de tráfico, para descongestionar las arterias de la ciudad, etc.

Subacuáticos: Son los túneles ideados para salvar un obstáculo generado por una corriente fluvial, como ríos, canales, estrechos, etc.

- **Según su profundidad:**

Subsuperficiales: Si la cobertura o techo no supera los 50 metros. Aquí se encuentra todos los túneles de las áreas urbanas.

Poco profundos: Si la profundidad se encuentra entre 50 y 200 metros. Aquí se abarca la mayoría de los túneles de corto y medio recorrido, ejecutados en montaña.

Profundidad media: Cuando la cobertura se encuentra en los 200 y 500 metros. En este intervalo se encuentran algunos de los túneles de medio y largo recorrido construidos en montaña.

Profundos: Construidos con coberturas entre 500 y 1000 metros.

Muy profundos: Cuando las profundidades de la construcción del túnel superan los 1000 metros.

- **Según su longitud:**

Cortos: Si la longitud es menor de 500 metros.

Medianos: Si la longitud se encuentra entre los 500 y 2000 metros.

Largos: Si la longitud se encuentra entre los 2 y 5 kilómetros.

Muy largos: Si la longitud supera los 5 kilómetros.

- **Según la ubicación geográfica:**

Túneles rurales: Cuando estos se encuentran fuera de los núcleos de población.

Túneles urbanos: cuando se localizan por debajo de los núcleos de población, vías, viviendas, etc.

- **Según su geología:**

En roca dura: Cuando las características de las rocas muestran una cierta dureza, es el caso de macizos de montaña.

En roca blanda: Cuando las características de las rocas muestran una menor dureza, se suelen localizar en cercanías de pasos fluviales.

- **Según su geometría:**

Túneles circulares: Son túneles cuya sección tipo es circular.

Túneles de herradura: Túneles cuya sección tipo tiene forma de herradura.

Túneles de bóveda: Túneles cuya sección tipo están coronados por una bóveda.

Túneles rectangulares: Túneles cuya sección tipo es rectangular.

4.2 GEOMETRÍA Y ELEMENTOS DE UN TÚNEL.

El diseño geométrico de la sección transversal de un túnel tiene gran importancia, ya que desde el principio hay que tener en cuenta las dimensiones pretendidas desde el punto de vista funcional de explotación, y lo más importante la forma óptima desde el punto de vista geotécnico, la forma ideal es la circular como sección tipo para cualquier túnel ya sea carretero o de ferrocarril, pero existen otras con diversas formas abovedadas, o incluso rectangulares, por todo esto la forma y el tamaño deben ser adecuados para las características y tipo de terreno que se va a perforar, o a los fenómenos aerodinámicos en el caso de túneles ferroviarios, debidos al efecto de rozamiento tren-aire-túnel.

Otro aspecto para tener en cuenta es el económico ya que este influye en los volúmenes de excavación de obras subterráneas y de revestimiento, ya que pequeñas variaciones del área de excavación o del espesor del revestimiento tienen repercusión en los costes de construcción.

La sección transversal de un túnel queda definida dimensionalmente por el gálibo, altura o distancia vertical del espacio interior del túnel, por la luz, anchura o distancia horizontal medida en el interior del túnel.

Estructuralmente la sección transversal de un túnel se define por tres zonas: **la bóveda** (superficie semicilíndrica que cubre el espacio superior comprendido entre dos muros paralelos); **los hastiales** (muros laterales donde apoya la bóveda); y **la contrabóveda**, solera, suelo o parte inferior del túnel. Se denomina "línea de hombros" al lugar donde la bóveda apoya en el hastial, como "intradós" y "trasdós" a las caras externa e interna respectivamente de los hastiales.

En el caso de los túneles ferroviarios, además de la plataforma de vía y las instalaciones necesarias (catenaria o sistema de toma de corriente, drenaje, paseos, etc.), hay que tener en cuenta las dimensiones de la entrevía y sobre todo del gálibo ferroviario, que se corresponde a la zona libre de todo obstáculo para permitir el paso de tipo de tren que circulara por dicho trazado.

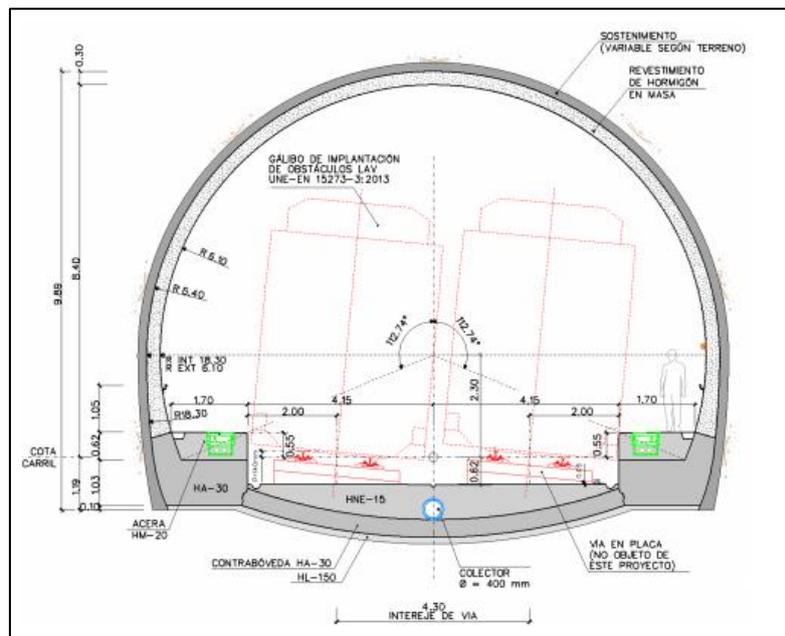


Fig.43. Ejemplo sección tipo túnel ferroviario. Fuente: fomento.gob.es.

En los trazados de alta velocidad, el gálibo ferroviario se optimiza equilibrando la sección útil del túnel con los efectos aerodinámicos y de rozamiento. El efecto aerodinámico se debe a un incremento de presión en el interior del túnel, y el efecto de rozamiento tren-aire-túnel se debe a un aumento de fricción que provoca una resistencia al avance y consecuentemente una pérdida de velocidad del tren en el interior del túnel.

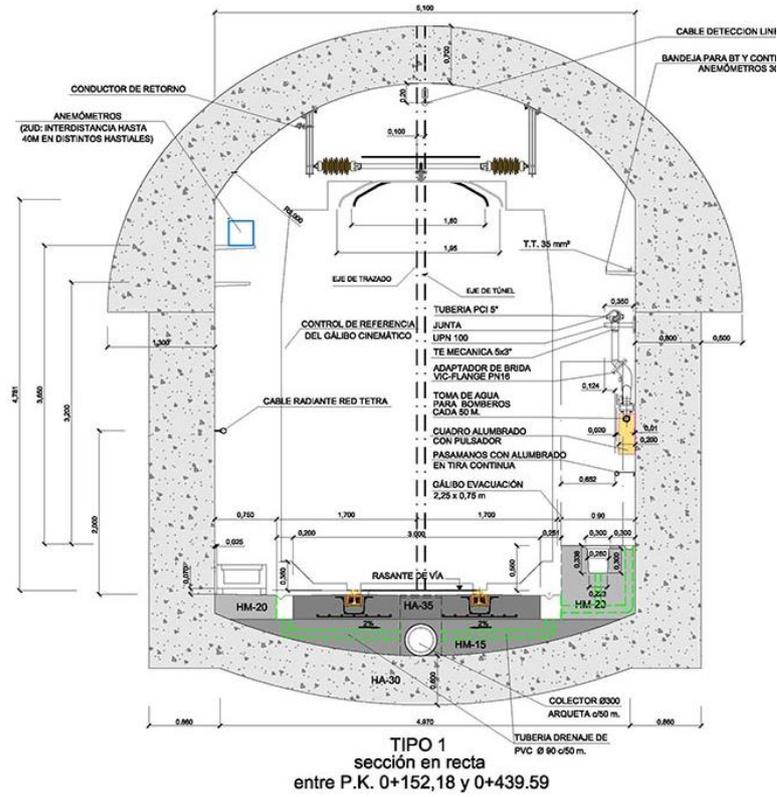


Fig.44. Ejemplo sección tipo túnel ferroviario alta velocidad. Fuente: adif.es.



*CAPITULO 5:
METODOS TRADICIONALES DE
CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES.*

5. MÉTODOS TRADICIONALES DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES.

Como hemos visto, la evolución histórica de los túneles nace de la incesante evolución e innovación continua de los métodos o técnicas de construcción.

Desde la antigüedad donde se perforaba con las propias manos a base de fuerza bruta, se han ido incorporando y perfeccionando herramientas, martillos, picos, cinces, etc., estas técnicas rudimentarias de perforación estaban ligadas, a la ausencia en las medidas de seguridad, como de sistemas de ventilación, además de las condiciones inhumanas a las que eran sometidos los trabajadores (esclavos) de la época, todo esto dio lugar a una necesaria evolución en los trabajos de perforación y construcción de túneles los cuales los clasificamos de la siguiente manera.

Existen dos grupos de métodos de construcción de túneles:

- Ejecución a cielo abierto "Cut and Cover".
- Ejecución subterránea o en mina.

5.1. MÉTODO "CUT AND COVER", EJECUCIÓN A CIELO ABIERTO.

El método "Cut and Cover", consiste en cortar el terreno desde su superficie, construir el túnel y después tapan el terreno excavado y devolverlo a su estado original, además de utilizar las técnicas de los trabajos a cielo abierto. Este método tiene como condicionantes los túneles que no superen los 20 metros de profundidad, correspondientes a 3 o 4 diámetros de profundidad, es la solución más económica y con menos riesgo, siendo frecuente su empleo en zonas urbanas. En este método se emplean una serie de pantallas de contención llevando esto a dividir este método en dos, dependiendo de si las pantallas van a formar parte de la estructura final del túnel o no.



Fig.45. Ejemplo método "Cut and Cover" (falso túnel). Fuente: Wikipedia.org.

- Pantallas como parte de la estructura del túnel; las fases constructivas de este tipo de túnel son las siguientes:
 - Desvío de todos los servicios que se encuentran sobre la traza del túnel o sobre la sección en la que se va a trabajar.
 - Preparación de la plataforma horizontal para poder ejecutar los muros pantalla desde la superficie.
 - Ejecución de los muros pantallas perimetrales y las vigas de atado.
 - Excavación hasta el nivel de la bóveda.
 - Construcción de la bóveda apoyada en el terreno y contra los muros de pantalla.
 - Relleno completo por encima de la bóveda.
 - Excavación por debajo de la bóveda hasta la losa de fondo.
 - Se ejecuta la contrabóveda o losa de fondo.
 - Se repone la superficie y se realizan los acabados finales.

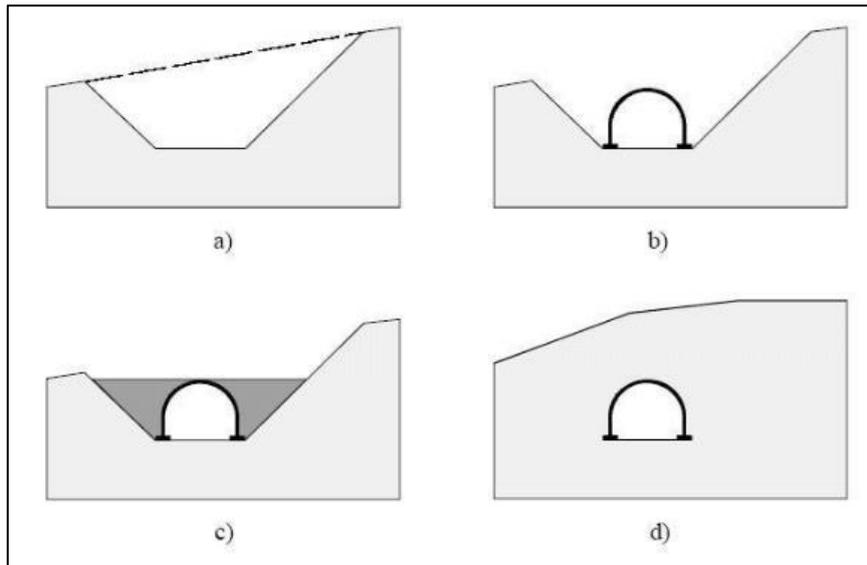


Fig.46. Esquema método "Cut and Cover" (falso túnel). Fuente: structuralia.com.

- Pantallas como elementos auxiliares; las fases constructivas en este caso son las siguientes:
 - Desvío de todos los servicios que se encuentran sobre la traza del túnel o sobre la sección en la que se va a trabajar.
 - Preparación de la plataforma horizontal para poder ejecutar los muros pantalla desde la superficie.
 - Ejecución de los muros pantallas perimetrales y las vigas de atado.
 - Excavación hasta el nivel de la bóveda.
 - Construcción de la sección completa del túnel.
 - Construcción de la bóveda apoyada en el terreno y contra los muros de pantalla.
 - Relleno completo por encima de la bóveda.
 - Excavación por debajo de la bóveda hasta la losa de fondo.
 - Se ejecuta la contrabóveda o losa de fondo.
 - Se repone la superficie y se realizan los acabados finales.

5.2 EJECUCIÓN SUBTERRÁNEA O EN MINA.

5.2.1 Método Inglés.

Se denomina método inglés, ya que se ha utilizado en terrenos, que se encuentran en Inglaterra, como son las arcillas y las areniscas, este sigue el ejemplo del empleado en la construcción del primer túnel bajo el Támesis. El método inglés consiste en excavar primero el avance mediante una galería central, después se ensancha horizontalmente y por último se excava la parte inferior en tongadas horizontales.

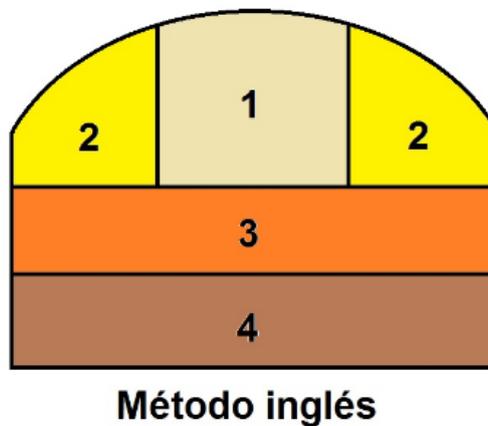
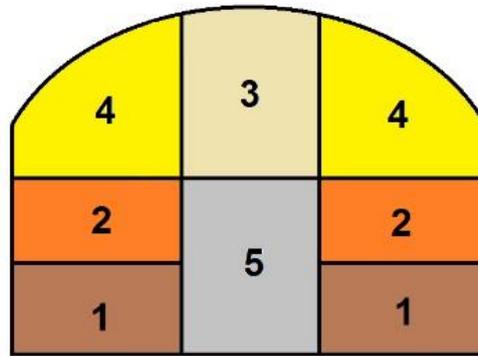


Fig.47. Esquema método inglés. Fuente: victoryepes.blogs.upv.es.

5.2.2 Método alemán.

El método alemán se empleó por primera vez en 1803 para la construcción del túnel en el canal de San Quintín, y desarrollado por Wiebeking en 1814, siguiendo el sistema de núcleo central, también fue empleado en la construcción de grandes bodegas de cerveza en Baviera. Se utiliza para túneles de grandes luces, o cuando el terreno es inestable y no se puede descalzar parte de la bóveda para ejecutar hastiales. Este método consiste en realizar la excavación, primero de los hastiales mediante dos galerías paralelas, después se excava una galería superior, más tarde se hormigona las galerías de los hastiales, desde los hastiales se excava la bóveda mediante el sistema de "costillas", el cual consiste en la unión de manera alterna de la galería clave con los hastiales

mediante pequeños túneles, se hormigona cada una de las “ semi-costillas” desde la galería clave para más tarde hormigonar está por tramos. De esta forma queda construida la bóveda y los hastiales, y se puede proceder a la excavación del núcleo central.



Método Alemán

Fig.48. Esquema método alemán. Fuente: victoryepes.blogs.upv.es.

5.2.3 Método austríaco.

El método austríaco está basado en la utilización de puntales de madera formando un sistema de entibación, fue aplicado por primera vez por Meisner en la construcción del túnel de Obera u en 1837.

5.2.4 Nuevo método austríaco de túneles (NATM).

Este nuevo método consiste en excavar a grandes secciones del túnel, permitiendo que el terreno forme un anillo de descarga y se deforme hasta alcanzar un punto de equilibrio, lo que lleva a que se auto-sustente, después se coloca un revestimiento para proteger la superficie excavada y controlar la deformación que se produce. Este consiste en comenzar por excavar el frente de avance, cuya sección será la excavación de la bóveda, más un metro de altura delos hastiales, con una longitud de avance de entre 1 y 2 metros, esta operación se realiza utilizando equipos mecánicos como rozadoras, excavadoras, etc. A continuación, se coloca un sostenimiento, normalmente cerchas de acero separadas entre 0,5 y 1 metros, previamente curvadas con la sección de la bóveda y que se

unen con tresillones metálicos, posteriormente se hormigona la bóveda con un desfase entre sostenimiento y revestimiento de unos 18 metros. El nuevo método requiere de una detallada auscultación de las tensiones y deformaciones del terreno, este comenzó a utilizarse en los túneles de los Alpes en 1962, y poco a poco se fue aplicando a terrenos blandos, lo que ha provocado gran cantidad de hundimientos.

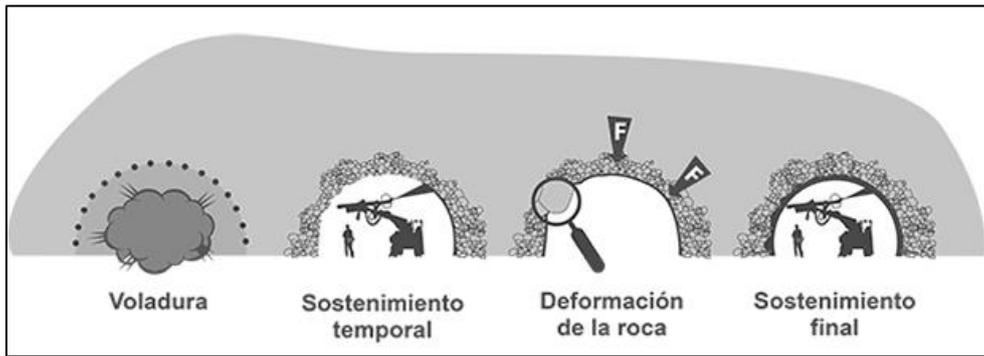


Fig.49. Esquema nuevo método austriaco. Fuente: bestsupportunderground.com.

5.2.5 Método italiano.

El método italiano se aplicó por primera vez en la construcción del túnel de Cristina, además se aplicó en la construcción del primer túnel de San Gotardo 1882.

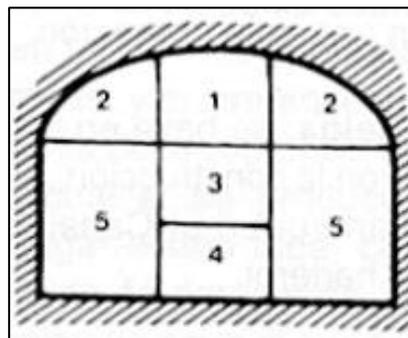


Fig.50. Esquema método italiano. Fuente: ceres.udc.es.

5.2.6 Método belga.

El método belga consiste en la excavación de una galería de avance, según el eje del túnel que tiene apenas un metro de anchura, en la clave de la sección, una vez se termina esta galería se ensancha hasta que la sección superior está completa, luego se ejecuta la bóveda que impide la deformación del terreno, la excavación de avance se realiza mediante martillos neumáticos. La destroza consiste en excavar un cubo central dejando un resguardo de 1 a 1,5 metros en los hastiales de manera que estos puedan hacer frente al empuje del terreno, luego se ejecutan los hastiales y para acabar se excava la sección de fondo ejecutándose la contrabóveda, este método es muy versátil, basados en los principios de la construcción del túnel en el canal que enlaza Bruselas y Charleroi, este se ha empleado para la construcción de más de la mitad de la red metropolitana de Madrid.

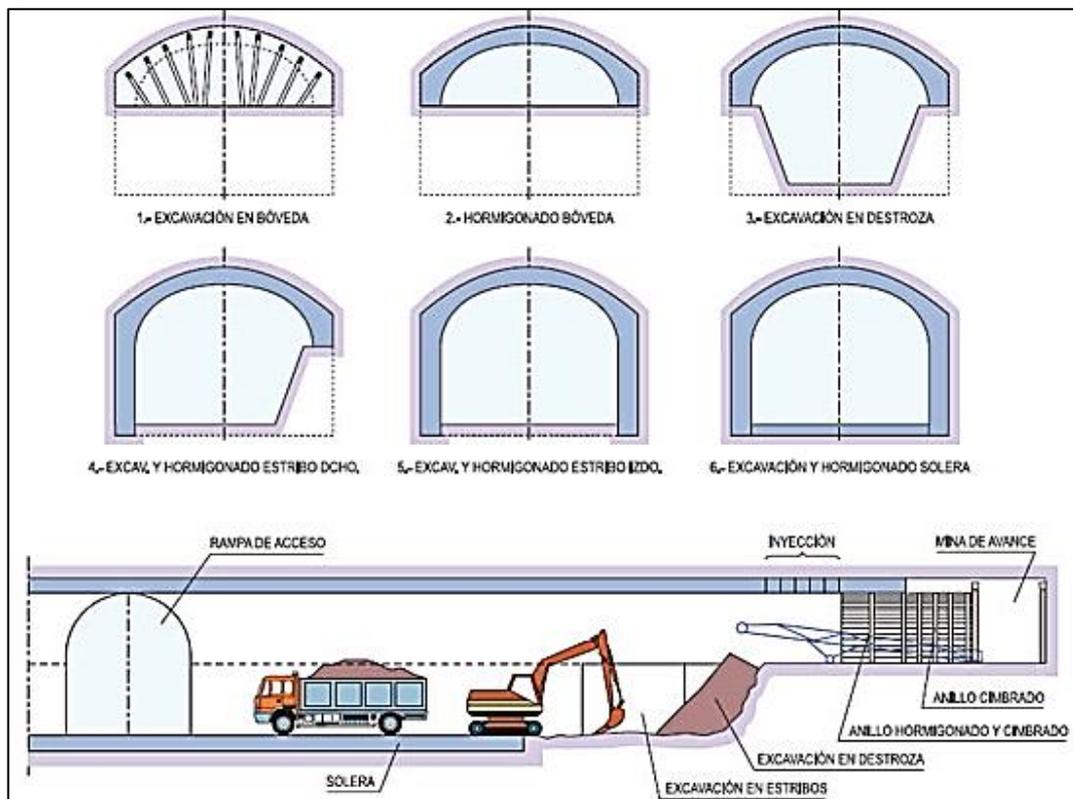


Fig.51. Esquema método belga. Fuente: victoryepes.blogs.upv.es.

5.2.7 Método clásico de Madrid.

Este método se ha empleado en un gran número de túneles en el metro de Madrid, consiste en abrir una galería de avance que se va ensanchando hasta permitir hormigonar toda la bóveda, la galería de avance tiene doble función, por un lado, la de reducir la probabilidad de hundimiento y por otro la de realizar un reconocimiento previo del terreno. Este método tiene una serie de pasos a seguir, que son los siguientes:

1. Excavación de la galería de avance en el eje y clave del túnel de apenas un metro de anchura, mediante martillos neumáticos, realizando una entibación continua a medida que se avanza.
2. Excavación vertical de la galería de avance, sustituyendo los puntales enanos que se han colocado en primer lugar por puntales o pies derechos de 2,5 metros de altura.
3. Ensanche lateral a ambos lados de la galería de avance en pases numerándose, según se alejan de la misma, hasta lograr excavar la sección completa.
4. Se realiza la excavación lateral hasta completar toda la sección de la bóveda.
5. Encofrado y hormigonado de la bóveda.
6. Se excava la destroza o caja central dejando un espacio sin excavar en los hastiales, de esta forma la bóveda queda a poyada en el terreno.
7. Excavación de los hastiales por bataches (excavar de forma alterna) contrapesados.
8. Hormigonado de los hastiales.
9. Excavación de la contrabóveda.
10. Hormigonado de la contrabóveda.
11. Se realiza los acabados del túnel.

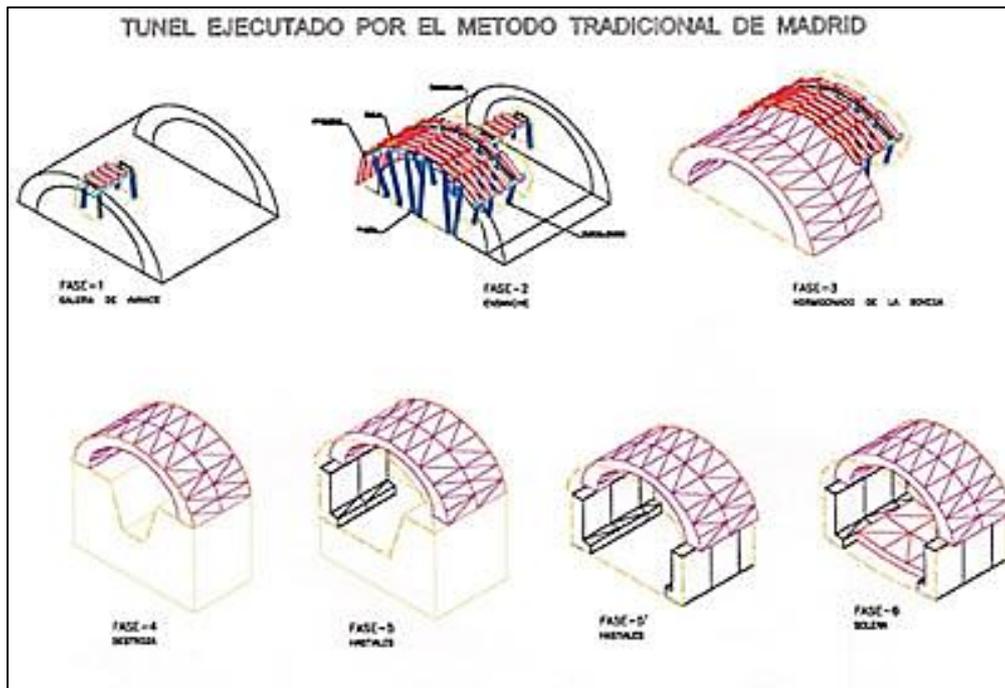


Fig.52. Esquema método clásico de Madrid. Fuente: vialibre-ffe.com.

5.3 MÉTODO DE PRECORTE DEL TERRENO.

El método de precorte mecánico del terreno permite realizar la excavación del túnel a sección completa, dividiéndose sus fases en cuatro:

- La primera fase, se trata de un serrado del terreno, mediante una incisión perimetral de 18 a 25 centímetros de espesor y unos 3,5 metros de longitud, y se rellena con hormigón proyectado de alta resistencia, queda realizado un anillo que proporciona seguridad mientras se excava el núcleo de tierras.
- La segunda fase, es la de excavación del núcleo, se comienza por excavar las tierras del interior, dejando un manchón central de tierras para estabilizar el frente, a veces se refuerza cerchas metálicas, una vez terminada la primera excavación se ejecuta un anillo concéntrico al anterior solapándose con este cada 0,5 a 1 metro, y con la misma longitud.
- La tercera fase, es la de ejecución de los hastiales y contrabóveda, donde se construyen los muros laterales donde se empotran las

bases de los anillos de la prebóveda, se excava y hormigona la contrabóveda.

- Por último, está la cuarta fase, que es la que se hormigona el revestimiento definitivo del túnel por tramos de una longitud fija.

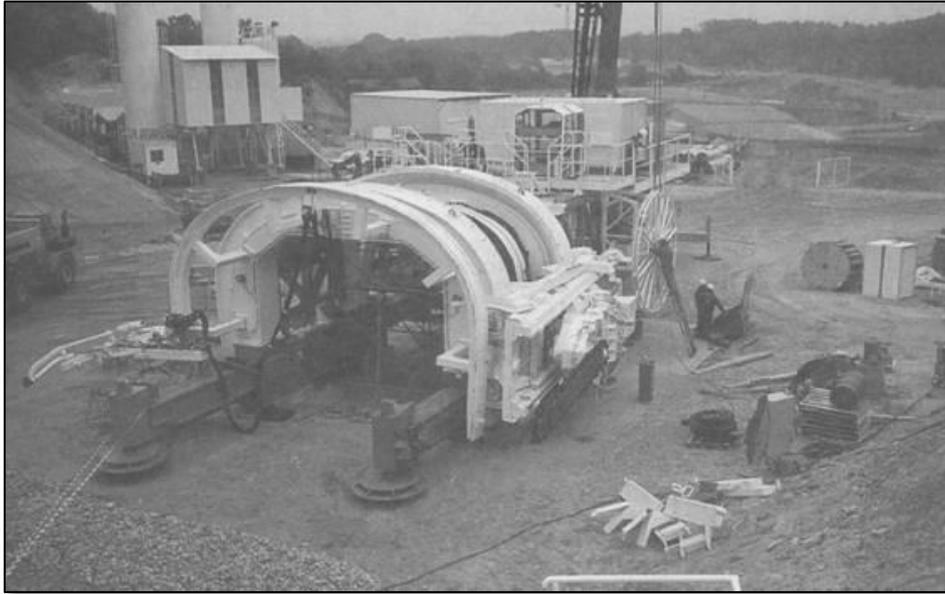


Fig.53. Máquina de precorte mecánico. Fuente: victoryepes.blogs.upv.es.



*CAPITULO 6:
GEOMÁTICA APLICADA A LA
EJECUCIÓN DE TÚNELES.*

6. LA GEOMÁTICA APLICADA A LA EJECUCIÓN DE TÚNELES.

La Ingeniería en Geomática y Topografía aplicada a la construcción o ejecución de túneles tiene dos fases, la **primera fase** consiste en la generación de los planos topográficos de la zona donde se localiza la obra y que servirá como soporte topográfico para su diseño y desarrollo del proyecto de construcción. La **segunda fase** consiste en dirigir la excavación de túnel, es decir determinar cómo y por donde se debe excavar el túnel, mediante el replanteo del eje de la obra subterránea.

El objetivo del presente trabajo es dar a conocer la influencia del Ingeniero en Geomática y Topografía en la ejecución de túneles, por lo que no se profundizará en la fase de diseño solo se darán a conocer los aspectos más relevantes de esta fase.

La fase en la que nos centraremos será la **fase de construcción o ejecución**, que se centra en el guiado del túnel, es decir, dirigir por donde debe excavar el túnel a partir de la materialización sobre el terreno del trazado proyectado, como actividades secundarias pero no por ello menos importantes el Ingenierío en Geomática y Topografía, también se encarga en gran parte del control de deformaciones que sufre el terreno (interiormente y en superficie), tras la realización de una perforación subterránea mediante medidas de auscultación; del control geométrico (control de calidad) de la excavación, comprobando que se ejecuta según la sección proyectada; y de las mediciones y cubicaciones (control de cantidad) que surgen de la excavación y revestimiento de la obra subterránea.

6.1 FASE DE DISEÑO DEL TÚNEL.

En un primer momento, tras la necesidad de construir un túnel, se precisa disponer de una representación real del terreno con la minuciosidad y detalle que esta requiere. Para la **fase de diseño** de un túnel tanto en su trazado en planta como en alzado, se requiere como base de partida un soporte cartográfico, que generalmente es un mapa o plano topográfico que permite el estudio y la determinación del trazado

del túnel. Los planos utilizados o el apoyo cartográfico utilizado por el Ingeniero en Geomática y Topografía para el diseño del túnel como para la fase de ejecución son los siguientes:

- **Plano Topográfico base:** Este plano permite estudiar y determinar las características del túnel.
- **Planta general sobre el topográfico base:** Este plano contempla la planta del túnel, diseño de rectas, curvas, clotoides, para el diseño de este plano hay que tener en cuenta toda la normativa vigente, además de las características del terreno y factores específicos de obras subterráneas.
- **Perfil longitudinal:** En este se representa la rasante a proyectar, la rasante definida dependerá de los parámetros para obras subterráneas, es decir, la velocidad de ferrocarril, la pendiente máxima, condiciones de drenaje, etc.
- **Plano de secciones:** Este representa las secciones del túnel y dependerán del estudio geológico del terreno, del aspecto constructivo y de las características del túnel a ejecutar.
- **Plano relativos de servicio:** Son variables según la obra y el emplazamiento de la misma, y dependerá de las necesidades del proyecto.

En la actualidad el soporte cartográfico se basa en soportes digitales que con el avance de la tecnología facilitan el diseño de la obra a proyectar, para el diseño en planta como en alzado se utilizan programas como "CLIP", "ISTRAM", "AUTOCAD 3D", estos programas se fundamentan en modelos matemáticos que contemplan una superficie continua definida funcionalmente, y que se aproxima de la mejor forma posible a la superficie del terreno que se pretende representar, denominados de forma genérica como **modelos digitales del terreno (MDT)**.

MDT es la denominación genérica, se hace referencia a **MDE** (modelo digital de elevaciones), que representan de forma más concreta la topografía o altitud del terreno, ofreciendo una modelización (información gráfica y tridimensional) de la superficie terrestre, sobre esta cartografía digital el ingeniero proyectista podrá definir el trazado en planta y la

rasante del túnel, a partir del cual, realizará un estudio de las características geológicas de la zona sobre la que se ha proyectado, esta cartografía tiene que representar toda la zona de afección del proyecto de construcción, donde se emplazan las obras subterráneas; y además, con un alto grado de detalle, la topografía de las zonas de acceso, bocas, puntos de ataque de las rampas y los posibles pozos del túnel.

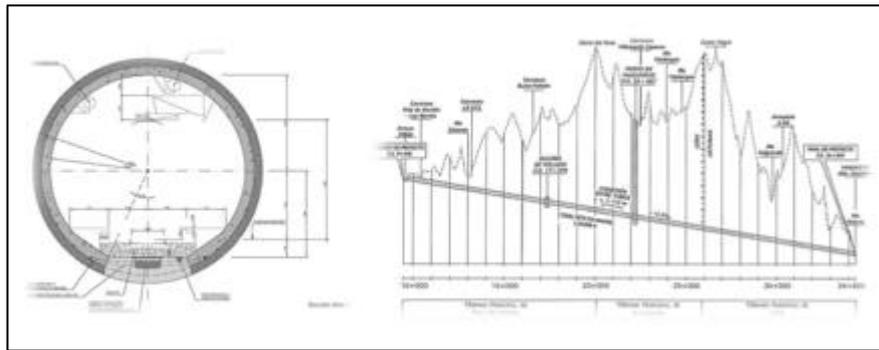


Fig.54. Ejemplo plano sección tipo y perfil longitudinal (túnel de Pajares). Fuente: autodesk.com.

6.2 FASE DE EJECUCIÓN O CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL.

Una vez diseñado el trazado de la obra subterránea, el primer paso será realizar el estudio geotécnico, para esto se realiza la "**poligonal geológica del eje del túnel**", o lo que es lo mismo el replanteo del eje en planta del túnel por el exterior, o "paso de línea por montera". Se trata de un itinerario topográfico exterior (**paso de línea o perfil longitudinal**), con el fin de realizar los sondeos o estudios geofísicos, para obtener las características geotécnicas del macizo y su comportamiento geodinámico antes de proceder a su perforación, de esta forma se establecen las columnas litológicas de la zona y se configura su estratigrafía.

En la **fase de construcción** del proyecto se materializa la definición geométrica de la obra subterránea mediante distintos métodos de replanteo. La ejecución de proyectos de túneles es lenta puesto que la excavación de un túnel se realiza en una zona muy concreta, sobre la sección del frente de ataque de dicha excavación, por esto para conseguir mayor velocidad de excavación se duplican estos frentes de excavación y se ataca el túnel por sus dos bocas. En algunas ocasiones con el propósito de conseguir mayor velocidad en la excavación se aumenta el número de frentes de ataques, a partir de pozos o rampas auxiliares intermedias, que permiten acceder desde la superficie a la rasante proyectada del túnel.



Fig.55. Frente de ataque de un túnel. Fuente: construccionminera.cl.

El duplicar los frentes de excavación implica que sus frentes se han de encontrar en un determinado punto o perfil del túnel, lo que se conoce como **cale del túnel**. Este proceso requiere de un alto grado de responsabilidad en el guiado del túnel mediante el replanteo por sus distintos frentes de ataque, para que estos se encuentren y además lo hagan con una buena precisión.

El trazado de un eje subterráneo responde desde el punto de vista topográfico a los mismos criterios y planteamientos que a un trazado en superficie, pero existen ciertos condicionamientos impuestos por el medio en el que se desarrolla su ejecución, un túnel ofrece espacios de trabajo reducidos, escasa iluminación, atmósfera pulvínica, etc.

Los trabajos topográficos en una obra subterránea se llevan a cabo a lo largo de todo el tubo excavado, por lo que es necesario el establecimiento continuo de bases topográficas de replanteo para llevar los datos de guiado al frente de excavación, y su constante renovación, debido a los deterioros, barridos por explosión, tráfico de maquinaria, etc., contingencias que obligan a realizar replanteos y comprobaciones constantes por seguridad de cálculo, que van incrementando su longitud a medida que se perfora el túnel recurriendo periódicamente a las triangulaciones exteriores de la embocadura del túnel.

El estacionamiento de la instrumentación topográfica y las referencias se realiza en sistemas de centrado forzado próximo a los hastiales y en lugares protegidos, dada la alta exigencia que requieren los replanteos, así como el posicionamiento con gran precisión de las unidades de auscultación, tanto interiores como exteriores, para que las informaciones de medición obtenidas sean correctas y fiables, todo esto condicionan los procedimientos topográficos si bien el cálculo y el método son similares, operativamente se pueden dar situaciones específicas.

6.3 INSTRUMENTACIÓN TOPOGRÁFICA EN LA EJECUCIÓN DE TÚNELES

Antiguamente la instrumentación utilizada en galerías subterráneas, fueron el goniómetro y el teodolito, estos se utilizaron en trabajos de topografía de minas, pero en la actualidad estos se han modernizado, es decir los trabajos de observación y replanteo se realizan con modernas estaciones totales, estas estaciones pueden ser estaciones totales normales o estaciones totales de alta precisión, además de niveles de precisión.

Pero los trabajos de observación y replanteo no son fáciles de llevar a cabo debido a que las tareas de estacionamiento dentro de obras subterráneas es difícil debido a la estrechez de las galerías o la imposibilidad de estacionar cerca del eje del túnel, ya sea por el paso de trenes o vagones, o por el paso o movimiento de maquinaria de extracción de escombros, o por la imposibilidad de hacerlo entre los elementos de una tuneladora, todos estos factores hacen que nos veamos obligados a señalar o estacionar de forma atípica, por ejemplo en las viguetas adosadas a los hastiales, en otras ocasiones se estaciona la instrumentación topográfica en barras elevadas con placas de centrado o colgando de la bóveda de un anclaje o suspendido de una brazo articulado, con esto protegemos la instrumentación del paso de maquinaria dentro del túnel y de posibles derrumbes o de caída de elementos dentro del túnel.

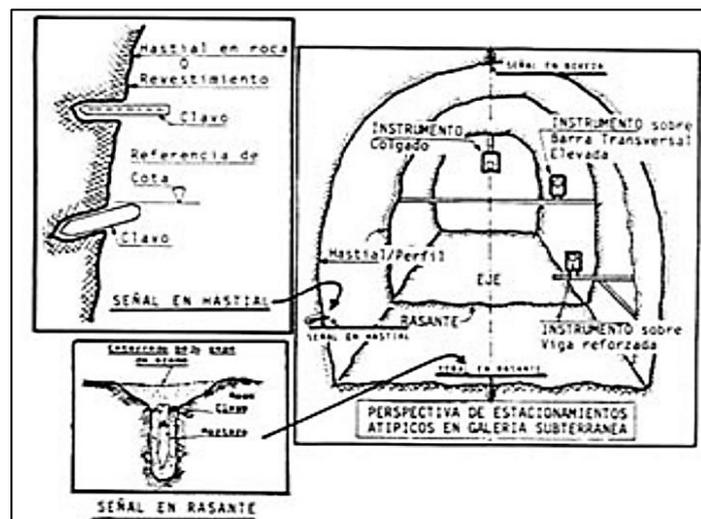


Fig.56. Esquema de estacionamiento dentro del túnel. Fuente: citop.es.

El estacionamiento antes mencionado, sobre hastiales se hace por comodidad, en el estacionamiento y referencias, se trata de plataformas o consolas fijas que se construyen para la ocasión, y están formadas por una escuadra que se fija al hastial y sobre la que se coloca una base o consolas con una rosca (5/8") sobre la que se enrosca cualquier base nivelante del instrumento topográfico, permitiendo el centrado forzoso, además existen consolas transportables que permiten fijar la instrumentación topográfica al muro o pared rocosa del hastial del túnel por medio de un brazo articulado, pudiendo montarse y desmontarse sin perder el punto de estación o puntería gracias a su novedoso sistema de anclaje. Se trata de consolas murales ligeras y movibles formadas por un brazo de aluminio con una plataforma y un tornillo para sujetar el instrumento, ofreciendo estabilidad y sobre todo una alta precisión. La fijación de la consola al hastial del túnel se realiza mediante el acople de esta a un perno fijado en la pared, lo que permite utilizar la misma consola en varios acoples fijos en el hastial. La consola se refuerza mediante el uso de brazos de apoyo extensible, que aumentan la rigidez y estabilidad del sistema de estacionamiento.

La instrumentación que se utiliza en los trabajos topográficos en obras subterráneas son las antes mencionadas, estaciones totales y niveles de precisión, a continuación, vamos a detallar los trabajos realizados con cada una de ellas, además de sus características, precisiones y formas de estacionamiento dentro de un túnel.

6.3.1 Estación total.

La **estación total** es un instrumento electro-óptico, capaz de medir y proporcionar de forma numérica lecturas angulares (horizontales y verticales) y distancias, cuyo funcionamiento se basa en sistemas de medida electrónica. Hoy en día la gran mayoría disponen de sistemas operativos, software integrado y memoria interna lo que facilita el volcado de datos, con la posibilidad de realizar cualquier tipo de aplicación de medición y replanteo. Los más sofisticados son las estaciones

motorizadas o las estaciones robóticas, para llevar a cabo procesos de medición automáticos mediante sistemas de control remoto.

Las estaciones totales utilizadas en la construcción de túneles deben de garantizar gran precisión, en ángulos y distancias, además en trabajos de obras subterráneas es importante que la estación total ilumine la visual óptica que proporciona el anteojo en la dirección visada y mediante un haz visible o puntero laser, que marque puntos de forma visual para servir como sistema de guía, materializar alineaciones o facilitar el estacionamiento en puntos clave del túnel.

Un ejemplo de estación total es la estación de la marca **Leica**, donde los modelos TS15, TS50 O MS50 son los más apropiados en los trabajos, para la ejecución de obras subterráneas.

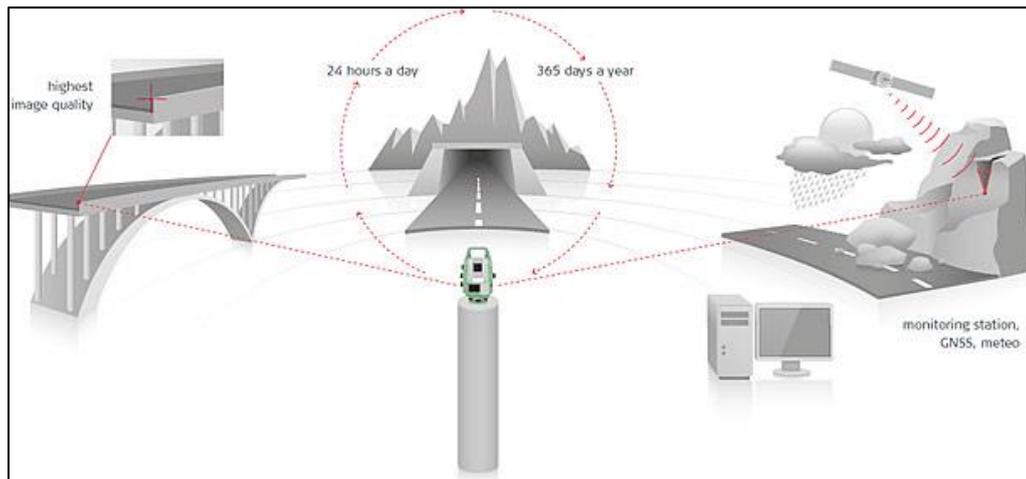


Fig.57. Estación total Leica TS50. Fuente: leica-geosystem.it.

Vamos a comentar las especificaciones técnicas y el uso de la estación Leica TS50 la cual consiste en una estación total de alta precisión, que nos ofrece una precisión angular de $0,5''$ ($0,15$ mgon), y de ($0,6$ mm+1ppm) en la medida de distancias y con un alcance de 3500 metros, en el caso de medición a prisma. En el caso de medición de distancias a cualquier superficie (sin prisma), la precisión es de (2 mm+2ppm) y un alcance de 1000 metros. Se trata de una estación total robótica, se trata de una estación total de alta velocidad y con una aceleración extraordinaria, el equipo incorpora las tecnologías de puntería automática

(Automatic Aiming, ATR) a distancias de 1000 metros en prismas circulares, o de 800 metros en prismas de 360°, la búsqueda de prismas (PowerSearch) hasta distancias de 300 metros, el sistema de luz de guiado (Guide Light, EGL) hasta 150 metros, y su control remoto (RCS). Esta estación total incorpora tecnología de imagen (fotografía y video) con imágenes de alta calidad y el software Leica Smartworx, que ofrece muchas aplicaciones (incluso algunas específicas para túneles). También es posible su conectividad con equipos GNSS.

En el mercado existen varios equipos de diferentes marcas capaces de dar buenas precisiones angulares y de distancia para la ejecución de túneles, elegiremos una u otra en función de las características de la obra a ejecutar, las marcas de mayor renombre son, la ya mencionada Leica, además de otras como, la marca **Trimble**, o la marca **Topcon**, todas estas marcas fabrican estaciones totales de alta precisión y específicas para obras subterráneas, la elección de una u otra queda a libre elección por parte del ejecutor de la obra subterránea.

En obras subterráneas es necesario la medición altimétrica con gran precisión, para esto se utilizan niveles de precisión, principalmente en la observación altimétrica de la red de apoyo en los trabajos de auscultación, el nivel es un instrumento que sirve para medir las diferencias de altura entre dos puntos basándose en la determinación de planos horizontales a través de un nivel esférico de burbuja, que sirve para fijar ese plano y un anteojo que tiene la función de optimizar la visual de un observador hacia una regla vertical graduada que proporciona su lectura, y así calcular el desnivel utilizando el método de nivelación geométrica, a continuación vamos a ver dos niveles utilizados en obras subterráneas, uno es el nivel de precisión y el otro es el nivel digital.

6.3.2 Nivel de precisión.

El **nivel de precisión** tiene un mayor número de aumentos en el anteojo (entre 35x y 50x) que uno convencional, además está dotado de

micrómetro de placa plano-paralela y se complementa con el uso de miras invar.



Fig.58. Nivel de precisión. Fuente: georbital.es.

6.3.3 Nivel digital.

El **nivel digital** es un instrumento que incorpora componentes electrónicos que permite realizar lecturas sobre miras con código de barras para la medición de desniveles, con precisión en la desviación típica de 0,3 mm en 1 km), este nivel digital está dotado de programas de medición y de memoria interna para la grabación y registro automático de datos que mejora el rendimiento en la toma de datos.

Uno de los problemas en los trabajos subterráneos desde el punto de vista topográfico es el control direccional, y sobre todo en túneles de gran longitud, donde es necesario una determinación precisa del acimut de cualquier dirección, para ello se utiliza una giroestación (giroteodolito), que consiste en una estación total a la que se acopla un componente giroscópico, que permite la determinación de forma directa de la dirección del norte geográfico. El eje del instrumento se orienta hacia la dirección del meridiano, su fundamento consiste en un objeto girando a elevada velocidad que, debido a su inercia, tiende a mantener fijo su eje de rotación, esta propiedad recibe el nombre de rigidez giroscópica salvo que sea sometida a una fuerza externa, como la rotación de la tierra, momento en el cual se manifiesta otra propiedad de los giróscopos: la precesión. Una importante limitación del giroteodolito es que, conforma aumenta la latitud del punto de observación, el momento de búsqueda de

la meridiana disminuye hasta hacerlo inservible por encima de latitudes superiores a los 75°.



Fig.59. Nivel digital. Fuente: leica-geosystem.it.

6.3.4 Plomada óptica.

Otro de los instrumentos topográficos precisos es la **plomada óptica** automática de precisión, esta permite obtener visuales o líneas de referencia verticales, y que se utiliza para proyectar puntos por pozos, su funcionamiento consiste en un anteojo que proporciona una visual (cenital o nadiral) que coincide con el eje principal del instrumento, y que será perfectamente vertical cuando el aparato este nivelado. Para mejorar varias de las aplicaciones de estos instrumentos existen una serie de accesorios que conviene tener en cuenta, como los oculares intercambiables, oculares laser, oculares acodados, prismas pentagonales o pentaprismas (que permiten obtener visuales perpendiculares o desviadas en ángulo recto), miras especiales, etc.



Fig.60. Plomada óptica con giroscopio. Fuente: georbital.es.

Estos serían los trabajos topográficos en la ejecución de obras subterráneas en el interior de las mismas, ahora vamos a conocer los trabajos topográficos en el exterior de las obras subterráneas.

6.3.5 Receptores GNSS.

A la instrumentación antes mencionada hay que añadirle equipos topográficos utilizados en el exterior como los **receptores GNSS**, que ofrecen posicionamiento en tiempo real, esta tecnología permite realizar con alto grado de precisión replanteos exteriores y sobre todo asignar coordenadas homogéneas a las bases de replanteo de la red exterior que estarán localizadas en las zonas de acceso a los túneles (bocas, rampas o pozos).



Fig.61. Receptor GNSS. Fuente: geincorl.com.

6.3.6 Laser escáner.

También para trabajos de control de calidad y realización de mediciones y cubicaciones (control de cantidad) se utilizan los sistemas de barrido de medición tridimensional o **laser escáner**, que escanean la superficie interior de la obra subterránea obteniendo un elevado volumen de información de detalle de todos los aspectos geométricos del túnel

realmente ejecutado, el propósito del equipo de medida laser escáner es generar una nube de referencias numéricas de la superficie del túnel en una fase de ejecución cualquiera (excavación, sostenimiento o revestimiento).

Este laser escáner realiza el barrido de una superficie con un haz de láser en forma de abanico captando miles de puntos por segundo, el resultado de la medición son coordenadas tridimensionales (x, y, z) de una densa nube de puntos definidos a partir de cientos de miles o millones de mediciones individuales, que en si mismas componen un modelo numérico de los objetos registrados.



Fig.62. Láser escáner. Fuente: faro.com.

Aunque como conjunto de puntos sin procesado posterior es un modelo muy simplificado que opera sólo visualmente, pues se compone únicamente de entidades singulares tipo punto, la densidad de información la aproxima a la realidad absoluta, además esta visualización puede llegar a alcanzar gran realismo ya que estos puntos pueden reflejar el color de la superficie registrada, esto es posible ya que el láser escáner incorpora una cámara fotográfica de alta resolución, que permite relacionar cada punto medido con el color del pixel correspondiente al de la fotografía de referencia, o bien, empleando programas específicos que permiten este ajuste a partir de imágenes obtenidas con una cámara independiente.

Los procedimientos de medición están basados en el cálculo del tiempo transcurrido entre la emisión del haz laser y su posterior detección de vuelta por la superficie en la que ha incidido (time off light), para medir este tiempo de vuelo de impulsiones, se utilizan diferentes efectos físicos dando lugar a tres tecnologías diferenciadas: tecnología de pulso, diferencia de fase a partir de la modulación de amplitud continua de una onda (AMCW) y diferencia de fase a partir de la modulación de frecuencia de una onda (FMCW), como ejemplo de estas especificaciones la marca Leica ofrece equipos que utiliza la tecnología de tiempo de vuelo a partir de pulsos como el modelo Scanstation C10, que alcanza hasta 300 metros de distancia, escaneando hasta 50.000 puntos por segundo, además de esta al igual que en las estaciones totales existen otras marcas que proporcionas equipos con las mismas características y queda a libre elección del ejecutor de la obra de la elección de la instrumentación en función de los parámetros que mejor se ajusten a la obra a ejecutar.

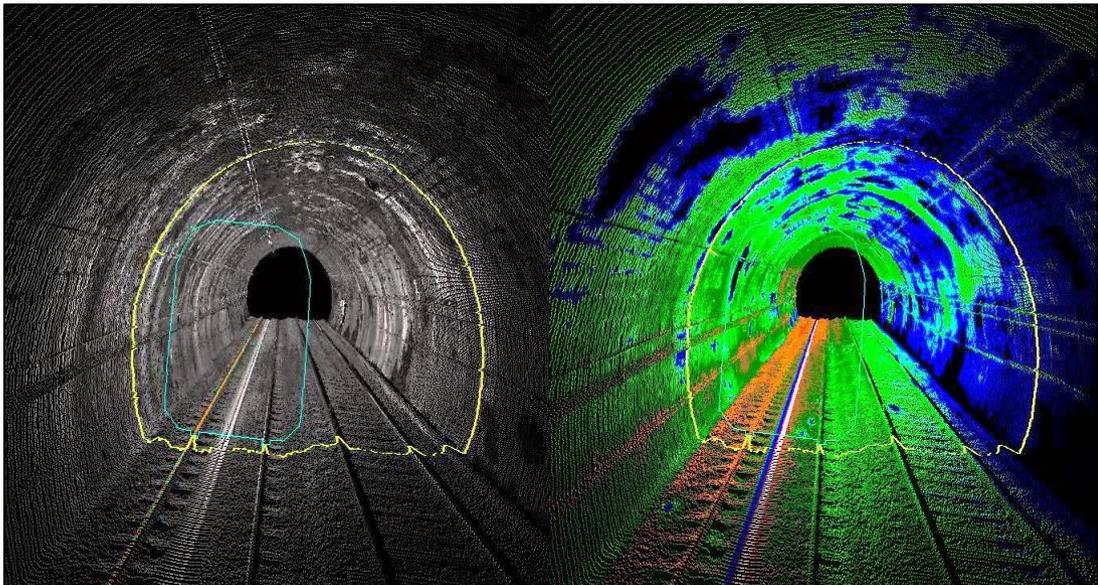


Fig.63. Resultado escaneado de un túnel (laser escáner). Fuente: detopografia.blogspot.com.

6.4 TRABAJOS TOPOGRÁFICOS EN EL INTERIOR Y EXTERIOR DEL TÚNEL.

El objetivo fundamental que se persigue es que el cale del túnel se realice de forma exitosa, es decir, que sus distintos frentes de ataque o avance se encuentren con la mayor exactitud posible y se encuentren de forma precisa, por esto necesitamos la determinación espacial por coordenadas de todo el proyecto de construcción pero sobre todo de las bocas de excavación y otros puntos de acceso(rampas o pozos), que como puntos de partida deben estar perfectamente enlazados, tanto planimétrica como altimétricamente.

Por esto, el enlace implica trabajar en un mismo sistema de coordenadas, por lo que la elección del sistema geodésico de referencia con el que se va a trabajar es una función fundamental, pudiendo tratarse de sistemas globales o locales, sistemas oficiales o no, pero siempre perfectamente definidos.

6.4.1 Red exterior.

Para esto necesitamos de una **red exterior**, el replanteo y consecuente inicio de las obras de excavación así como el establecimiento de puntos básicos para las labores topográficas de dirección y seguimiento quedas asegurados mediante la materialización, observación y cálculo de una **red de enlace entre bocas**, o lo que es lo mismo la determinación de una red exterior topográfica de precisión, red de apoyo única que requiere máxima precisión en las coordenadas tridimensionales de todos los vértices situados próximos a las bocas o accesos al túnel.

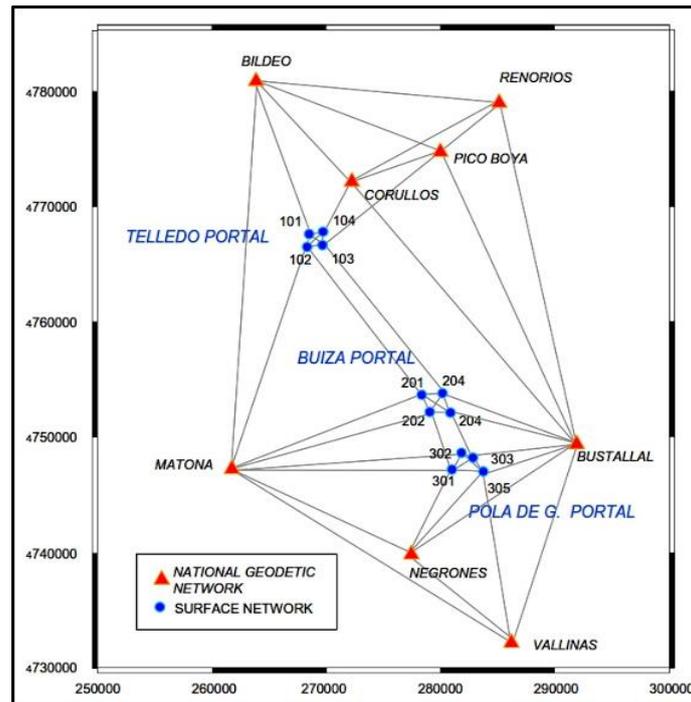


Fig.64. Red exterior bases de bocas y enlace con geodesia túneles ferroviarios de Pajares.

Fuente: autodidactaengeomatica.blogspot.com.es.

En el caso de obras subterráneas que se desarrollen en zonas extensas, esta red exterior lleva asociado una importante componente geodésica en cuanto a instrumentación, metodología de observación, cálculo y ajuste de las observaciones; así como el enlace de esta nueva red con las redes geodésicas previamente establecidas, habitualmente por un organismo oficial, en el caso de España es el IGN, el responsable de la infraestructura geodésica, está constituida por la Red de Primer Orden y la Red Geodésica Nacional Convencional o Red de Orden Inferior.

La observación de la red de enlace entre bocas de túneles se llevaba a cabo por técnicas clásicas a partir de triangulaciones, poligonales de precisión, y nivelación geométrica o por alturas, pero en la actualidad el desarrollo alcanzado por GNSS, permite disponer de información tridimensional muy precisa a largas distancias, lo que le hace ser un sistema homogéneo, eficaz y de precisión para la determinación de las coordenadas espaciales de esta red como base geodésica, cartográfica y de soporte del proyecto.

La base de esta red es obtener la máxima precisión de las coordenadas tridimensionales de todos los vértices de las bocas y accesos de los túneles para su aplicación en el replanteo, seguimiento y control de la obra, por lo que se pretende obtener una red de proyecto de alta precisión, observada con receptores GNSS, apoyada en sistemas de referencia adecuados para la planimetría y altimetría.

Esta red exterior debe tener una materialización adecuada, esto es tipo pilar con centrado forzado y anclado al terreno sobre una base de hormigón, se trata de minimizar el error de estacionamiento en el caso de observaciones GNSS, o el error de dirección, a través de reducir los errores de estacionamiento y de señal, en el caso de observaciones topográficas con estación total, el diseño de la red exterior debe tener la condición geométrica de una red clásica, puesto que a partir de sus vértices se van a realizar las observaciones topográficas con estaciones totales para transferir coordenadas al interior del túnel.

Otra función de la red exterior es servir de soporte a los trabajos geomáticos y topográficos para llevar a cabo el guiado del túnel según se ha proyectado, coordinado todos los datos en un sistema de referencia unificado y compatible con los sistemas de posicionamiento global, cabe destacar que las distancias entre los vértices de las redes exteriores, así como la del polo a la boca de entrada, debe estar entre los 750 y 2500 metros, para garantizar por un lado la solución GNSS y por otro, la orientación de la estación total, para minimizar errores, la red exterior, en túneles cuya excavación se realiza desde sus extremos debe estar formada por al menos tres vértices en cada una de las bocas de acceso, la figura ideal en cuanto a la geometría de la red exterior sería la de un triángulo equilátero, donde uno de sus vértices estaría en la prolongación del eje teórico del túnel.

La observación con receptores GNSS de la red exterior planimétrica, se debe llevar a cabo utilizando un Sistema Geodésico de Referencia (SGR), esta es la denominación actual a lo que se conoce como datum. Concretamente el sistema de referencia utilizado es el WGS84, en Europa se realiza la transición al sistema geodésico de referencia global ETRS89.

Es por ello, que en España para poder obtener coordenadas de la red exterior topográfica de alta precisión con observaciones GNSS, localizada en los distintos accesos del túnel, se deben utilizar los vértices REGENTE que circundan y cubren la zona de trabajo, para proporcionar el sistema de referencia y marco de verificación adecuados, realizando los ajustes pertinentes para mantener la geometría interna del túnel. Además, la altimetría de la red exterior, se debe realizar una nivelación geométrica de precisión entre las bocas del túnel, operación no siempre factible, por lo que se podrá optar por la utilización de los puntos de la Red de Nivelación de Alta Precisión más cercanas para dotar de altitudes ortométricas a dichos vértices con precisiones homogéneas.



Fig.65. Red REGENTE(España). Fuente: ign.es.

6.4.2 Red interior.

A partir de la red exterior, lo siguiente es diseñar una **red interior** o subterránea, este se basa en la obtención de los resultados exigidos para el cale con respecto al eje del túnel. Su diseño se debe ajustar al reducido espacio del hueco horadado, por lo que hay que realizar un itinerario o **poligonal**, cuya distancia entre los vértices consecutivos tiene que ser inferior a una longitud establecida, desde cada vértice se observará a los

dos anteriores y a los dos posteriores. La red interior se suele materializar en los hastiales, por tratarse de la zona que facilita el estacionamiento de instrumentación topográfica y de referencias, se suelen utilizar plataformas con centrado forzoso adosadas a las paredes o muros del túnel ya construidos, para minimizar errores instrumentales (fundamentalmente el error de dirección).



Fig.66. Replanteo Red Interior de un túnel. Fuente: revistaseguridadminera.com.

Hay que tener en cuenta que, en las observaciones topográficas de la red interior, los errores sistemáticos producidos por la refracción lateral u horizontal, es debido al diferente gradiente térmico en el interior del túnel.

En cuanto a la distribución de los vértices de la red interna se conocen tres métodos; el primer método es el **poligonal por el eje**, este determina una poligonal simple por el eje del túnel, lo que reduce el número de estaciones, es un método de observación rápido, mayor simplicidad de cálculo y escasa influencia de la refracción horizontal, el mayor inconveniente que tiene es el estacionamiento instrumental en el eje, debido a que es la zona de paso para la ejecución del túnel; el segundo método es el **poligonal en zigzag**, sistema con una disposición

simétrica de sus vértices, cuyas bases se sitúan enfrentadas, de manera que la observación se realice en zigzag, así se evitan observaciones paralelas a las paredes, y se reduce el error de refracción, la poligonal puede ser simple o doble; y el tercer método es la **triangulación**, es un método más fiable debido a una mayor coherencia en el cálculo, por lo que es más complejo, se trata de un sistema donde las bases están más próximas y que subdividen al túnel en cuadriláteros, cuya observación de polígonos se hace de forma independiente, realizando compensaciones entre polígonos mediante el lado común, el inconveniente que presenta el método se debe a la observación de las visuales paralelas y cercanas a los hastiales, que sufren la refracción horizontal, el error de un polígono se transmite a los posteriores, por lo que conviene realizar comprobaciones.

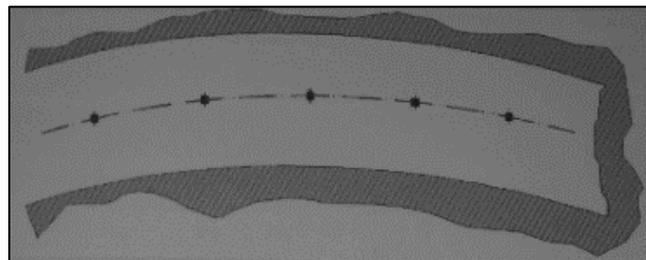


Fig.67. Poligonal por el eje (Red interior). Fuente: E. P. de los Santos.

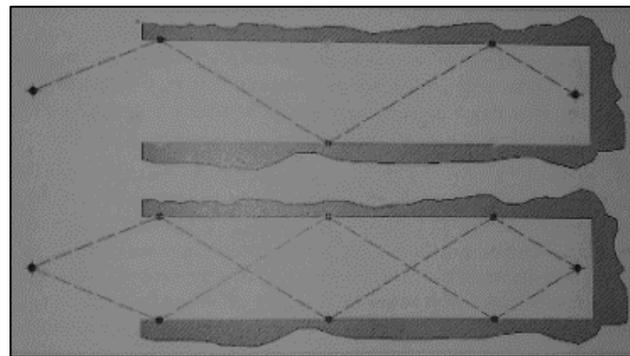


Fig.68. Poligonal en zig-zag (Red interior). Fuente: E. P. de los Santos.

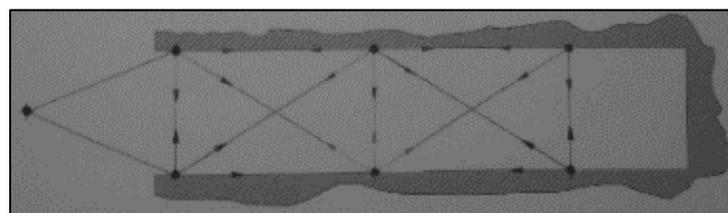


Fig.69. Triangulación (Red interior). Fuente: E. P. de los Santos

6.4.3 Fases del replanteo planimétrico.

A la hora de replantear un túnel, habrá que realizarlo en función de los métodos de excavación utilizados, además de realizar las tres fases de replanteo. En primer lugar, estará la realización del **replanteo de las bocas de entrada** del túnel que se utilizarán como bases de replanteo los vértices de la red exterior, utilizando el método por polares, método de intersección múltiple, o incluso con técnicas GNSS, fijando los puntos que definen las bocas de acceso del túnel, a partir de su definición geométrica, tanto en planta como en alzado. Cuando los puntos exteriores estén replanteados y señalizados, es conveniente incluirlos en la red de enlace, realizar su observación topográfica dentro del bloque de la red y compensar de nuevo sus coordenadas, contrastando de esta manera los errores producido, esto permite calcular el acimut existente entre las dos bocas replanteadas.

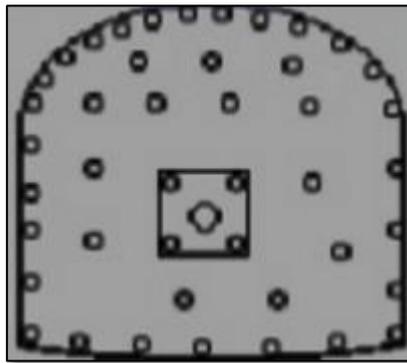


Fig.70. Replanteo boca de entrada del túnel. Fuente: universidaddelosandes.com

En cuanto a la altimetría se debe transmitir un valor de altitud a estos puntos desde la red exterior, mediante nivelación geométrica o por alturas, cerrando anillos y utilizando el método del punto medio con tramos cortos, a partir de estos puntos, se replantean y se referencian las alineaciones de entrada en excavación para la preparación de sus embocaduras, comenzando con el pre-anillo de seguridad o falso túnel, que es la prolongación del túnel hacia afuera así como de otros accesos a la excavación, rampas o pozos.

El trazado de un túnel se puede tratar como cualquier obra lineal, con sus vértices del estado de alineaciones, radios de curvas circulares, parámetros de curvas de transición, etc., a partir de los cuales se podrán calcular las coordenadas absolutas de cualquier punto singular o secuencial concreto de la obra, el replanteo de obras lineales no tiene mayor dificultad, pero cuando la planta se define mediante alineaciones curvas y de transición, y la rasante mediante acuerdos parabólico, habrá que recurrir al sistema adecuado para el **replanteo de los puntos básicos del eje**, este método recibe el nombre de polígono inscrito o método de cuerdas, forma una poligonal de cuerdas iguales del arco o curva y que permite operar con visuales ceñidas a la curva en su parte cóncava.

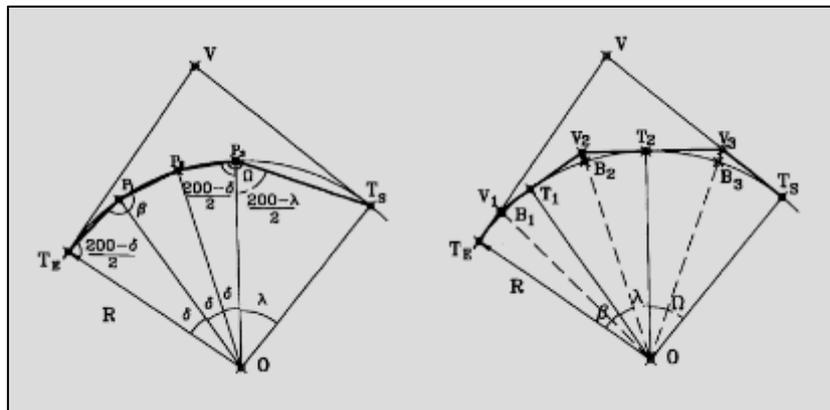


Fig.71. Método de replanteo por cuerdas o polígono inscrito. Fuente: I. M. de Villena.

Los criterios o pasos que seguir para la aplicación de este método son los siguientes:

- Proyectar el menor número de cuerdas o ejes de la poligonal de replanteo.
- Las cuerdas máximas que utilizar vendrán obligadas por las flechas máximas, siendo su valor menor o igual a la mitad de la luz o ancho del túnel.

Siguiendo estos criterios, se puede proyectar, encajar y calcular la poligonal óptima de replanteo, el eje del túnel se replantea por medio de

la poligonal de cuerdas inscrita, se trata de determinar a priori el número de cuerdas de la poligonal.

Es aconsejable realizar un doble replanteo con cuerdas más cortas para comprobar y facilitar las tareas de replanteo.

El método de comprobación se lleva a cabo realizando el replanteo por el método de las tangentes exteriores o polígono circunscrito, realizando una poligonal circunscrita al arco en su parte convexa.

Mediante este proceso se determinan y replantean los puntos básicos o polos que determinan las cuerdas, direcciones a partir de las cuales se puede efectuar el replanteo de cualquier otro punto concreto de la obra.

Para llevar a cabo el **replanteo de los puntos secuenciales del eje**, es preciso haber proyectado previamente una poligonal de cuerdas, determinada por vértices o polos, de tal forma que cualquier punto del eje pueda replantearse desde cualquiera de estos vértices, que serán las bases de replanteo de la red interna, los métodos de replanteo son:

- Replanteo por polares.
- Replanteo por abscisas y ordenadas sobre la tangente.
- Replanteo por abscisas y ordenadas sobre la cuerda.
- Replanteo por abscisas y ordenadas sobre la prolongación de la cuerda.

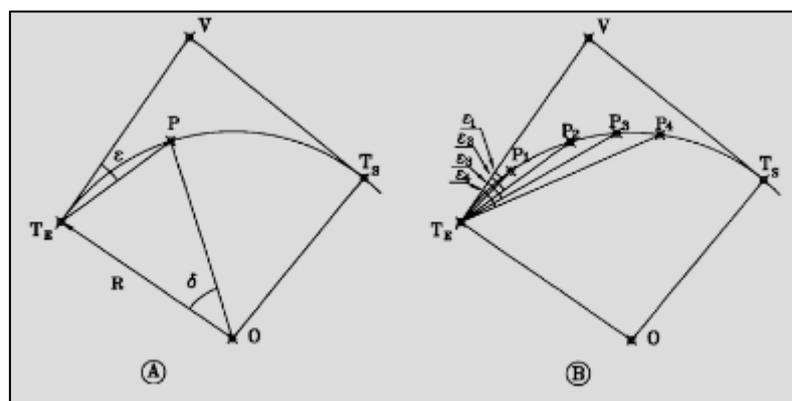


Fig.72. Método de replanteo por polares. Fuente: I. M. de Villena.

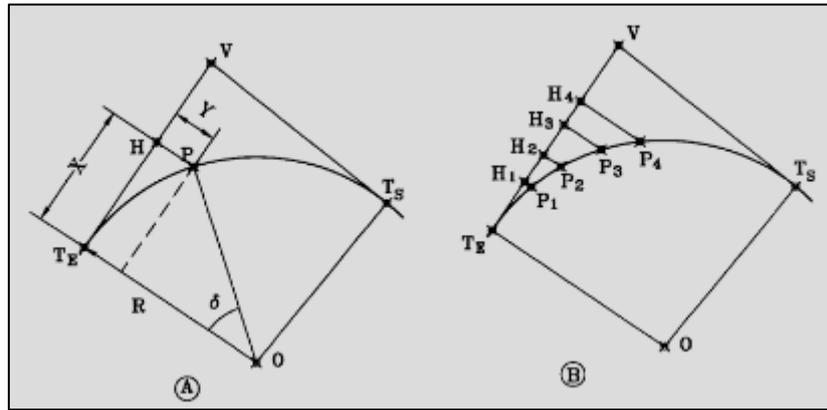


Fig.73. Método de replanteo por abscisas y ordenadas sobre la tangente.

Fuente: I. M. de Villena.

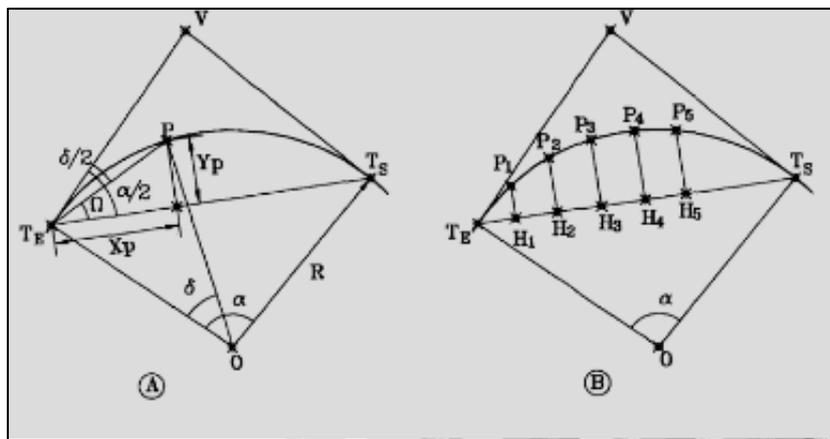


Fig.74. Método de replanteo por abscisas y ordenadas sobre la cuerda.

Fuente: I. M. de Villena.

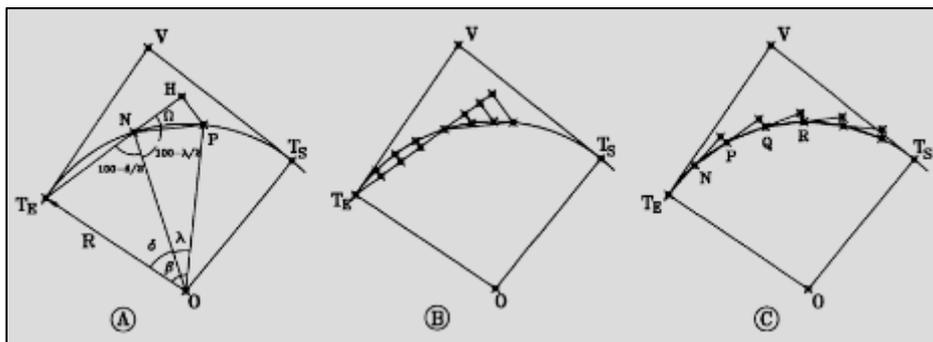


Fig.75. Método de abscisas y ordenadas sobre la prolongación de la cuerda.

Fuente: I. M. de Villena.

Cualquiera de estos métodos de replanteo, se pueden aplicar a los trabajos de replanteo en el interior de un túnel, aunque el método más utilizado es por coordenadas polares, esto es, la materialización de puntos a partir de ángulos y distancias.

El proyecto de replanteo planimétrico de un tramo de túnel en curva consiste en los siguientes pasos:

- Establecer la poligonal de cuerdas.
- Proyectar una segunda poligonal de cuerdas apoyada en la primera que verifique la bondad y exactitud del replanteo de la primera poligonal.
- Calcular las coordenadas de los puntos básicos, polos o vértices de la poligonal y replantear el primero de los vértices.
- Calcular y replantear los puntos concretos marcando el eje sobre los sucesivos frentes de excavación, mediante cualquiera de los métodos de replanteo antes mencionados, desde el primer vértice de la poligonal de cuerdas.
- Avanzar el replanteo a medida que lo hace la excavación hasta sobrepasar el segundo de los vértices de la cuerda, replanteando los puntos singulares siguientes por el método de abscisas y ordenadas sobre la prolongación de la primera cuerda.
- A continuación, se replanteará el segundo punto de la poligonal, referirlo y reseñarlo para seguir el replanteo a partir de este vértice.
- El replanteo, continua desde este segundo vértice marcando la dirección de la cuerda al siguiente polo y reiterando el proceso.
- A medida que la perforación lo permite se debe comprobar la tarea realizada a partir de los polos de la segunda poligonal, es conveniente calcularlas de forma conjunta con el fin de efectuar la comprobación de las mismas.
- El replanteo, continua desde este segundo vértice marcando la dirección de la cuerda al siguiente polo y reiterando el proceso.
- En cuanto la perforación lo permita se debe comprobar la tarea realizada a partir de los polos de la segunda poligonal, es conveniente relacionar ambas poligonales de cuerdas, la básica y la auxiliar, y calcularla de forma conjunta con el fin de efectuar la comprobación de las mismas.

6.4.4 Fases del replanteo altimétrico.

Para el **replanteo altimétrico** hay que realizar una nivelación geométrica por el método del punto medio con nivel y mira, para dotar de altitud a cada uno de los vértices de la poligonal de la red interior, es decir se trata de establecer una red de nivelación independiente, que se prolongara a medida que la excavación avance, se realizará una nivelación doble para así poder comprobar la bondad de las cotas o altitudes, el replanteo de los puntos se puede realizar con nivelación trigonométrica con estación total, puesto que las distancias serán cortas.

Cabe destacar que en cualquier trabajo topográfico es necesario referenciar aquellos puntos básicos, se materializaran con marcas o señales permanentes como clavos, piquetas, estacas, marcas de pintura, etc.

La referenciación en las bocas del túnel, una vez replanteado el punto de inicio de excavación, y conocida la dirección de la alineación de entrada bien sea en recta o en curva, se hace necesario materializarla con puntos auxiliares situados en ladera y zona de ataque y a medida que avanza el túnel se referencian los puntos singulares, sobre la bóveda y los hastiales, indicados en la sección transversal.

Conociendo todos los puntos de replanteo y todos los datos y referidos los puntos del eje en rasante de excavación, es posible realizar replanteos expeditos, con suficiente precisión.

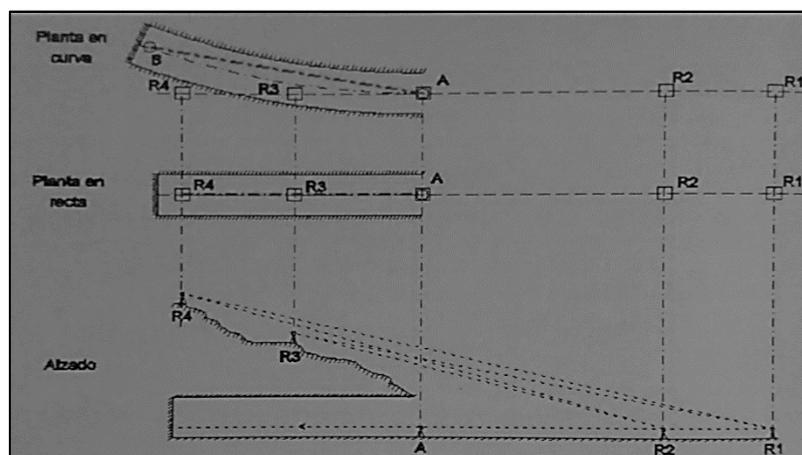


Fig.76. Referencias en bocas de túnel. Fuente: E. P. de los Santos.

6.5 GUIADO DE TUNELADORAS.

Una de las labores fundamentales de la Ingeniería Geomática y Topográfica en la ejecución de túneles, es el guiado de las mismas, por el eje de trazado del proyecto a partir de la determinación de su posición, ya que el conductor de la tuneladora debe disponer de información de la posición espacial de la maquina en relación con el eje teórico y la dirección u orientación a seguir.

Toda la información espacial se precisa de forma instantánea así permitimos al operario maniobrar de forma inmediata, ya que la tuneladora avanza a gran velocidad, por lo que debe ser de forma inmediata para poder conducir la excavación lo más próxima posible al eje diseñado.

El propósito de dar la información espacial de forma continua es el dotar de una buena posición espacial a la máquina, dotando de coordenadas absolutas a la cabeza de corte de la misma, a partir de la red topográfica interior que a su vez esta enlazada en la red exterior de alta precisión.

El guiado de la tuneladora está basado en el replanteo por láser, se instala una pantalla receptora sobre un plano vertical de la máquina, cuyo eje vertical coincide o es paralelo al eje del túnel, y sobre ella se determina un punto relacionado con el centro de la máquina, se puede dirigir un haz láser desde un punto emisor, que determine un eje desplazado, haciendo coincidir el punto de incidencia láser con el centro de la pantalla o diana.

Si el trazado del túnel es recto y con rasante continua, la alineación definida por la visual laser, será la línea en el espacio desplazado del eje y que permitirá dirigir la excavación haciendo coincidir el punto de incidencia del haz láser con el centro de referencia de la pantalla, haciendo que cualquier desvío de la maquina pueda detectarse y evaluarse midiendo los desplazamientos horizontal y vertical, existentes en la pantalla.

Si el trazado es curvo se pueden calcular y tabular, en función de la distancia al punto emisor del rayo, el piloto controlara la dirección de la maquina situándola en una posición tal que los desvíos leídos coincidan con los calculados para la distancia a la que se encuentre la pantalla del punto emisor, en este caso el control se hace en pequeños intervalos.

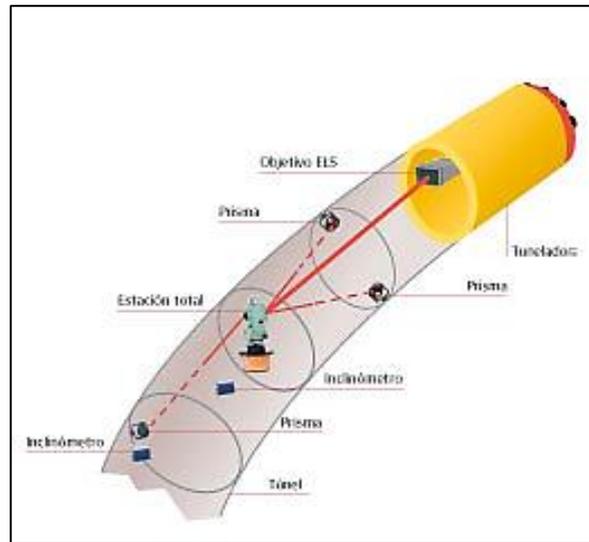


Fig.77. Sistema de guiado de tuneladora. Fuente: instop.es.

En caso del guiado manual, se materializa el eje del proyecto del túnel desplazado con un haz laser, los posibles desvíos debido a ejes curvos son previamente calculados en función de la distancia a la que se encuentra la diana de la base topográfica donde se coloque el emisor láser, por esto es importante determinar la distancia constantemente del punto emisor a la pantalla con sistemas de medición continua. La pantalla se diseñará con unos ejes coordenados que permitan medir directamente sobre la misma los desvíos, además se ha de controlar la verticalización de la pantalla, que solidaria a la maquina la va a dirigir, así el piloto de la tuneladora mediante los gatos hidráulicos y ayudados por plomadas hace coincidir el rayo en la posición prevista y la verticalidad del eje de pantalla con el de la máquina.

Es tarea necesaria revisar en intervalos frecuentes y determinados la marcha del replanteo con métodos topográficos convencionales, verificando el eje y la rasante y situar nuevas referencias para el rayo láser, así el piloto siempre tendrá la posición exacta.

6.6 CONTROL DE DEFORMACIONES

Un aspecto muy importante a tener en cuenta en obras subterráneas o túneles, es la perturbación que sufre el terreno, ya que su estado de equilibrio se ve perturbado por la generación de movimientos con motivo del avance de la excavación del túnel debido al efecto de descompresión interna, a este le sigue un efecto de dilatación y de modificación de las características mecánicas del terreno, al descomprimirse el terreno se producen horizontalmente tracciones en la clave y verticalmente un aumento de la compresión en los hastiales, aplastamiento entre la superficie y la clave del túnel, etc.

Todo esto tiene como consecuencia la inducción de un campo de deformaciones en el terreno, que tiende a cerrarse en torno a la excavación con desplazamientos que tienen un carácter radial hacia el centro del túnel, lo que conlleva movimientos de la superficie y de sus proximidades con componentes vertical(asientos) y horizontal a fin de restablecer el equilibrio de tensiones del suelo.

Lo más común es llevar a cabo un control de dichas deformaciones en tiempo real, que toman datos de forma sistemática contrastando continuamente los movimientos que se puedan estar produciendo, de esta forma se tienen en cuenta estas mediciones de acuerdo con el diseño del sostenimiento inicial y modificarlo si es preciso.

Otra de las deformaciones más importantes para tener en cuenta son las que originan la construcción de túneles a poca profundidad en áreas urbanas ya que estas provocan deformaciones sobre estructuras próximas, es decir las que forman parte del trazado urbano como, calles, carreteras, tuberías, edificaciones, etc. Estas deformaciones que se producen en superficie, originadas por alteraciones en el equilibrio interno del terreno y no por sobrecargas que estén aplicadas sobre ellas, constituyen el fenómeno conocido por **subsistencia**, este fenómeno tiene gran repercusión en túneles de áreas urbanas, ya que se producen movimientos que no son uniformes y que afectan a estructuras urbanas o en edificios próximos, si sus magnitudes son suficientes para que sobre las cimentaciones se originen deformaciones peligrosas.

Dicho esto, la obra de un túnel requiere de un conocimiento previo de las características geotécnicas del terreno, para prever el comportamiento geodinámico del hueco en el momento de su ejecución como en las siguientes fases de construcción, por esto se realiza una estimación teórica de movimientos previa a partir de la geometría de la obra, en función de la profundidad del túnel y del recubrimiento del terreno resistente, así como de las características del terreno.

Pero no debemos olvidar las deformaciones interiores que inducen movimientos considerables que pueden afectar a cimentaciones profundas, en función de la profundidad de la excavación subterránea a controlar se realizan distintos tipos de mediciones con una instrumentación específica para cada caso.

En el caso de la ejecución de la excavación con una tuneladora, este movimiento puede ser del orden del 20-30% del total antes de la llegada del frente de excavación, del orden del 50-60% se produce por el paso de la propia máquina, y el resto del asiento 10-30% se produce con el túnel ya revestido, colocada la dovela e inyectado su trasdós.

La instrumentación utilizada por el Ingeniero en Geomática y Topografía para llevar a cabo el control de deformaciones producidas por la excavación del túnel, para el control de movimientos en la superficie se utilizarán fundamentalmente equipos y métodos topográficos, estaciones totales y niveles, además de extensómetros y sismógrafos, en cuanto al control en el interior del terreno se utilizarán extensómetros, inclinómetros, deflectómetros, emisiones acústicas, etc. Para realizar el seguimiento del nivel freático se utilizan piezómetros (cerrados o abiertos) y para medir presiones y tensiones se utilizan además células de presión o tensión, células de carga, bandas extensiométricas, etc.



Fig.78. Equipos topográficos para el control de deformaciones (estación total, nivel).

Fuente: cedex.es.

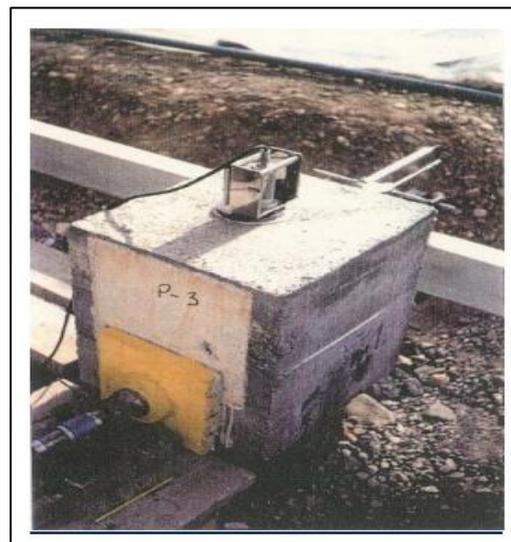


Fig.79. Equipo para medida de inclinaciones o movimientos angulares(inclinómetro).

Fuente: cedex.es.

La medida de **desplazamientos verticales** o de **asientos en superficie** se lleva a cabo mediante la nivelación de alta precisión de unos hitos, localizados en la zona de deformaciones de forma periódica. Se utilizan el método de nivelación geométrica o de nivelación por alturas con niveles de precisión y miras invar.

La nivelación se lleva a cabo sobre hitos de control firmemente implantados en el terreno, salvando pavimentos y capas cementadas artificiales, repartidas por la zona de influencia y dentro del área de la cubeta de asientos en superficie, la determinación de la cota referida en la cabeza de estos hitos se realiza a partir de bases fijas e independizada de los movimientos de las capas superiores, estas bases fijas podrían ser tubos o varillas ancladas a gran profundidad entre 20 y 25 metros, y fuera del área de influencia en una zona exenta de deformaciones.

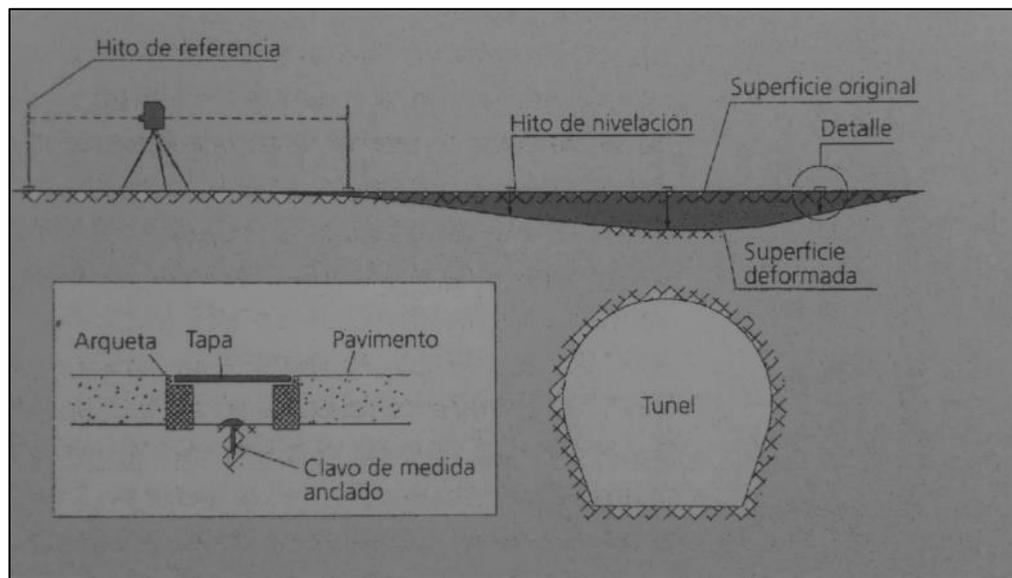


Fig.80. Medición de desplazamientos verticales. Fuente: E. P. de los Santos.

Los **desplazamientos horizontales** en superficie se vigilan mediante el establecimiento de redes topográficas de control ubicadas en la zona de influencia y referidas a bases localizadas fuera de la zona de afección de las deformaciones, se trata de determinar las coordenadas planimétricas (x, y) de un mismo punto de control cada cierto periodo de tiempo. Las observaciones se realizan utilizando estaciones totales de precisión y utilizando métodos topográficos para dar coordenadas con un alto grado de precisión a una serie de puntos de control repartidos por el área de influencia, las coordenadas se determinan desde referencias o bases topográficas ubicadas en una zona exterior al área de influencia de posibles deformaciones que deben conformar una red local de alta precisión rigurosamente compensada.

Cabe también destacar, el **control de movimientos en edificaciones** próximas al trazado del túnel se requiere de un levantamiento del estado inicial de la edificación (estado general, grietas, etc.) antes de realizarse la excavación, con un soporte documental suficiente para permitir conocer si se está produciendo afección a la edificación o si por el contrario está ya tenía dichos daños, el control se realiza a través de la nivelación de precisión de clavos nivelación situadas en las fachadas de los edificios o muros de carga, de toda la zona de desarrollo de la cubeta de asientos, refiriendo las medidas a bases externas a la zona previsible de influencia de las obras. Se debe efectuar una medida "cero" en el momento de la instalación y una comprobación posterior antes de que la excavación subterránea se encuentre próxima.

Otros movimientos que tener en cuenta son el **control de movimientos en el interior del terreno, asientos o desplazamientos verticales en profundidad** se lleva a cabo por nivelación de precisión, del mismo modo que la metodología vista en las medidas en superficie, pero de varillas situadas en superficie en la zona superior de la bóveda del túnel, ancladas a diversas profundidades. Otro método es por medio del extensómetro vertical de barrilla, instrumento que consta de una bolsa inflable que se introduce en un sondeo hasta la profundidad a la cual se desea medir las deformaciones conectada a la superficie por medio de una tubería galvanizada donde se realiza la lectura del desplazamiento relativa entre la superficie del terreno y el punto a considerar.

En la medida de **desplazamientos horizontales en profundidad** se utiliza el sistema de medición de desplazamientos con inclinómetros (biaxial) mediante la disposición de tuberías de aluminio anodizado. El inclinómetro permite la medición continua de movimientos laterales a lo largo de la vertical del sondeo. Las medidas se realizan desde el pie de la tubería situada fuera de la influencia del túnel hasta la superficie del terreno, también se realizan controles con deflectómetros, instalados en el frente de avance del túnel en un pequeño sondeo piloto proporcionando información sobre las deformaciones del macizo en zonas de corte o incluso de la presencia de aguas subterráneas; o con extensómetros de

sondeo, instalados para medir los gradientes de deformación y las convergencias o incluso mediante emisión acústica, señales que informa sobre la estabilidad de la estructura permitiendo detectar los posibles colapsos.

Movimientos en el interior de un túnel, el seguimiento de las deformaciones en el interior del túnel se realiza con la medición de convergencias, o medida de distancias entre puntos diametralmente opuestos, en el caso de secciones circulares, o entre puntos representativos de la deformación esperable en secciones con otras formas. Normalmente los desplazamientos relativos entre los puntos de referencia, materializados con clavos o pernos, se realizan con una cinta extensiométrica. Se trata de cintas métricas de hacer invar, provistas de comparadores micrométricos que permiten ajustar la tensión de equilibrio de la cinta, cuya medición se efectúa tensando la cinta de acero invar entre sus enganches a los pernos instalados previamente, que determinan las cuerdas de convergencia.

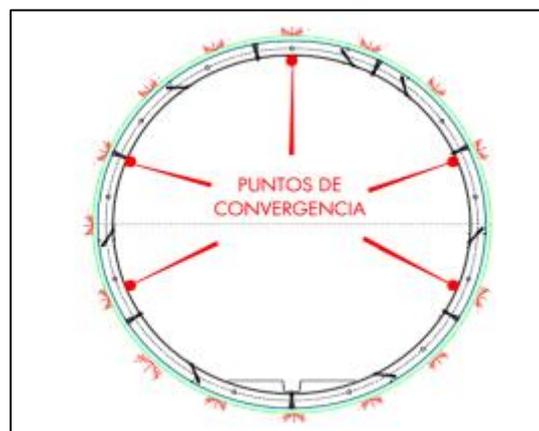
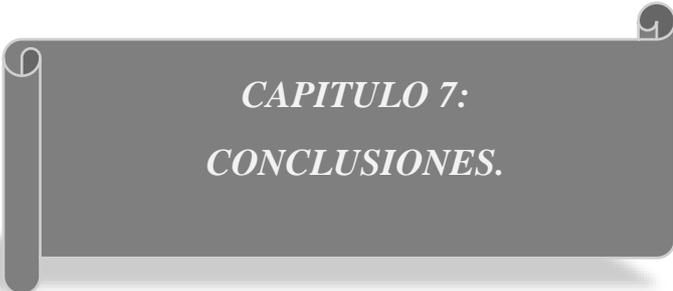


Fig.81. Puntos de control de convergencia por sección del túnel. Fuente: upm.es.



*CAPITULO 7:
CONCLUSIONES.*

7. CONCLUSIONES.

Hemos visto que a lo largo de la historia el túnel considerado hoy en día un recurso de la Ingeniería, ha sufrido un proceso evolutivo a lo largo del tiempo junto con las poblaciones, esta evolución se ha dado, en su proceso constructivo, en sus materiales, maquinaria, como en la evolución de la mano de obra.

Dado que la idea de túnel nace de la necesidad de superar un obstáculo, vemos que este es de gran necesidad en España debido a la complicada orografía, por lo que llevar a cabo su construcción es de gran necesidad, pero la ejecución de este tipo de obras debe ir siempre ligado a una serie de medidas, en el diseño y ejecución del túnel, como son el no dañar el hábitat ni el entorno que lo rodea y aplicar con rigor toda la normativa referente a túneles.

Dicho esto, vemos que la idea de concebir un túnel es de gran importancia y además de gran necesidad, y dependiendo del lugar donde se ejecute será de gran ayuda para las poblaciones que lo utilicen, como las zonas montañosas.

Por último se concluye que el Ingeniero en Geomática y Topografía, es el profesional más cualificado para llevar a cabo el desarrollo de este tipo de proyecto, dado que la ejecución del túnel requiere de gran precisión y exactitud desde los primeros procesos constructivos como hasta el posterior control de deformaciones, es por todo esto que el Ingeniero en Geomática y Topografía es el indicado para llevar a cabo esta obra de la ingeniería ya que cuenta con la formación, instrumentación y conocimientos específicos para la ejecución de este recurso de la Ingeniería.



*CAPITULO 8:
BIBLIOGRAFÍA.*

8. BIBLIOGRAFÍA.

- MANUEL DE VILLENA, I. 2001. *Topografía de obras*. Ediciones UPC. Barcelona.
- PRIEGO DE LOS SANTOS, E. 2013. *Túneles y tuneladoras. Ingeniería civil y geomática*. 2ª Ed. Valencia: Universitat Politècnica.
- TAPIA GOMEZ, A. 2003. *Topografía subterránea*. Ediciones UPC. Barcelona.
- EXPOSITO F. DE BATA, J. A. 1995. *Topografía resolutive de carreteras y túneles*. Ed. Bellisco. Madrid.
- LOPES JIMENO, C. 2011. *Manual de túneles y obras subterráneas. Ingeniería de túneles*. Ed. Cartoné. Madrid.
- STRUCH SERRA, MIQUEL. TAPIA GOMEZ, ANA. 2003. *Topografía para minería y obras*. Ediciones UPC. Barcelona.
- Juncà Ubierna, J. A. 1997. *Capítulo 1, Historia de los túneles y su evolución tecnológica. Manual de Túneles y Obras Subterráneas*. Ed. Carlos López Jimeno et al. Madrid: Gráficas Arias Montano, 1997 (1082p.) 1ª edición.
- Navarro Rodríguez, A. Prieto Morin, Juan. Velasco Gomez, J. 2009. *El guiado de las tuneladoras de los túneles de Pajares*. Ediciones UPM. Madrid.
- MINISTERIO DE FOMENTO, 2016. *Norma 3.1-IC Trazado instrucción de carreteras*.
- Real Decreto 635/2006 de 26 de mayo, *sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado*.

- Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, *sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras.*
- MINISTERIO DE FOMENTO, 2008. *Metodología de inspección de túneles (OC 27/2008).*
- MINISTERIO DE FOMENTO, 2012. *Metodología de análisis de riesgo en túneles de la Red de Carreteras del Estado.*
- UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA, *Historia de los túneles y su evolución histórica. Ingeniería geológica, excavaciones subterráneas.*
- LÓPEZ BELTRAN, J. Análisis y control de deformaciones. Ediciones UPM. Madrid.
- EMPRESA ADIF. Publicación, *Túnel de Pajares. Variante de Pajares.*
- EMPRESA ADIF. Publicación, *Túnel de Guadarrama. Una espectacular obra de la ingeniería española.*
- EMPRESA GEOCISA. Publicación, *Acondicionamiento de los túneles del Padrún autovía A-66 (Asturias).*
- EMPRESA LEYCA GEOSYSTEM. *Instrumentación y accesorios de topografía y aplicaciones GNSS.*
- EMPRESA INSTOP. *Alta precisión en la excavación de perfiles de túneles.*
- EMPRESA CEDEX. *Equipos de auscultación e instrumentación.*
- REVISTA SEGURIDAD MINERA. *Topografía de los túneles.*
- REVISTA INFORMES DE LA CONSTRUCCION. *Metodología de diseño, observación y cálculo de redes geodésicas interiores en túneles de ferrocarril de alta velocidad*



- Página web de consulta: <https://es.wikipedia.org/>
- Página web del Instituto Geográfico Nacional: www.ign.es/
- Página web del Centro de estudios y experimentación de obras públicas: <http://www.cedex.es>
- Página web del Ministerio de Fomento: <https://www.fomento.gob.es/>
- Página web de ADIF: www.adif.es/